МАТЕРИАЛЫ

XVI ОБЩЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»

1–3 декабря 2021 года
г. Москва

ООО «Геомаркетинг»

**ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий
в строительстве»**

**Ассоциация «Инженерные изыскания в строительстве» –
Общероссийское отраслевое объединение работодателей**

Союз изыскателей

**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ
ИЗЫСКАНИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ
В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**МАТЕРИАЛЫ XVI ОБЩЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
ИЗЫСКАТЕЛЬСКИХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

1–3 декабря 2021 г.

**МОСКВА
2021**

Geomarketing LLC

Russian Geotechnical Institute LLC

Russian Geotechnical Association

The Union of Prospectors

**PROSPECTS FOR DEVELOPMENT OF ENGINEERING
SURVEY IN RUSSIAN FEDERATION**

**MATERIALS OF THE XVI ALL-RUSSIAN CONFERENCE
OF PROSPECTING ORGANIZATIONS**

1–3 December 2021

**MOSCOW
2021**

Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации.

Материалы Шестнадцатой Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций.

М.: ООО «Геомаркетинг». 2021. – 764 с.

1–3 декабря 2021 г. в г. Москве редакцией журнала «Инженерные изыскания» совместно с ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве» (ООО «ИГИИС»), Ассоциацией «Инженерные изыскания в строительстве» – Общероссийское отраслевое объединение работодателей («АИИС») и Союзом изыскателей была проведена Шестнадцатая Общероссийская научно-практическая конференция **«Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»**.

В конференции приняли участие 889 представителей из 244 проектно-изыскательских организаций, научно-исследовательских институтов, крупнейших производственных организаций и вузов из 64 городов РФ, Белоруссии, Латвии, Польши: Александров, Архангельск, Астрахань, Березники, Брянск, Владивосток, Владимир, Волгоград, Вологда, Воронеж, Грозный, Долгопрудный, Дубна, Екатеринбург, Йошкар-Ола, Казань, Каспийск, Кемерово, Кировск, Кострома, Краснодар, Красноярск, Липецк, Москва, Мурманск, Нальчик, Нижневартовск, Нижний Новгород, Новокуйбышевск, Новокузнецк, Новосибирск, Омск, Пенза, Пермь, Петропавловск-Камчатский, Пятигорск, Ростов-на-Дону, Рязань, Самара, Санкт-Петербург, Саранск, Саратов, Симферополь, Смоленск, Сочи, Ставрополь, Сургут, Томск, Темрюк, Тюмень, Ульяновск, Уфа, Ухта, Хабаровск, Ханты-Мансийск, Челябинск, Чебоксары, Южно-Сахалинск, Якутск, Ямбург, Минск, Рига, Щецин. Заслушано 136 докладов.

В материалах Шестнадцатой Общероссийской научно-практической конференции **«Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»** представлены публикации по различным аспектам инженерных изысканий и проектированию.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов в области инженерных изысканий, проектирования, строительства, экологии, для студентов и аспирантов профильных вузов.

ISBN 978-5-6040982-3-3

<https://doi.org/10.25296/978-5-6040982-3-3-2021-12-1-764>

Редакционная группа: Журавлева Н.А., Висхаджиева К.С.

Prospects for development of engineering survey in Russian Federation.

Materials of the 16th All-Russian Conference of prospecting organizations.
Moscow: Geomarketing LLC. 2021. – 764 p.

On 1–3 December 2021 editorial board of the Engineering Survey journal in conjunction with the Russian Geotechnical Institute LLC, Russian Geotechnical Association, and the Union of Prospectors held the 16th All-Russian scientific and practical Conference “Prospects for development of engineering survey in Russian Federation” (Moscow).

The conference was attended by 889 representatives of 244 design and survey organizations, research institutes, major production organisations, and universities from 64 cities of the Russian Federation, Belarus, Latvia, Poland: Aleksandrov, Arkhangelsk, Astrakhan, Berezniki, Bryansk, Vladivostok, Vladimir, Volgograd, Vologda, Voronezh, Grozny, Dolgoprudny, Dubna, Yekaterinburg, Yoshkar-Ola, Kazan, Kaspiysk, Kemerovo, Kirovsk, Kostroma, Krasnodar, Krasnoyarsk, Lipetsk, Moscow, Murmansk, Nalchik, Nizhnevartovsk, Nizhny Novgorod, Novokuibyshevsk, Novokuznetsk, Novosibirsk, Omsk, Penza, Perm, Petropavlovsk-Kamchatsky, Pyatigorsk, Rostov-on-Don, Ryazan, Samara, Saint Petersburg, Saransk, Sarantovsk, Simferopol, Smolensk, Stavropol, Surgut, Tomsk, Temryuk, Tyumen, Ulyanovsk, Ufa, Ukhta, Khabarovsk, Khanty-Mansiysk, Chelyabinsk, Cheboksary, Yuzhno-Sakhalinsk, Yakutsk, Yamburg, Minsk, Riga, Szczecin. 136 reports were presented.

In the materials of the 16th All-Russian scientific and practical Conference **“Prospects for development of engineering survey in Russian Federation”** there are presented publications on various aspects of engineering survey and design.

Materials are intended for a wide range of specialists in the field of engineering surveys, design, construction, and ecology for students and graduate students of specialized universities.

ISBN 978-5-6040982-3-3

<https://doi.org/10.25296/978-5-6040982-3-3-2021-12-1-764>

Editorial group: N.A. Zhuravleva, K.S. Viskhadzhieva

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ»

Кропоткин М.П. НИУ МГСУ ООО НПП «Сингеос» Фоменко И.К. РГГРУ имени Серго Орджоникидзе (МГРИ) Инженерно-геологические изыскания в РФ сегодня – вниз по лестнице, идущей вверх	34
Мирный А.Ю. МГУ имени М.В. Ломоносова Ошибки при проведении инженерно-геологических изысканий и их последствия	46
Королев М.В. Институт прикладной механики РАН К вопросу о перспективах развития геомеханических испытаний	51
Дивеев А.А. Пензенский ГАСУ ООО «НПП “Геотек”» Болдырев Г.Г. ООО «НПП “Геотек”» Использование информационных технологий при проведении инженерно-геологических изысканий	59
Матвеев В.В. Geotechnical Graduate Lab МГУ имени М.В. Ломоносова Шанина В.В. МГУ имени М.В. Ломоносова Методы статистической обработки параметров нелинейных моделей грунтов	64
Болдырев Г.Г., Ачилов И.Ш. ООО «НПП “Геотек”» Испытания грунтов методом вращательного среза	74
Болдырев Г.Г., Костяев А.Е. ООО «НПП “Геотек”» Испытания грунтов методом комбинированного зондирования	83

Дробинина Е.В.

ПГНИУ

Пермский филиал ООО «Противокарстовая и береговая защита»

Оптимизация камеральной обработки материалов инженерно-геологических изысканий с использованием ГИС

93

Ермолов А.А.

МГУ имени М.В. Ломоносова

Особенности выполнения работ по поиску и выявлению карьеров грунтовых строительных материалов для обеспечения строительства магистрального газопровода «Бованенково – Ухта (III нитка)»

100

Кочев А.Д.

ООО «Институт “Транспроектинжиниринг”»

Изучение механизма образования карстово-суффозионных воронок в г. Москве

105

Петров Н.Ф., Никонорова И.В.

Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова

Некоторые замечания к объемам понятий и к терминологии склоновых гравитационных движений горных пород

121

Куропаткина Т.Н., Любимова Т.В.

Кубанский государственный университет

Исследование тектонических особенностей участка Черноморского побережья Краснодарского края при проведении инженерно-геологических изысканий

127

СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ»

Ковалев А.Н., Блужина А.С., Вихарева Р.В., Слепухин Е.А.,

Селифонов А.В.

ФАУ «Главгосэкспертиза России»

Создание цифровой платформы базы данных инженерных изысканий в форме информационной модели

131

Яценко А.И.

ООО «Фирма Г.Ф.К.»

Применение автоматизированной системы деформационного мониторинга для обеспечения безопасной эксплуатации транспортных сооружений и портовой инфраструктуры

135

Зорина В.В., Воскресенский И.С., Михеева С.Н., Сократов С.А.,

Сучилин А.А., Ушакова Л.А., Шафоростов В.М.

МГУ имени М.В. Ломоносова

Применение ГНСС и БЛА для исследования оползневых склонов абразионного берега морского побережья в районе г. Севастополя

145

**Воскресенский И.С., Сократов С.А., Сучилин А.А., Шныпарков А.Л.,
Ушакова Л.А.**
МГУ имени М.В. Ломоносова
**Полевое картографирование оползневых и селевых склонов
с применением ГНСС и БЛА хребта Аигба в районе Красной Поляны** 153

Курков В.М., Киселева А.С.
МИИГАиК
Клестов В.А., Курков М.В.
ГК «ГЕОСКАН»
Брусило В.А.
ООО «АГМ Системы»
**Опыт проведения повышения квалификации специалистов
по направлению «Беспилотная аэрофотосъемка, воздушное лазерное
сканирование и фотограмметрия»** 161

СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ»

Стурман В.И.
СПГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
**Некоторые вопросы дальнейшего совершенствования нормативной
базы инженерно-экологических изысканий** 166

Степанов А.И., Швечкова Н.А.
ООО «Фертоинг»
**Проблематика получения разрешений на выполнение изыскательских
работ на акватории морей** 171

Жигалин А.Д.
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
МГУ имени М.В. Ломоносова
Архипова Е.В.
Государственный университет «Дубна»
Лавров В.С.
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
**Инженерно-экологический контроль качества геофизической среды
городских поселений** 176

Колесникова М.В.
Веб-приложение Ecolog assistant
**Создание единой платформы для разработки экологической
составляющей проекта и взаимодействия в системе «эколог –
изыскатель – проектировщик – заказчик» на базе веб-приложения
Ecolog assistant** 183

Ермолов А.А., Кизяков А.И. МГУ имени М.В. Ломоносова Илюшин Д.Г. ООО «ЦМИ МГУ имени М.В. Ломоносова» Фонд поддержки научно-проектной деятельности студентов, аспирантов и молодых ученых «Национальное интеллектуальное развитие» Исаченко А.И. ООО «Арктический научный центр» Экологическая чувствительность берегов западных арктических морей России к нефтяным разливам	188
Комова Н.Н., Зотова Л.И. МГУ имени М.В. Ломоносова Литокриогенная устойчивость ландшафтов приморских равнин Восточной Чукотки	193
Калинка О.П., Карнатов А.Н. ММБИ РАН Карты уязвимости как актуальный инструмент при инженерно- экологических изысканиях	199
Трофимов В.Т., Харькина М.А. МГУ имени М.В. Ломоносова Составление карт современного экологического состояния – требование СП 502.1325800.2021 «Инженерно-экологические изыскания для строительства. общие правила производства работ». Каково их содержание?	206
Коровина А.Б., Седойкина А.С. ООО «СамараНИПИнефть» Площадная разница территории инженерно-экологических изысканий и территорий отдельных видов исследований	216
Сидоренко С.А. ООО «СамараНИПИнефть» Экологическое состояние почвы в условиях искусственных барьеров	221
Царев М.А., Сергеев В.И., Сергеев Р.В. МГУ имени М.В. Ломоносова Определение необходимого объема буровых работ при инженерно- геологических изысканиях, вблизи источников загрязнения подземных вод	229
Подлипский И.И. РГПУ им. А.И. Герцена ООО «КТПИ “Газпроект”» Типичные ошибки экологов при составлении технического отчета по результатам проведения инженерно-экологических изысканий	239

**СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНО-ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ
ИЗЫСКАНИЯ»**

Клименко Д.Е.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина

**Катастрофические наводнения на Среднем Урале в условиях
увеличения частоты и интенсивности ливней** 243

Мискевич И.В.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

**Гидрологическая характеристика устья р. Карговки в Мезенском
заливе Белого моря в летнюю межень** 251

Юхно А.В., Кулешов А.А.

Государственный гидрологический институт

**Применение метода смешения для измерения расходов воды на малых
водотоках** 257

Иглин С.М.

Архангельский филиал ФГУП «Росморпорт»

**Наблюдения за уровнем моря на участке главного судового хода
в устьевой области р. Северной Двины в летнюю навигацию 2021 г.** 265

Лебедева С.В.

Северное УГМС

Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова

Льюменс М.

ООО «Экхайден», г. Москва

**Расчеты скоростей течения в устье р. Северной Двины
для обеспечения безопасности судоходства** 271

Виноградов Р.А., Андреев О.М., Драбенко Д.В., Скутин А.А.

ААНИИ

**Инженерно-гидрометеорологические изыскания с учетом аккумуляции
ледяной каши в арктических портах** 277

Андреев О.М., Виноградов Р.А.

ААНИИ

**Особенности расчета пределов прочности льда в текущей редакции
СП 38.13330.2018 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические
сооружения (волновые, ледовые и от судов)»** 285

Черноус П.А.

СКБ САМИ ДВО РАН

**Оценивание лавинной опасности при инженерных изысканиях для
строительства. Недостатки и возможности совершенствования** 290

Селиверстов Ю.Г., Петраков Д.А., Турчанинова А.С., Глазовская Т.Г.

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Рекомендации по результатам инженерно-гидрометеорологических
изысканий. Лавины. Направляющие, тормозящие, останавливающие
сооружения** 296

Мальнева И.В., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Хаджиев М.М.

Высокогорный геофизический институт

Анаев М.А.

ГУ МЧС России по Кабардино-Балкарской Республике

**Активность селей и других опасных природных процессов
в Кабардино-Балкарской Республике за последние годы** 304

**СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ»**

Брушков А.В.

МГУ имени М.В. Ломоносова

Тюменский государственный университет

Дроздов Д.С., Садуртдинов М.Р.

Институт криосферы Земли ТЮМНЦ СО РАН

Дубровин В.А.

ФГБУ «Гидроспецгеология»

Железняк М.Н.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

Осокин А.Б.

Филиал «Инженерно-технический центр» ООО «Газпром добыча Надым»

Остарков Н.А.

Министерство по развитию Дальнего Востока и Арктики РФ

Сергеев Д.О.

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН

Фролов К.Н.

Министерство энергетики РФ

**Проблемы создания государственной системы мониторинга
криолитозоны** 315

Литовко А.В., Сыромятников И.И.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

Создание мониторинговой сети на автомобильной дороге «Нам» 320

Юров Ф.Д.

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Региональные особенности поведения транспортных систем
в криолитозоне при изменении климата**

326

Сотникова К.С., Маслаков А.А.

МГУ имени М.В. Ломоносова

Грибовский Г.В.

ООО «НТЦ Симмэйкерс»

**Моделирование теплового режима подземного хранилища Восточной
Чукотки в многолетнемерзлых породах**

333

Петров Б.В.

МГУ имени М.В. Ломоносова

Поляков А.В., Курбатов А.С.

ООО «Газпром добыча Ямбург»

**Температурный режим грунтовых оснований кустов газовых скважин
Ямбургского месторождения**

339

Гаврилов А.В., Усов А.Н., Минина М.В.

ООО «Инженерная Геология и Геотехника»

**Опыт проведения инженерно-геологических изысканий на территории
г. Салехарда**

343

Мотенко Р.Г., Зубкова А.В., Давлетова Р.Р.

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Экспериментальная оценка влияния засоления на фазовый состав
влаги и температуру начала замерзания (оттаивания) мерзлых песков,
содержащих органическое вещество**

350

Бровка А.Г., Дедюля И.В., Мурашко А.А.

Институт природопользования НАН Беларуси

**Закономерности изменения прочностных свойств мерзлых глинистых
пород от содержания незамерзшей воды**

357

Агутин К.А., Бровка Г.П., Мурашко А.А.

Институт природопользования НАН Беларуси

**Методы экспериментального исследования характеристик морозного
пучения горных пород**

364

Фролов Д.М., Кошурников А.В., Гагарин В.Е., И.А. Набиев,

Додобоев Э.И.

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Применение расчетной схемы глубины промерзания породы на основе
данных о температуре воздуха и толщине снежного покрова
при проведении геотехнического мониторинга на Анзобском перевале
(Таджикистан)**

371

Белкова Е.А., Мотенко Р.Г., Гречищева Э.С.

МГУ имени М.В. Ломоносова

НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ “Строительство”»

**Влияние температурного режима на температуру начала
замерзания грунтов разного гранулометрического состава
при ее экспериментальном определении**

378

Шестернев Д.Д.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

**Особенности геокриологических условий территории объекта
авиационной инфраструктуры в центральной Якутии**

386

Макарычева Е.М., Кузнецов Т.И.

ООО «НИИ Транснефть»

**Перспективы использования метода воздушного лазерного
сканирования при проведении инженерных изысканий
на территории криолитозоны**

390

СЕКЦИЯ «ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЯХ»

Алешин А.С.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

**О нормативной базе сейсмического микрорайонирования объектов
нормального уровня ответственности**

397

Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Система уравнений затухания ускорений

406

Эртелева О.О.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Прогноз значения коэффициента динамического усиления

412

Зеленин Е.А.

Геологический институт РАН

ООО «ИГИИС»

Стром А.Л.

ООО «ИГИИС»

ООО «ЦГИ»

Гарипова С.Т.

Геологический институт РАН

**Представление активных разломов в геологических материалах
и их сегментация для задач сейсмического районирования**

420

Кухмазов А.С.

АО «Атомэнергопроект»

Магомедов А.М.

ПАО «РусГидро» – «Дагестанский филиал»

**Определение особенностей глубинного строения
Республики Дагестан по данным сейсмической томографии
и функции приемника от далеких землетрясений**

425

Строчков Ю.А.

ФГБУ «Росгеолфонд»

**Методика регистрации техногенных вибраций на поверхности
грунтов и конструкций**

435

Еремин Р.А., Кулижников А.М., Пудова Н.Г.

ФАУ «РОСДОРНИИ»

**Методика комплексного обследования дорожной одежды
автомобильных дорог с применением методов неразрушающего
контроля**

438

Волынин А.Ф.

ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»

**Результаты геофизических работ по обследованию грунтов на
участке провала и аварийном участке трубопровода с целью
определения причин провала и аварии**

447

**СЕКЦИЯ «ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
В СОСТАВЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ИНЖЕНЕРНО-
ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ»**

Батрак Г.И.

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН

**Принятие управляющих решений в условиях неопределенности
гидрогеологических и инженерно-геологических прогнозов**

453

Вилькина М.В.

Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии

им. Е.М. Сергеева РАН

Санкт-Петербургский государственный университет

Никуленков А.М.

Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии

им. Е.М. Сергеева РАН

**Обоснование водозащитных мероприятий при разработке
строительного котлована в условиях тектонической дислокации
паннонских отложений на участке размещения атомной
электростанции Пакш-2, Венгрия**

461

Мошин В.Е., Филимонова Е.А.

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Оценка пористости и коэффициента фильтрации песков
расчетными методами**

468

Волкова М.К.

АО «ВНИПИПромтехнологии»

МГУ имени М.В. Ломоносова

Лехов М.В.

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Разработка рекомендаций по улучшению гидрогеологической
обстановки на угольном разрезе**

475

**СЕКЦИЯ «ГЕОТЕХНИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ:
ОСВОЕНИЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА И СОХРАНЕНИЕ
ПАМЯТНИКОВ»**

Кудрявцев С.А., Котенко Ж.И.

Дальневосточный государственный университет путей сообщения

Сахаров И.И.

СПбГАСУ

Парамонов В.Н.

ПГУПС

**Особенности инженерно-геологических изысканий для прогнозных
расчетов объектов железнодорожной инфраструктуры
в геокриолитозоне**

485

Романевич К.В., Лебедев М.О., Андрианов С.В.

ОАО «НИПИИ “Ленметрогипротранс”»

**Комплексная интерпретация результатов долгосрочного
геотехнического мониторинга горных тоннелей с использованием
метода электромагнитной эмиссии**

491

Шашкин М.А.

ООО «ПИ Геореконструкция»

**Разница в подходах к оценке влияния вибродинамических воздействий
на памятники архитектуры в России и Германии**

499

Федоренко Е.В.

ООО «НИП-Информатика»

**Геотехническое обеспечение строительства насыпей на слабых
основаниях**

507

Мирный А.Ю., Бершов А.В.

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Опыт калибровки параметров нелинейной численной модели
на основании прессиометрических испытаний**

515

СЕКЦИЯ «ИЗЫСКАНИЯ НА ШЕЛЬФЕ»

- Локтев А.С.**
ООО «ЦМИ МГУ имени М.В. Ломоносова»
Разработка ГОСТ Р «Морские исследования грунтов» 522
- Пронин И.С., Потемка А.К., Бирюков Е.А.**
ООО «Сплит»
Токарев М.Ю.
МГУ имени М.В. Ломоносова
Сейсмические исследования в новом своде правил по инженерным изысканиям на континентальном шельфе 530
- Рокос С.И., Куликов С.Н.**
АО «АМИГЭ»
Новый аспект исследований на шельфе – оценка горно-геологических условий строительства морских нефтегазовых скважин с помощью инженерно-геологических методов 535
- Кириллов С.А., Калениченко В.О.**
ООО «ЦМИ МГУ имени М.В. Ломоносова»
О перспективах применения результатов экологических исследований на шельфе 542
- Терехина Я.Е., Токарев М.Ю., Хлебникова О.А., Соловьева М.А.**
МГУ имени М.В. Ломоносова
Горбачев С.В., Нурмухамедов Т.В.
ООО «РН-Шельф-Арктика»
Гончарова А.М.
ООО «Арктический научный центр»
Опыт мультимасштабного инженерно-геологического картирования на акватории Печорского моря 548
- Ермолов А.А., Белова Н.Г., Новикова А.В.**
МГУ имени М.В. Ломоносова
Изучение динамики низких арктических берегов полевыми и дистанционными методами 557
- Миронюк С.Г.**
МГУ имени М.В. Ломоносова
Подход к количественной оценке опасности для трубопровода, пересекающего активный разлом (Баренцево море) 561

Шполянская Н.А.

УГТУ

Криолитозона Российской Арктики в системе «суша – шельф» как информация о спорных вопросах четвертичной истории региона 569

Шматков А.А., Шматков А.Г.

Marine Geo Service (ООО «МГ-Сервис»)

Новые возможности телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов для решения инженерно-геологических задач 577

Макаров А.В.

ООО «Деко-геофизика»

Обработка видеосъемки для картирования подводных ландшафтов 581

Якушкин О.О., Павлова Е.Д.

СПбГУ

ООО «Биогеохаб»

Лаврова А.К., Терехина Я.Е., Буланова А.А.

МГУ имени М.В. Ломоносова

Пен Е.А.

ООО «Биогеохаб»

Фрих-Хар А.Ю., Шабалин Н.В.

ООО «ЦМИ МГУ имени М.В. Ломоносова»

Седова О.С.

СПбГУ

Анализ подводной видео- и фотосъемки с использованием технологий искусственного интеллекта 588

КРУГЛЫЙ СТОЛ «ИНЖЕНЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ШЕЛЬФЕ»

Титов Н.О.

ООО «СПЛИТ»

Токарев М.Ю.

МГУ имени М.В. Ломоносова

Выделение геологических опасностей путем анализа трехмерных S-скоростных моделей, полученных методом многоканального анализа поверхностных волн 593

Ковачев С.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Результаты геодинамического мониторинга на месторождении им. Ю. Корчагина (Северный Каспий) 602

Бирюков Е.А.

ООО «СПЛИТ»

Понимаскин А.И.

ООО «Деко геофизика»

Токарев М.Ю.

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Опыт применения морских трехмерных высокоразрешающих
и сверхвысокоразрешающих сейсмоакустических наблюдений
при проведении инженерно-геологических изысканий на акватории**

609

Пирогова А.С.

МГУ имени М.В. Ломоносова

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Щуплов П.А.

ООО «ЦАСД МГУ имени М.В. Ломоносова»

Токарев М.Ю.

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Инверсия мультимастотных данных 3D сейсморазведки для оценки
упругих свойств морских отложений**

615

Дубиня Н.В.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

МФТИ

Пирогова А.С.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

МГУ имени М.В. Ломоносова

Токарев М.Ю., Щуплов П.А.

МГУ имени М.В. Ломоносова

Делия С.В.

ТОО «Женис Оперейтинг»

**Псевдодвумерные геомеханические модели как инструмент
для предварительной оценки рисков при бурении на шельфе**

621

Васильев И.А., Алексеев Д.А.,

МФТИ

Дубиня Н.В., Тихоцкий С.А.

МФТИ

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Начев В.А.

МФТИ

Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН

**Исследование устойчивости самоподъемных буровых установок
при сейсмических воздействиях**

628

**СЕКЦИЯ «АРХЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СОСТАВЕ
ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ»**

- Вязкова О.Е.**
РГГРУ имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)
Инженерно-геологические аспекты музеефикации архитектурно-археологических памятников Новороссийского района 634
- Дубровин К.А.**
РГГРУ имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)
Влияние инженерно-геологических условий на перспективы музеефикации пещерного города Эски-Кермен (Республика Крым) 641
- Беркович В.А., Гусаков М.Г., Фролов Н.В.**
ООО «Археологические изыскания в строительстве»
Археологические раскопки на Соймоновском проезде в г. Москве 648
- Беркович В.А., Гусаков М.Г., Егоров К.А., Фролов Н.В.**
ООО «Археологические изыскания в строительстве»
Городская усадьба XIX в. в Хамовниках (по результатам археологических исследований 2012 г.) 657
- Казначеев П.А., Камшилин А.Н., Ушаков Д.А., Кох В.В., Краюшкин Д.В.**
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
Поиск скрытых пустот и ослабленных зон под дном искусственного водоема с помощью геоэлектрического токового метода: первые результаты полевого эксперимента 671
- Беркович В.А., Балашов А.Ю., Фролов Н.В., Лихтер Ю.А.**
ООО «Археологические изыскания в строительстве»
Раскопки на территории исторической Огородной слободы в г. Москве 679
- Беркович В.А., Балашов А.Ю., Егоров К.А., Фролов Н.Ф.**
ООО «Археологические изыскания в строительстве»
Раскопки Тверской-Ямской слободы на Триумфальной площади 689
- Беркович В.А., Балашов А.Ю., Егоров К.А., Пономаренко А.К.**
ООО «Археологические изыскания в строительстве»
Археологическое исследование храма Спаса Преображения на Преображенской площади в г. Москве 700
- Горлов И.О.**
ООО «ЦМИ МГУ имени М.В. Ломоносова»
Подводно-археологические работы в составе инженерных изысканий на шельфе. Проблемы и перспективы 715

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ

Васин Д.В., Лехов М.В.

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Разгрузка грунтовых вод в долину р. Москвы и ее влияние
на устойчивость склона Карамышевской набережной**

722

Епифанова Д.Р.

ООО «РН-БашНИПИнефть»

НИУ МГСУ

Травкин А.И.

**Опасные геологические процессы на территории проектируемой
застройки в пределах юго-западной части г. Уфы**

739

Фрих-Хар А.Ю., Шабалин Н.В.

ООО «ЦМИ МГУ имени М.В. Ломоносова»

Терехина Я.Е.

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Картирование подводных ландшафтов для морского
пространственного планирования**

747

Никитин С.Н., Погребченко В.В.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Никитина И.А., Никитин М.С.

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Оценка локальных сейсмических условий для сооружений нормальной
и пониженной ответственности**

754

CONTENTS

SECTION “ENGINEERING–GEOLOGICAL SURVEYS”

M.P. Kropotkin

Moscow State (National Research) University of Civil Engineering
Singeos LLC

I.K. Fomenko

Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI)

**Engineering-geological surveys in the Russian Federation today –
down the ladder going up** 34

A.Yu. Mirnyy

Lomonosov Moscow State University

Errors during engineering-geological surveys and their consequences 46

M.V. Korolev

Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences

To the question of the prospects for the development of geomechanical tests 51

A.A. Diveev

Penza State University of Architecture and Construction

Scientific Production Enterprise Geotek LLC

G.G. Boldyrev

Scientific Production Enterprise Geotek LLC

Use of information technologies in engineering-geological surveys 59

V.V. Matveev

Geotechnical Graduate Lab

Lomonosov Moscow State University

V.V. Shanina

Lomonosov Moscow State University

Methods of statistical treatment of soil non-linear models’ parameters 64

G.G. Boldyrev, I.Sh. Achilov

Scientific Production Enterprise Geotek LLC

Vane shear test of soils 74

G.G. Boldyrev, A.E. Kostyaev

Scientific Production Enterprise Geotek LLC

Testing of soils by the combined sounding method 83

E.V. Drobinina

Perm State University

Perm Branch of the Karst-Control and Bank Protection LLC

Optimization of office studies of the engineering surveys results using GIS 93

A.A. Ermolov

Lomonosov Moscow State University

Features of the work on the search and identification of quarries of ground building materials to ensure the construction of main gas pipeline “Bovanenkovo – Ukhta (III thread)”

100

A.D. Kochev

Institute Transprojectengineering LLC

Studying the mechanism of the formation of the karst-suffosion funnels in Moscow

105

N.F. Petrov, I.V. Nikonorova

Ulyanov Chuvash State University

Some remarks on the scope of concepts and on the terminology of slope gravitational motions of rocks

121

T.N. Kuropatkina, T.V. Lyubimova

Kuban State University

Research of the tectonic features of the Black Sea coast area of the Krasnodar Region during engineering-geological surveys

127

SECTION “ENGINEERING-GEODESIC SURVEYS”

A.N. Kovalev, A.S. Bluzhina, R.V. Vikhareva, E.A. Slepukhin, A.V. Selifonov

Main Department of State Expertise

Creation of a digital database platform for engineering surveys in the form of an information model

131

A.I. Yashchenko

The Firm G.F.K. LLC

Application of an automated deformation monitoring system to ensure safe operation of transport facilities and port infrastructure

135

V.V. Zorina, I.S. Voskresensky, S.N. Mikheeva, S.A. Sokratov,

A.A. Suchilin, L.A. Ushakova, V.M. Shaforostov

Lomonosov Moscow State University

Application of GNSS and UAVs for researching landslides of the abrasion coast of the sea coast in the area of Sevastopol

145

I.S. Voskresensky, S.A. Sokratov, A.A. Suchilin, A.L. Shnyparkov, L.A. Ushakova

Lomonosov Moscow State University

Field mapping of landslide and debris flow slopes of the Aibga Ridge in the Krasnaya Polyana region using the GNSS and UAVs

153

V.M. Kurkov, A.S. Kiseleva

Moscow State University of Geodesy and Cartography

V.A. Klestov, M.V. Kurkov

GEOSCAN GK

V.A. Brusilo

AGM Systems LLC

Experience in advanced training of specialists in the field of “Unmanned aerial photography, aerial laser scanning and photogrammetry”

161

SECTION “ENGINEERING-ECOLOGICAL SURVEYS”

V.I. Sturman

Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications

Some issues of further improvement of the regulatory framework for engineering-ecological surveys

166

A.I. Stepanov, N.A. Svechkova

Fertoing LLC

Problems of obtaining permissions to perform offshore engineering surveys

171

A.D. Zhigalin

Schmidt Institute of Physics of the Earth

Lomonosov Moscow State University

E.V. Arkhipova

Dubna State University

V.S. Lavrov

Schmidt Institute of Physics of the Earth

Engineering-ecological quality control of the geophysical environment of urban settlements

176

M.V. Kolesnikova

Ecolog assistant web application

Creation of a unified platform for developing the environmental component of the project and interaction in the system “ecologist – researcher – designer – customer” based on the Ecolog assistant web-application

183

A.A. Ermolov, A.I. Kizyakov

Lomonosov Moscow State University

D.G. Ilyushin

Lomonosov Moscow State University Marine Research Center

Foundation “National Intellectual Resource”

A.I. Isachenko

Arctic Research Center LLC

Ecological sensitivity of the Russian Western Arctic sea shores to oil spills

188

N.N. Komova, L.I. Zotova

Lomonosov Moscow State University

Lithocryogenic stability of the coastal plains of Eastern Chukotka 193

O.P. Kalinka, A.N. Karnatov

Murmansk Marine Biological Institute, Russian Academy of Sciences

Vulnerability maps as a comprehensive tool for engineering-ecological surveys 199

V.T. Trofimov, M.A. Kharkina

Lomonosov Moscow State University

Developing the maps of the current environmental state – a requirement of SP 502.1325800.2021 “Engineering environmental survey for construction. General regulations for execution of work”. What is their content? 206

A.B. Korovina, A.S. Sedoikina

Samara Design and Research Institute on Crude Oil Production LLC

Areal difference between the territory of engineering-ecological surveys and the territories of certain types of research 216

S.A. Sidorenko

Samara Design and Research Institute on Crude Oil Production LLC

Ecological state of soils under artificial barriers 221

M.A. Tsarev, V.I. Sergeev, R.V. Sergeev

Lomonosov Moscow State University

Determination of the necessary volume of drilling works during engineering-geological surveys near the sources of pollution of groundwater 229

I.I. Podlipskiy

Herzen State Pedagogical University

Design and Technological Institute “Gazproekt” LLC

Typical errors of ecologists in preparing a technical report on the results of engineering-ecological surveys 239

SECTION “ENGINEERING-HYDROMETEOROLOGICAL SURVEYS”

D.E. Klimenko

Ural Federal University

Catastrophic flooding in the Middle Urals under conditions of increasing the frequency and intensity of showers 243

I.V. Miskevich

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences

Hydrological characteristics of the Kargovka River mouth in the Mezen Bay of the White Sea in the summer low water 251

A.V. Iukhno, A.A. Kuleshov

State Hydrological Institute

Application of the dilution method for measuring water discharge of small watercourses

257

S.M. Iglin

Arkhangelsk branch of Rosmorport

Observations of the water level in the area of the navigable channel in the mouth of the Northern Dvina River in the summer navigation of 2021

265

S.V. Lebedeva

Northern Agency for Hydrometeorology and Environmental Monitoring

Zubov State Oceanographic Institute

M. Leummens

Echyden LLC

Flow velocities estimation for the Northern Dvina River mouth to provide safe navigation

271

R.A. Vinogradov, O.M. Andreev, D.V. Drabenko, A.A. Skutin

Arctic and Antarctic Research Institute

Engineering-hydrometeorological surveys that takes into account accumulation of brash ice in Arctic ports

277

O.M. Andreev, R.A. Vinogradov

Arctic and Antarctic Research Institute

Peculiarities of the calculation of the ice strength in the current edition of SP 38.13330.2018 “Loads and impacts on hydraulic structures (from wave, ice and ships)”

285

P.A. Chernous

Special Research Bureau for Automation of Marine Researchers, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences

Avalanche hazard assessment during engineering survey for construction. Disadvantages and possibilities for improvement

290

Yu.G. Seliverstov, D.A. Petrakov, A.S. Turchaninova, T.G. Glasovskaya

Lomonosov Moscow State University

Recommendations on the results of engineering-hydrometeorological surveys. Avalanches. Deflecting, retarding, and retention structures

296

I.V. Malneva, M.D. Dokukin, R.Kh. Kalov, M.M. Khadzhiev

High-Mountain Geophysical Institute

M.A. Anaev

Main Directorate of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters for the Kabardino-Balkarian Republic

Activity of debris flows and other hazardous natural processes in Kabardino-Balkarian Republic in recent years

304

SECTION “ENGINEERING AND GEOLOGICAL SUPPORT FOR CONSTRUCTION OF OBJECTS IN CRYOLITHOZONE”

A.V. Brouchkov

Lomonosov Moscow State University

Tyumen State University

D.S. Drozdov, M.R. Sadurtdinov

Institute of the Earth Cryosphere, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

V.A. Dubrovin

Hydrospetchgeologia

M.N. Zheleznyak

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

A.B. Osokin

Engineering and Technical Center, Branch of Gazprom dobycha Nadym LLC

N.A. Ostarkov

Ministry for the Development of the Russian Far East and Arctic

D.O. Sergeev

Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences

K.N. Frolov

Ministry of Energy of Russian Federation

Problems of implementation of state permafrost monitoring system

315

A.V. Litovko, I.I. Syromyatnikov

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

Developing a monitoring network on the “Nam” highway

320

F.D. Iurov

Lomonosov Moscow State University

Regional features of the behavior of transport systems in the cryolithozone under climate change

326

K.S. Sotnikova, A.A. Maslakov

Lomonosov Moscow State University

G.V. Gribovskii

Simmakers LLC

Modeling of the thermal regime of the ice cellars of Eastern Chukotka in permafrost

333

B.V. Petrov

Lomonosov Moscow State University

A.V. Polyakov, A.S. Kurbatov

Gazprom Dobycha Yamburg LLC

Temperature regime of gas well clusters’ soil foundations at the Yamburg field

339

A.V. Gavrilov, A.N. Usov, M.V. Minina Engineering Geology and Geotechnics LLC Experience of engineering-geological surveys in Salekhard	343
R.G. Motenko, A.V. Zubkova, R.R. Davletova Lomonosov Moscow State University Experimental assessment of the influence of salinity on the phase composition of moisture and the temperature of the onset of freezing (thawing) of frozen sands containing organic matter	350
A.G. Brovka, I.V. Dedyulya, A.A. Murashko Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus Regularities of change in strength properties of frozen clay soils from the content of unfrozen water	357
K.A. Agutin, G.P. Brovka, A.A. Murashko Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus Methods of experimental study of rock frost upheaval characteristics	364
D.M. Frolov, A.V. Koshurnikov, V.E. Gagarin, I.A. Nabiev, E.I. Dodoboev Lomonosov Moscow State University Application of the calculating scheme for ground freezing depth based on data on air temperature and snow cover thickness during geotechnical monitoring on the anzob pass (Tajikistan)	371
E.A. Belkova, R.G. Motenko Lomonosov Moscow State University E.S. Grechishcheva Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP), Research Center of Construction JSC Influence of the temperature regime on the temperature of the beginning of freezing of soils of different granulometric composition during temperature experimental determination	378
D.D. Shesternev Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences Features of geocryological conditions of the territory of the aviation infrastructure facility in Central Yakutia	386
E.M. Makarycheva, T.I. Kuznetsov Pipeline Transport Institute LLC Future for lidar method using to conduct engineering and geological surveys in permafrost region	390

SECTION “GEOPHYSICAL METHODS IN ENGINEERING SURVEYS”

A.S. Aleshin

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences

About the regulatory system of seismic microzoning of objects of a normal level of responsibility

397

F.F. Aptikaev, O.O. Erteleva

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences

System of acceleration attenuation equations

406

O.O. Erteleva

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences

Prognosis of the amplification factor value

412

E.A. Zelenin

Geological Institute, Russian Academy of Sciences

Russian Geotechnical Institute LLC

A.L. Strom

Russian Geotechnical Institute LLC

Geodynamics Research Centre LLC

S.T. Garipova

Geological Institute, Russian Academy of Sciences

Representation of active faults in geological materials and their segmentation for seismic hazard assessment

420

A.S. Kukhmazov

Atomenergoproekt JSC

A.M. Magomedov

Rushydro PJSC – Dagestan Branch

Determination of Republic of Dagestan crustal structure by seismic tomography and receiver function based on teleseismic data

425

Yu.A. Strochkov

Russian Geological Fund

Technique for recording technogenic vibrations on the surface of soils and structures

435

R.A. Eremin, A.M. Kulizhnikov, N.G. Pudova

ROSDORNII

Methodology for a comprehensive survey of road pavement of highways using non-destructive testing methods

438

A.F. Volynin

State Unitary Enterprise “Water Canal of Saint Petersburg”

Results of geophysical work on soil survey at the section of the sinkhole collapse and the emergency section of the pipeline in order to determine the causes of the sinkhole collapse and the emergency

447

SECTION “HYDROGEOLOGICAL INVESTIGATIONS AS A PART OF ENGINEERING-GEOLOGICAL AND ENGINEERING-ECOLOGICAL SURVEYS”

G.I. Batrak

Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences

Making control decisions under uncertainty of hydrogeological and engineering-geological forecasts

453

M.V. Vilkina

Saint Petersburg Division of the Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences

Saint Petersburg State University

A.M. Nikulenkov

Saint Petersburg Division of the Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences

Ensuring water security when constructing an open pit under dislocated pannonian basin conditions at the Paks-2 nuclear power plant, Hungary

461

V.E. Moshin, E.A. Filimonova

Lomonosov Moscow State University

Estimation of sand porosity and hydraulic conductivity by semi-analytical equations

468

M.K. Volkova

VNIPIPT JSC

Lomonosov Moscow State University

M.V. Lekhov

Lomonosov Moscow State University

Development of recommendations for improving the hydrogeological situation at the open-pit coal mine

475

SECTION “GEOTECHNICS AND ENGINEERING GEOLOGY: EXPLORATION OF UNDERGROUND SPACE AND PRESERVATION OF MONUMENTS”

S.A. Kudryavtsev, Zh.I. Kotenko

Far Eastern State Transport University

I.I. Sakharov

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

V.N. Paramonov

Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University

Features of engineering-geological surveys for predictive calculations of railway infrastructure facilities in the geocryolithozone

485

K.V. Romanevich, M.O. Lebedev, S.V. Andrianov

Lenmetrogiprotrans OJSC

Comprehensive interpretation of the results of long-term geotechnical monitoring of mining tunnels using the electromagnetic emission method 491

M.A. Shashkin

Design Institute Georekonstrukciya LLC

Difference in approaches to assessing the influence of vibrodynamic impact on architectural monuments in Russia and in Germany 499

E.V. Fedorenko

NIP-Informatica LLC

Geotechnical support for the construction of embankments on soft soil 507

A.Yu. Mirnyy, A.V. Bershov

Lomonosov Moscow State University

Experience of nonlinear numerical model parameters calibration based on pressiometer tests 515

SECTION “OFFSHORE ENGINEERING SURVEYS”

A.S. Loktev

Lomonosov Moscow State University Marine Research Center LLC

Development of the Russian standard GOST R “Marine soil investigations” 522

I.S. Pronin, A.K. Potemka, E.A. Biryukov

SPLIT LLC

M.Yu. Tokarev

Lomonosov Moscow State University

Seismic survey in the new code of practice for engineering surveys on the continental shelf 530

S.I. Rokos, S.N. Kulikov

Arctic Marine Engineering Geological Expeditions JSC

New aspect of offshore research – an estimation of geological conditions for construction of offshore oil and gas wells using engineering-geological methods 535

S.A. Kirillov, V.O. Kalenichenko

Lomonosov Moscow State University Marine Research Center LLC

On the prospects of application of the results of ecological research on the shelf 542

Ya.E. Terekhina, M.Yu. Tokarev, O.A. Khlebnikova, M.A. Solovyeva

Lomonosov Moscow State University

S.V. Gorbachev, T.V. Nurmukhamedov

RN-Shelf-Arctic LLC

A.M. Goncharova

Arctic Research Center LLC

Experience of multi-scale engineering-geological mapping in the Pechora Sea

548

A.A. Ermolov, N.G. Belova, A.V. Novikova

Lomonosov Moscow State University

Dynamics of low Arctic coasts studied by field and remote methods

557

S.G. Mironyuk

Lomonosov Moscow State University

Approach to quantitative hazard assessment for pipeline crossing an active fault (Barents Sea)

561

N.A. Shpolyanskaya

Ukhta State Technical University

Cryolithozone of the russian arctic in the “land – shelf” system as an information about disputed issues of the Quaternary history of the region

569

A.A. Shmatkov, A.G. Shmatkov

Marine Geo Service (MG-Service LLC)

New opportunities of remotely operated underwater vehicles for solving engineering-geological survey tasks

577

A.V. Makarov

Deco-Geophysics LLC

Video processing for mapping underwater landscapes

581

O.O. Iakushkin, E.D. Pavlova

Saint Petersburg State University

BioGeoHab LLC

A.K. Lavrova, Ya.E. Terekhina, A.A. Bulanova

Lomonosov Moscow State University, Moscow

E.A. Pen

BioGeoHab LLC

A.Yu. Frikhar, N.V. Shabalin

Lomonosov Moscow State University Marine Research Center LLC

O.S. Sedova

Saint Petersburg State University

Analysis of underwater photo and video surveys using artificial intelligence technologies

588

**ROUND TABLE “ENGINEERING-GEOPHYSICAL STUDIES
ON THE SHELF”**

N.O. Titov

SPLIT LLC

M.Yu. Tokarev

Lomonosov Moscow State University

**Identification of geological hazards by analyzing 3D S-velocity models
obtained by multichannel analysis of surface waves**

593

S.A. Kovachev

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences

**Geodynamic monitoring results at the Yu. Korchagin oil and gas field
(Northern Caspian)**

602

E.A. Biryukov

SPLIT LLC

A.I. Ponimaskin

Deco Geophysics LLC

M.Yu. Tokarev

Lomonosov Moscow State University

**Experience of application of marine three-dimensional high-resolution
and very-high-resolution seismo-acoustic observations when conducting
engineering-geological surveys on water areas**

609

A.S. Pirogova

Lomonosov Moscow State University

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences

P.A. Shchuplov

Lomonosov Moscow State University Seismic Data Analysis Center LLC

M.Yu. Tokarev

Lomonosov Moscow State University

**Inversion of multifrequency 3D seismic data for estimating the elastic
properties of marine soils**

615

N.V. Dubinya

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)

A.S. Pirogova

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences

Lomonosov Moscow State University

M.Yu. Tokarev, P.A. Shchuplov

Lomonosov Moscow State University

S.V. Deliy

Zhenis Operating LLP

**Pseudo-two-dimensional geomechanical models as a tool for preliminary
risk assessment when drilling on the shelf**

621

I.A. Vasilev, D.A. Alekseev

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)

N.V. Dubinya, S.A. Tikhotskiy

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences

V.A. Nachev

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics, Russian Academy of Science

Investigation of the stability of jack-up drilling rigs during seismic impacts 628

SECTION “ARCHAEOLOGICAL RESEARCH AS A PART OF ENGINEERING SURVEYS”

O.E. Vyazkova

Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI)

**Engineering-geological aspects of museumification of architectural
and archaeological monuments of the Novorossiysk District**

634

K.A. Dubrovin

Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI)

**Influence of engineering-geological conditions on the perspectives
of museumification of the rupestrian city of Eski-Kermen
(Republic of Crimea)**

641

V.A. Berkovich, M.G. Gusakov, N.V. Frolov

Archaeological Surveys in Construction LLC

Archaeological excavations on the Soymonovsky Tray in Moscow 648

V.A. Berkovich, M.G. Gusakov, K.A. Egorov, N.V. Frolov

Archaeological Surveys in Construction LLC

**City manor of the XIX century in Khamovniki (based on the results
of archaeological research in 2012)** 657

P.A. Kaznacheev, A.N. Kamshilin, D.A. Ushakov, V.V. Kokh,

D.V. Krayushkin

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences

**Search for hidden voids and weakened zones under bottom of artificial
reservoir using the geoelectric current method: the first results of field
experiment**

671

V.A. Berkovich, A.Yu. Balashov, N.V. Frolov, Yu.A. Likhter

Archaeological Surveys in Construction LLC

Excavations in the territory of historical Ogorodnaya Sloboda in Moscow 679

V.A. Berkovich, A.Yu. Balashov, K.A. Egorov, N.V. Frolov

Archaeological Surveys in Construction LLC

Excavation of Tverskaya-Yamskaya Sloboda at Triumphal Square 689

V.A. Berkovich, A.Yu. Balashov, K.A. Egorov, A.K. Ponomarenko

Archaeological Surveys in Construction LLC

**Archaeological research of the church of the transfiguration
at Preobrazhenskaya Square in Moscow**

700

I.O. Gorlov

Lomonosov Moscow State University Marine Research Center LLC

**Underwater archaeological works as part of engineering surveys on shelf.
Problems and prospects**

715

ADDITIONAL MATERIALS

D.V. Vasin, M.V. Lekhov

Lomonosov Moscow State University

**Unloading of ground water into the Moscow River valley and its influence
on the stability of the Karamyshevskaya Embankment**

722

D.R. Epifanova

RN-BashNIPIneft LLC

Moscow State (National Research) University of Civil Engineering

A.I. Travkin

**Hazardous geological processes on the territory of the projected
development in the southwestern part of Ufa**

739

A.Yu. Frikh-Khar, N.V. Shabalin1

Lomonosov Moscow State University Marine Research Center LLC

Ya.E. Terekhina

Lomonosov Moscow State University

Underwater landscape mapping for marine spatial planning

747

S.N. Nikitin, V.V. Pogrebchenko

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences

I.A. Nikitina, M.S. Nikitin

Lomonosov Moscow State University

**Assessment of local seismic conditions for structures of normal and reduced
liability**

754

СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ»

Кропоткин М.П.^{1,2}, Фоменко И.К.³

¹НИУ МГСУ, Институт гидротехнического и энергетического строительства, кафедра инженерных изысканий и геоэкологии, г. Москва, singeos@yandex.ru

²ООО НПП «Сингеос», г. Москва

³РГГРУ имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), гидрогеологический факультет, кафедра инженерной геологии, г. Москва, ifolga@gmail.com

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ В РФ СЕГОДНЯ – ВНИЗ ПО ЛЕСТНИЦЕ, ИДУЩЕЙ ВВЕРХ

Аннотация. Недостаточный уровень инженерно-геологических изысканий сегодня – результат общего принижения их значимости, недостаточного финансирования, формальной и мелочной регламентации их проведения. Достаточно быстрое развитие методов обработки, математического моделирования и лабораторного оборудования сопровождается тем не менее быстрым ростом доли фальсифицированных отчетов по результатам проведения инженерно-геологических изысканий, которая уже достигла совершенно критической величины. Современная практика экспертизы изысканий фактически не препятствует появлению подобных материалов. Формальный ее характер в большей мере затрудняет утверждение и согласование как раз достоверных материалов. Предложено использовать воздушные инспекции с помощью беспилотных летательных аппаратов и выполнение контрольного бурения, зондирования и т.д. Указан возможный механизм финансирования подобного контроля.

Ключевые слова: инженерно-геологические изыскания; нормативная техническая документация; экспертиза отчетов; контроль и финансирование изысканий.

Инженерно-геологические изыскания в России переживают не лучшие времена. И это связано не только с низким уровнем профессионализма в отрасли. В первую очередь это результат принижения значимости инженерно-геологических изысканий и связанного с этим недофинансирования работ. Непонимание важности функции инженерных изысканий является косвенным свидетельством серьезно деградировавшего уровня и культуры в проектировании и строительстве в целом.

В первую очередь, необходимо коснуться вопросов общей идеологии нормирования инженерно-геологических изысканий в нашей стране. В 1930–1950-х гг. в СССР в условиях огромного количества строек при нехватке высококвалифицированных специалистов необходимо было создать документы, не позволяющие молодым, наспех подготовленным и неопытным инженерам совершать грубые ошибки. В начале 1930-х гг. были созданы Единые нормы строительного проектирования, а в середине 1950-х гг. была разработана система строительных норм и правил (СНиП), которые в дальнейшем подвергались некоторой переработке и совершенствованию. Часть СНиПов продолжает действовать и в настоящее время, другие заменены созданными на их основе

сводами правил (СП). Однако идеология жесткой регламентации инженерно-геологических изысканий в части объемов, методов и т.д. в нашей стране сохранилась по сей день, несмотря на наличие уже большого количества подготовленных специалистов.

За рубежом развивалась своя система документов, регламентирующих, в т.ч. инженерно-геологические изыскания. Она, в частности, представлена определенными стандартами в США и системой Еврокодов в Европейском союзе. Требования Еврокода-7 подразделяются на: «принципы», которых надо придерживаться в обязательном порядке и «правила применения». В целом зарубежная нормативная техническая документация (НТД) отличается от отечественной гораздо большей свободой изыскателя в определении методов исследований, их количества и т.д. при обязательном соблюдении показателей надежности результатов. За рубежом принятой практикой является пожизненная ответственность архитекторов, проектировщиков и изыскателей за безаварийную эксплуатацию построенных с их участием объектов.

Недавно Минстрой России подготовил поправки в федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», которые позволяют разрабатывать проектную документацию на базе зарубежных строительных норм. Применение иностранных НТД необходимо обосновывать хотя бы одним из зафиксированных в них обоснований: результатами исследований, расчетов, испытаний, оценкой риска воздействия вследствие природных или техногенных катастроф и др. В Минстрое России считают, что это позволит оперативно внедрять в отрасли инновационные, энергоэффективные и экологичные технологии. Однако практика совместного и согласованного применения отечественной и зарубежной НТД пока совершенно не ясна.

Существующая в России система НТД в нынешнем виде, как и общий подход экспертизы к оценке отчетов по результатам проведения инженерно-геологических изысканий, не способствуют как развитию инженерной геологии и механики грунтов, так и развитию новых методов исследований.

В первую очередь следует указать на часть принципиальных вопросов, нерешенных или решенных, на взгляд авторов, не совсем верно в нынешней системе НТД в области инженерно-геологических изысканий.

1. В настоящее время сложность инженерно-геологических условий определяется согласно СП 47.13330.2016 [11] и назначается по совокупности различных факторов. Однако, не вполне ясно, относительно чего оценивается сложность инженерно-геологических условий (ИГУ) – проведения строительства или выполнения инженерно-геологических изысканий? При этом, даже для различных видов строительства сложность одних и тех же ИГУ может быть оценена по-разному. Вторым недостатком является то, что факторы ИГУ взаимообуславливают друг друга и их следует рассматривать, как единую систему. Вероятно, категорию сложности ИГУ целесообразнее не назначать по таблице, а рассчитывать, согласно целевому назначению и этапу работ [8].

2. Целесообразно рекомендовать использовать расчетные значения не только для прочностных, но и для деформационных характеристик грунтов. При допуске в пределах инженерно-геологического элемента (ИГЭ) коэффициенте вариации до 0,3, расчетные значения модуля деформации могут существенно отклоняться от нормативных значений и при слабых грунтах влиять на выбор проектных решений. При этом надо иметь в виду, что п. 4.6–5.4 ГОСТ 20522-2012 [1] указывает, что подобное ограничение коэффициента вариации используется только при наличии закономерного изменения характеристик грунтов (то есть для обоснованного проведения границ в этом случае). Если же грунты изменяются в пределах ИГЭ случайным образом, то элемент принимается за окончательный независимо от значений коэффициента вариации характеристик, то есть существует возможность еще более сильного отклонения фактического модуля деформации в той или иной части массива от среднего значения по ИГЭ.

3. Целесообразно ввести отдельные нормы количества лабораторных и полевых испытаний для слабых (малопрочных, сильно деформируемых) грунтов и грунтов с высокими прочностными и деформационными характеристиками. Характеристики именно первых определяют суммарные деформации, крены и устойчивость зданий и сооружений. Для грунтов с высокими характеристиками допустимо снизить нормируемое минимально количество определений механических свойств с 6 до 2–3, допуская широкое использование архивных и литературных данных по характеристикам этих грунтов.

4. В случае, когда техническим заданием предполагается использование ленточных или плитных фундаментов, целесообразно также ввести отдельные требования к определению характеристик в верхней и в нижней частях активной зоны. Именно в верхней, определяющей, части активной зоны должны быть сосредоточены испытания наиболее точными методами (штамповые полевые, лабораторные в стабилометрах и т.д.) и основная часть отбора монолитов и определений механических свойств грунтов.

5. В действующем ГОСТ 20552-2012 [1] и других НТД заложены практически нереализуемые требования по количеству проб для ИГЭ, встречающихся локально или имеющих малую мощность, но при этом способных существенно влиять на проектные решения. Указано лишь на допустимость использования единичных определений для слоев, из которых невозможно отобрать требуемое количество образцов (п. 5.4), то есть речь идет о технической невозможности. Однако, при проведении инженерно-геологических изысканий и обнаружении подобных грунтов, невозможно заранее предсказать, будут ли они встречены в других выработках, и таким образом, опробовать их с той же детальностью, что и грунты других ИГЭ, ведь в настоящее время инженерно-геологические изыскания в нашей стране примерно на 99% объектов выполняются в одну стадию.

Необходимо снизить количественные нормы опробования для этих случаев, т.к. с одной стороны, указание даже приближенных значений их характеристик является более эффективным, чем игнорирование подобных грунтов для соблюдения норм количества опробования, а с другой, недостаточное опробование можно и нужно компенсировать более массовым применением полевых исследований (например, статического зондирования).

6. Необходимо расширить набор методов для определения характеристик насыпных грунтов, которые все шире используются в качестве основания:

а) целесообразно включить в НТД возможность определения их характеристик на основе результатов специальной обработки статического и динамического зондирования (некоторыми организациями накоплен определенный опыт в этой области);

б) узаконить, возможно, с корректировками, использование методики ДальНИИС [5] для получения ориентировочных характеристик насыпных толщ, представляющих собой смесь пылеватых и глинистых разностей природного генезиса с содержанием обломков (более 2 мм) природных скальных и полускальных грунтов 20–70%;

в) узаконить использование характеристик песков соответствующего состава и плотности с небольшими понижающими коэффициентами для насыпных песчаных грунтов, содержащих 90–95% частиц обычного минерального состава.

Определение же свойств насыпного массива по монолитам, как правило, дает совершенно искаженные характеристики, т.к. монолиты почти всегда отбираются из самых сохранных кусков (блоков, глыб) в насыпной толще, в результате полученные «свойства» грунтов насыпного массива оказываются почти идентичными свойствам дочетвертичных грунтов. Штамповые испытания в скважинах (600 см^2) и прессиометром дают более близкие к реальности результаты, но их воздействие охватывает небольшой объем насыпных грунтов, а количество испытаний всегда небольшое. Естественно, при использовании результатов зондирования их необходимо обрабатывать по специальной методике, учитывающей лишь наиболее низкие поинтервальные значения R_d , соответствующие краевым зонам отдельных «обломков» и «кусков» насыпной толщи, участкам их сопряжения и заполнения более слабым, неструктурированным грунтом, которые и определяют в основном прочностные и деформационные свойства насыпного массива.

7. При незакономерных переходах по гранулометрическому составу и консистенции при близких физико-механических свойствах необходимо допустить использование в наименованиях ИГЭ сочетаний «тугопластичные – полутвердые», «мелкие – пылеватые» и т.д. Переходы между подобными разностями зачастую происходят на малых расстояниях в плане и по вертикали, и в этих случаях разделить их границами на картах и разрезах в ходе проведения инженерно-геологических изысканий достоверно не представляется возможным.

Физико-механические же свойства их в подобных случаях близки. Нормы строительных правил должны быть адекватны реальным природным обстановкам, а не наоборот.

8. Значительной проблемой являются расчеты прочностных и деформационных характеристик грунтов по результатам статического зондирования. Статическое зондирование – косвенный метод, а для любого косвенного метода основными вопросами являются – каким образом построены корреляционные зависимости, что и с чем скоррелировано. Стоит ли коррелировать данные статического зондирования, полученные на глубине 30 м, вполне достижимой для современных зондировочных установок, с модулями деформаций, полученными для нагрузки $1\text{--}2\text{ кг/см}^2$? На сегодняшний день отечественная методика, регламентированная НТД, никак не учитывает эти различия в напряженно-деформированном состоянии массива. Кроме того, необходима привязка методики интерпретации данных зондирования к региональным особенностям.

Практически отсутствуют адекватные и нормированные способы расчета характеристик по данным зондирования для супесчаных грунтов. Ввиду того, что формально супеси принадлежат к подгруппе глинистых грунтов, то в большинстве случаев расчет характеристик для них выполняется по формулам для глинистых грунтов. В результате значение удельного сцепления и модуля деформации супесей зачастую получаются неоправданно завышенными.

9. Большой проблемой является определение свойств дочетвертичных отложений, которые сплошь и рядом находятся в активной зоне зданий и сооружений, причем далеко не только уникальных высотных, а также являются средой, в которой выполняется строительство подземных сооружений. Отсутствуют переходные коэффициенты (или иные способы), позволяющие определить физико-механические свойства этих грунтов на основе данных статического или динамического зондирования, компрессионных испытаний (за исключением юрских грунтов), определений физических характеристик. В результате для дочетвертичных грунтов, учитывая требования НТД об обязательном определении свойств двумя методами, изыскатели должны для каждого ИГЭ выполнить серию испытаний штампами или прессиометрами и в дополнение к этому серию лабораторных испытаний в стабилометрах, причем и на сжимаемость, и для определения прочностных характеристик. Отдельные отечественные специалисты выполнили обобщение имеющегося материала и получили соответствующие зависимости [3, 4, 7, 9, 12], которые, однако: во-первых, не узаконены в НТД, во-вторых, разработаны только для отдельных типов грунтов, преимущественно для средне-верхнеюрских и для немногих конкретных регионов, в-третьих, по большей части характеристики имеют обобщающий характер, без разделения по ярусам и свитам, между тем, например, в юрских грунтах свойства грунтов достаточно сильно различаются.

10. Нелепостью действующих НТД являются требования обновления инженерно-геологических изысканий каждые два года во всех ИГУ [11]. Ведь

вполне «узаконенное» использование архивных материалов основано **на неизменности** этих условий, за исключением действия особых факторов: наличия просадочных грунтов, засоленных грунтов, изменения режима многолетнемерзлых грунтов, воздействия инженерно-геологических процессов, значимых изменений уровня подземных вод и некоторых других. На каком основании общий подход к инженерно-геологическим изысканиям для обновления материалов должен быть иным? При обновлении инженерно-геологических изысканий необходимо в первую очередь установить отсутствие или наличие указанных особых факторов на площадке за период между основными периодами изысканий и их обновлением. При их отсутствии объем дополнительных изысканий может быть самым минимальным.

11. Необходим учет различной степени изменчивости и неоднородности грунтовых массивов, состава, состояния и свойств грунтов. Частично решение данной проблемы может быть получено путем внедрения в практику инженерно-геологических исследований и геотехнического моделирования стохастических методов. Однако в настоящее время в России, несмотря на мировые тенденции, господствует детерминированный подход.

12. Явным недостатком является установление единой нормы опробования (6 лабораторных испытаний для определения физико-механических свойств и 10 – для определения физических свойств) независимо от мощности и площади распространения данного ИГЭ. Поскольку для случайного распределения характеристик ограничения по коэффициенту вариации не используются (см. выше), характеристики грунта одного генетического типа, возраста, литологии и консистенции на крупном объекте могут быть определены на основе исследования единичных образцов, отобранных на расстоянии нескольких десятков и даже сотен метров друг от друга, причем невзирая на очень большой разброс значений характеристик.

Важнейшим преимуществом изыскательской отрасли в сравнении со многими другими отраслями является возможность многократного использования огромного массива ранее полученной информации, на пути которого пока существуют значительные административные и юридические барьеры. В некоторых городах на основе архивных материалов в настоящее время созданы комплекты крупномасштабных карт, отражающих основные особенности инженерно-геологических условий. В частности, в г. Москве подобный комплект карт масштаба 1:10 000 создан совместными усилиями ГУП «Мосгоргеотрест», Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН и ООО «НПП «Георесурс»». Однако стоимость получения этих материалов (созданных, между прочим, с использованием государственного финансирования) настолько велика, что использовать их на стадии технико-экономического обоснования, где они, собственно, наиболее эффективны, для мелких и средних объектов практически невозможно. В результате изыскатели, даже в крупном городе, где существует громадный объем ранее выполненных

исследований, на новую площадку порой выходят как «Колумб, открывающий новые земли».

Современные геоинформационные базы данных – это та среда, та основа, которая в нынешних сложных условиях может и должна полностью использоваться изыскателями, позволяя с достаточно небольшими затратами получать большой выигрыш в эффективности. Необходимо резко увеличить доступность накопленной фондовой информации, в полном ее объеме, включая архивные данные о физико-механических свойствах, результатах полевых испытаний, колонки описания скважин. В реализации этого подхода нужно проработать законодательное разделение собственно интеллектуальной собственности (компьютерных программ, методик, конструкторских и оригинальных проектных решений, а также выводов, содержащихся в отчетах и технических заключениях) от различной исходной и технической информации, содержащейся в отчетах и технических заключениях (колонки скважин, все данные по лабораторным испытаниям, зондированию, штамповым испытаниям и т.д.). Для сравнения — топогеодезические материалы никому не приходит в голову считать «интеллектуальной собственностью».

В настоящее время возникла парадоксальная ситуация. С одной стороны, создаются и внедряются, в т.ч. в России, все более сложные модели геомеханического поведения грунтов и соответствующее программное обеспечение. Ряд организаций закупил современное, достаточно совершенное лабораторное оборудование. С другой стороны, наблюдается лавинообразный рост доли фальсифицированных, то есть полностью или почти полностью придуманных отчетов по инженерно-геологическим изысканиям. По некоторым оценкам их доля достигает 80%. Попытки выполнить в некоторых случаях фото- и видеоконтроль проведения полевых работ закономерно дают незначительный результат: современные молодые «специалисты» достаточно хорошо владеют техникой фотошопа и подобными средствами, а просмотр огромного объема видеоматериалов нереален для любой контролирующей стороны. В случае же выявления нарушений, производителям подобных фальсифицированных материалов грозит лишь переделка той или иной скважины и т.д.

Подобная ситуация обусловлена комплексом причин, первой из которых является недостаточное финансирование изысканий.

В настоящее время доля затрат суммарно на все виды изысканий в общей стоимости комплекса «изыскания – проектирование – строительство» в России составляет 0,02–0,20%, что на 1–2 порядка ниже соответствующей величины в странах, имеющих развитую рыночную экономику. Причем даже такой уровень финансирования инженерных изысканий в других странах мира не рассматривается как оптимальный.

Подобная недооценка изысканий в Российской Федерации вызвана, видимо, тремя причинами. Первой из них является слабость и «бессловесность» объединений изыскателей, не способных противостоять диктату правительственных органов, пытающихся за счет изыскателей «уменьшить»

инфляцию (это на фоне колоссальных финансовых вливаний в банковский сектор и т.д.). В министерстве, видимо, не понимают, или не хотят понимать, что подобная экономическая политика создает прямую дорогу к техногенным катастрофам с массовыми жертвами.

Второй причиной является позиция большинства проектных организаций, у которых в результате произошедшего разрыва «экономической цепочки» отсутствует заинтересованность в качестве изыскательской информации. Они, получая фиксированную сумму за проектно-изыскательские работы, и не имея прямой заинтересованности в экономичных (при сохранении надежности) проектных решениях, в определенной степени воспринимают изыскания, как «неизбежное зло, которое надо минимизировать».

Третья причина обусловлена концептуальным разрывом в деятельности проектировщиков и изыскателей, вытекающим из недостатков базового образования и традиционной сложившейся практики. Проектировщики и изыскатели в большинстве не имеют навыков «командной работы», нацеленной на получение наиболее эффективных и выгодных инженерных решений [2].

Из-за разделения отрасли на проектные и изыскательские саморегулируемые организации (СРО) без частичного «перекрытия» разрешаемых допусками видов работ, разрыв между работами изыскателей и проектировщиков только углубился, а не сократился, вопреки мировой тенденции. Ситуация ухудшилась и в сравнении с СССР. Взаимоувязка программ и результатов, выполнение инженерно-геотехнических изысканий, выполнение геомеханических расчетов, развитие инженерного консалтинга инженерно-геологических исследований — все это требует «взаимодиффузии» изыскателей и проектировщиков, как при проектировании нового строительства, так и при реконструкции зданий и сооружений.

Профессиональный инженер-геолог ориентирован на изучение инженерно-геологических массивов, специалист по инженерной экологии – на комплексное изучение антропогенного воздействия на все компоненты окружающей среды: воздух, поверхностные и подземные воды, биоту, почвы, обеспечение благоприятных условий жизнедеятельности людей (по шуму, вибрации, инсоляции, необходимым ландшафтам и т.д.) не только в пятне застройки, но и на прилегающей территории. Инженер-геолог мыслит единицами геологической среды, т.е. геологическими телами и понимает, что каждый массив уникален и ограничивает его логическими пространственными рамками, а не конкретной площадкой сооружения, понимает в определенной степени вероятностный характер каждой отстроенной границы на разрезе и в геотехнической модели, т.к. имеет дело с «нерукотворным» объектом, строение и свойства элементов которого известны лишь в отдельных точках, все же остальное является результатом интерпретации данных на основе исходного генезиса и геологической истории данного массива. К тому же многие характеристики инженерно-геологических массивов изменчивы во времени, особенно при техногенных воздействиях.

Другой очень важной причиной является отсутствие серьезной ответственности за фальсификацию изысканий, а также формализованный характер отечественной базы НТД.

Природу невозможно втиснуть в узкие регламентированные рамки. Изучение ее, пусть и в производственных целях, может быть только исследованием. Производством может быть бурение погонных метров, отбор проб на загрязнение, замеры уровней подземных вод, измерение скоростей речного потока и т.д. Сами же отчеты по инженерно-геологическим, инженерно-экологическим, инженерно-гидрометеорологическим изысканиям – это отчеты о работах по изучению природы, то есть об **исследованиях** (нелепо, соответственно, и словосочетание «технический отчет», как это ныне требуется для отчетов об изысканиях).

Для выявления соответствия проектно-изыскательской продукции обязательным требованиям по обеспечению надежности, экономичности и экологической безопасности проектируемых объектов необходима высококвалифицированная и не формальная экспертиза.

В советский период государственной экспертизе подвергались лишь достаточно крупные и сложные проекты, а в составе экспертных комиссий работали крупнейшие специалисты отрасли. Нынешняя практика экспертизы идет в направлении, прямо противоположном мировому опыту и современным тенденциям развития инженерно-геологических изысканий: внедрение новых методов исследований, самостоятельность изыскателя и геотехника в их проведении и сопутствующая ответственность.

Один из опытейших специалистов, профессор Р.С. Зиангиров, сам занимавшийся в то время экспертизой в ГУП «Мосгоргеотрест», еще в декабрьском номере журнала «Инженерные изыскания» за 2010 г. отмечал: «Проблема, которая очень мешает работать – это некачественная экспертиза результатов изысканий, формальная и непрофессиональная» [6]. К сожалению, на данный момент складывается впечатление, что большинство экспертов озабочены лишь формальной стороной результатов инженерно-геологических изысканий, с мотивацией обезопасить не объект, а себя.

Нынешняя экспертиза все больше сводится к совершенно формальной сверке отчетных материалов изысканий с регламентированным до мелочей их перечнем и описанием. При этом сама достоверность или недостоверность приводимых разрезов, описаний скважин, графиков статического зондирования, результатов лабораторных испытаний и т.д. совершенно не анализируется, в результате легче всего проходят экспертизу полностью или почти полностью «нарисованные» отчеты. В сегодняшних условиях в России, чем лучше и честнее сделаны изыскания, тем труднее им пройти экспертизу. Выхолащиваются сами понятия «экспертиза» и «эксперт».

Подобный подход ведет к целому набору неблагоприятных последствий:

– к отвлечению изыскателей на многократное внесение второстепенных поправок в документацию, совершенно не используемых в проектировании, и

как результат – к снижению возможности специалистов – инженер-геологов вдумчиво выполнять действительно важные действия;

– приучает изыскателей, даже самых ответственных, к «рисованию» недостающих данных по наиболее формальным и нелепым пунктам, т.к. другого способа соблюсти такие нормы зачастую у них нет. Отличить такие данные от реально полученных потом уже не удастся;

– развивает у изыскателей формальный подход к исследованиям.

Фактически в ряде случаев изыскателей, по сути, вынуждают делать дополнительный вариант отчета уже не для проектировщиков, а для «экспертизы», причем совсем не обязательно второй вариант лучше первого.

Какие-либо экзамены (особенно тесты на получение аттестата независимого эксперта) задачу подготовки кадров экспертов не способны решить в принципе, особенно при составе вопросов образца 2015–2017 гг. Подобные экзамены скорее может сдать юрист, а не инженер-геолог (основоположники инженерной геологии вышеупомянутые тесты, кстати, точно бы не сдали!). Экспертизу целесообразно иметь двухуровневой, привлекая для объектов второго уровня (более сложных, ответственных или специфических) ведущих специалистов в данных областях, имеющих значительный (не менее 15–20 лет) и производственный, и научный опыт. Для экспертов первого уровня необходим производственный опыт (не менее 10 лет) и знание основ проектирования (а не только федеральных законов, государственных стандартов в области строительства и сводов правил, с чем у многих экспертов тоже есть проблемы) для оценки возможности и целесообразности тех или иных отступлений от достаточно формальных и обобщенных требований НТД. Как писал Э.Р. Черняк, «экспертиза должна не столько фиксировать формальные отклонения от нормативных требований, сколько указывать, как эти отклонения могут повлиять на снижение качества строительства, его удорожание или, в худшем случае, – на возможность возникновения разрушительных последствий» [10].

В нынешней ситуации первой задачей экспертизы должно быть не выставление списка второстепенных замечаний, а выявление сомнительных отчетов, их реальная проверка (контрольное бурение и т.д.) за счет организации, в отношении которой возникли такие подозрения. В случае подтверждения достоверности результатов представленных изысканий, эти дополнительные затраты изыскательской организации должны быть компенсированы органами экспертизы. В противном случае организация, выпустившая подобный фальсифицированный отчет, должна подвергаться крупному штрафу (в пользу органов экспертизы) и лишаться допуска СРО.

Для контроля реальности проведения полевых работ, возможно использовать периодические «воздушные инспекции» с помощью беспилотных летательных аппаратов. С их помощью можно не только установить факт наличия техники и персонала на точках бурения и проведения полевых опытных работ, но и проконтролировать вид бурения. В тоже время это не требует

достаточно трудоемкой постоянной видеофиксации или присутствия наблюдателей, которое может создавать дискомфорт для сотрудников изыскательской организации.

Список литературы

1. ГОСТ 20522-2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний.
2. Захаров М.С., Лаврушевич А.А., Кропоткин М.П. Правильные люди должны делать правильное дело правильными методами // Инженерные изыскания. 2018. Т. XII. № 5–6. С. 6–19. <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2018-12-5-6-6-19>.
3. Игнатова О.И. Деформационные и прочностные характеристики юрских глинистых грунтов Москвы // Инженерные изыскания. 2009. № 12. С. 36–40.
4. Каширский В.И. Особенности испытаний четвертичных и дочетвертичных дисперсных грунтов полевыми и лабораторными методами // Инженерные изыскания. 2013. № 5. С. 34–43.
5. Методика оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и пылеватых и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями. М.: Стройиздат, 1989. 24 с.
6. Опрос руководителей изыскательских компаний // Инженерные изыскания. 2010. № 12. С. 11.
7. Особенности исследований четвертичных и дочетвертичных дисперсных грунтов в Московской области / В.И. Каширский, С.В. Дмитриев, Е.Н. Знаменский, М.В. Балекин, А.Н. Бизов // Инженерные изыскания. 2012. № 2. С. 24–33.
8. Пендин В.В., Шубина Д.Д. Аспекты оценки сложности инженерно-геологических условий // Геоэкология. 2015. № 1. С. 73–81.
9. Рекомендации по определению значений модуля деформации грунтов по результатам компрессионных испытаний с использованием региональных корректировочных коэффициентов. Томск, 2007. 22 с.
10. Рыхлова С.И., Черняк Э.Р., Каширский В.И. Сколько стоят инженерные изыскания? // Инженерные изыскания. 2010. № 4. С. 10–15.
11. СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96*».
12. Труфанов А.Н. Разработка новых таблиц переходных коэффициентов от результатов компрессионных испытаний к нормативному значению модуля деформации // Инженерные изыскания. 2019. Т. XIII. № 1. С. 18–30. <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2019-13-1-18-30>.

M.P. Kropotkin^{1,2}, I.K. Fomenko³

¹Moscow State (National Research) University of Civil Engineering, Moscow, singeos@yandex.ru

²Singeos LLC, Moscow

³Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI), Moscow, ifolga@gmail.com

ENGINEERING-GEOLOGICAL SURVEYS IN THE RUSSIAN FEDERATION TODAY – DOWN THE LADDER GOING UP

Abstract. The insufficient level of engineering-geological surveys today is the result of a general detraction of their importance, insufficient funding, formal and petty regulation of their conduct. The fairly rapid development of processing methods, mathematical modeling and laboratory equipment is accompanied by a rapid increase in the proportion of falsified survey reports, which has already reached a completely critical value. The modern practice of expertise of surveys does not actually prevent the emergence of such materials. Its formal nature makes it more difficult to approve and agree on just reliable materials. It is proposed to use aerial inspections using unmanned aerial vehicles and perform control drilling, sounding, etc. A possible mechanism for financing such control is indicated.

Key words: engineering-geological surveys; regulatory documentation; report expertise; survey control and financing.

Мирный А.Ю.

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии,
г. Москва, MirnyyAY@mail.ru

ОШИБКИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯ

Аннотация. В работе приведены примеры ошибок, совершенных при проведении инженерно-геологических изысканий по различным причинам. Показано, что данные ошибки могут быть разделены на группы в зависимости от первоначальных причин: некомпетентности исполнителя, его недобросовестности, несовершенства нормативных технических документов (НТД). Ситуация в целом указывает на сбой в системе регулирования инженерных изысканий и проектной деятельности. Решением ситуации мог бы послужить переход к персональному лицензированию специалистов или, наоборот, к более строгому контролю за соблюдением требований НТД.

Ключевые слова: нормативные технические документы; инженерно-геологические изыскания; правила производства работ; техническое задание; контроль качества.

Практическая деятельность в области геотехнического консультирования позволяет сформулировать несколько категорий ошибок при проведении инженерно-геологических изысканий, приводящих к неверному прогнозу напряженно-деформированного состояния основания, удорожанию проекта и необходимости применения дорогостоящих технологий. Данные ошибки возникают вследствие различных причин: некомпетентности организации-исполнителя работ и организации-заказчика; недобросовестности исполнителя; несовершенства нормативных технических документов (НТД).

Наиболее распространенная категория ошибок связана с неверным составлением технического задания и программы работ, содержание которых не соответствует СП 47.13330.2016 [3]. В результате в итоговом отчете недостаточно данных для выполнения необходимых расчетов, что приводит к ошибочным проектным решениям.

В качестве примера можно привести следующий объект. Переход строящейся четырехполосной автомобильной дороги через пойму реки осуществлялся путем устройства насыпи высотой 12 м. После выполнения всего объема земляных работ организация-заказчик обнаружила, что время условной стабилизации основания значительно превышает допустимые сроки строительства. Технологические меры ускорения стабилизации основания насыпи, сложенного аллювиальными отложениями (устройство вертикальных дрен), после отсыпки насыпи малоэффективны, т.к. дрены можно расположить только по внешнему периметру конструкции, а максимальные поровые давления формируются под осью насыпи. По итогам дополнительных лабораторных испытаний были определены коэффициенты консолидации, позволившие выполнить прогноз развития осадок, представленный на рис. 1. Ошибка в данном

случае совершена как заказчиком, который не учел возможной длительности развития осадки, так и изыскателем, не отразившим это в программе работ.

Рис. 1. Сопоставление расчета с результатами мониторинга

Вторая категория ошибок связана с «добросовестным заблуждением» или, проще говоря, некомпетентностью участников процесса. Изыскательской организацией были выполнены работы на площадке строящихся жилых домов в объеме, соответствующем требованиям СП 446.132580.2019 [4]. В тексте отчета по результатам проведения инженерно-геологических изысканий было указано на наличие в основании древнего склона, перекрытого делювиальными отложениями, и указано, что слой простирается вне пятна застройки на значительное расстояние (более 200 м). Но проектная организация это обстоятельство не учла, и выполнила расчетную геометрическую модель в полном соответствии с представленным разрезом (рис. 2). В результате было получено заниженное расчетное значение крена. Фактический крен, возникший при возведении сооружения, превысил допустимые значения, что потребовало дорогостоящей цементации делювиальных отложений в основании сооружения.

Третья категория ошибок относится к случаям намеренного нарушения требований НТД. Такая «необходимость» возникает в связи с нарушением сроков, ошибками начального определения стоимости или сознательного ее занижения. Подобные случаи встречаются очень часто, достаточно привести один пример.

В основании объекта повышенного уровня ответственности (КС-3) в отчете по результатам проведения инженерно-геологических изысканий были выделены два инженерно-геологических элемента, представленных песчаными

грунтами. Параметры физико-механических свойств данных грунтов определялись исключительно по корреляционным уравнениям для статического зондирования, что с точки зрения СП 22.13330.2016 [2] является прямым нарушением требования использовать методы непосредственного определения параметров. Проектная организация планировала применение при расчете нелинейной модели Hardening Soil, для чего потребовалось определение параметров данной модели. Для предварительного расчета параметры были приняты по известным эмпирическим зависимостям.

Рис. 2. Сопоставление разреза и геометрической модели с выделением области ошибочного построения

Параллельно с целью выполнения требований НТД изыскательской организацией выполнялись штамповые испытания в скважинах. В ходе верификации (сопоставления результатов моделирования тестовой задачи с непосредственным экспериментом [1, 2]) обнаружилось, во-первых, полное совпадение результатов двух штамповых опытов, а во-вторых, очень близкое совпадение между этими опытами и моделированием на основании параметров, определенных по результатам статического зондирования (рис. 3). Очевидно, что результаты штамповых испытаний были сфабрикованы с целью подтвердить уже имевшиеся в отчете параметры жесткости.

Последняя категория ошибок – несовершенство нормативной базы. Отсутствующие или неясно изложенные требования нормативных документов приводят к различным ошибкам при выполнении полевых, лабораторных и камеральных работ, а также на предварительных этапах. Важной причиной является неэффективность, а иногда даже полное отсутствие общественного обсуждения и согласования содержания «проектных» и «изыскательских» НТД.

В результате возникающих разночтений снижается общее качество работ, а их объем, наоборот, растет.

Рис. 3. Сопоставление результатов расчета с результатом штамповых испытаний

Представленные примеры позволяют выявить основную причину подобных ошибок: сбой регуляторной функции в отрасли. Либо необходимо иметь идеально согласованную систему НТД, выполнение которой строго контролируется (практика показывает, что обеспечение этого невозможно); либо необходимо, наоборот, вводить персональное лицензирование специалистов и переводить все НТД в категорию рекомендательных – но такое кардинальное изменение системы может привести к тяжелому переходному периоду. В настоящий момент времени отрасль находится в промежуточном положении, что приводит в итоге к снижению качества работ, надежности и безопасности сооружений.

Список литературы

1. ГОСТ Р 54257-2010 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования.
2. СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*» с изменениями № 2 от 24.01.2019.
3. СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96*».
4. СП 446.1325800.2018 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.

A.Yu. Mirnyy

Lomonosov Moscow State University, Moscow, MirnyyAY@mail.ru

ERRORS DURING ENGINEERING-GEOLOGICAL SURVEYS AND THEIR CONSEQUENCES

Abstract. The paper provides examples of errors committed during engineering-geological surveys for various reasons. It is shown that these errors can be divided into groups depending on the initial reasons: incompetence of the performer, dishonesty of the performer, imperfections of regulatory technical documents. The situation as a whole indicates failures in the system of regulation of engineering surveys and project activities. The solution to the situation could be a transition to personal licensing of specialists, or, conversely, to stricter control over compliance with the requirements of regulatory documents.

Key words: regulatory documents; engineering-geological surveys; rules of work; requirement specification; quality control.

Королев М.В.

Институт прикладной механики РАН, г. Москва, m-korolev2009@yandex.ru

К ВОПРОСУ О ПЕРСПЕКТИВАХ РАЗВИТИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Аннотация. Рассматриваются вопросы определения перспективных направлений совершенствования геомеханических испытаний с точки зрения новых вызовов и задач строительства. На основе системного подхода определяются требования к инновационным разработкам.

Ключевые слова: системные инновации; геомеханические исследования; актуальные вызовы; приоритетные направления; перспективы развития геомеханики.

По мере становления геомеханики перспективы и приоритеты развития и геомеханических исследований, в зависимости от этапов становления этой науки и от возникающих новых строительных задач, оценивались разными экспертами и специалистами в разное время по-разному.

Еще относительно недавно одним из главных направлений считалось совершенствование способов и приборов, позволяющих создать однородное напряженно деформируемое состояние в испытываемом образце, соответствующее реальному напряженно-деформированному состоянию в основании существующего сооружения. Таким образом, основной задачей являлось повышение точности испытаний.

В то же время, такие крупные ученые, как проф. Н.А. Цытович и проф. С.С. Вялов, считали также перспективным развивать не только точные, но и приближенные методы и методики испытаний, которые технически было просто осуществить на практике (метод шарового штампа Н.А. Цытовича, метод динамометрического испытания С.С. Вялова), то есть ускоренные приближенные экспресс-методы, которые обладали бы высокой технологичностью и существенно сокращали трудоемкость, стоимость и время испытаний.

Позднее одним из приоритетов стал считаться вопрос об автоматизации процесса экспериментов. Перспективным направлением развития считалось стремление к оснащению приборов устройствами для автоматической регистрации и обработки результатов измерений, что должно было способствовать повышению точности испытаний за счет исключения ошибок наблюдателей и повышению технологичности экспериментов.

На разных этапах отмечались так же тенденции по повышению информативности геомеханических экспериментов за счет оснащения приборов и установок дополнительными измерительными и вспомогательными устройствами, датчиками и др., позволяющими в ходе основного эксперимента определить дополнительные параметры. Актуальным являлось стремление к созданию multifunctional установок и приборов.

Например, в 1982 г. проф. М.Н. Гольдштейн в статье, посвященной совершенствованию методов определения механических свойств грунтов, высказал следующее пожелание: «Для испытаний на прочность необходимо оснастить лаборатории приборами, позволяющими реализовать необходимые натурные граничные условия и проектные траектории загрузки и деформирования, от которых в значительной мере зависят результаты испытаний. Лаборатории должны располагать не только приборами для осесимметричного трехосного сжатия (стабилометрами), но и для плоского и чистого сдвига, для испытания на неограниченный кольцевой сдвиг с получением надежного значения установившейся прочности, на сдвиг при кручении, что очень важно при тонкослоистом строении грунта. Все эти приборы должны быть снабжены аппаратурой для измерения порового давления, для автоматического программированного нагружения и регистрации напряжений и деформаций. Кроме того, необходимо располагать семейством каждого вида приборов с различными типоразмерами...». Иными словами, проф. М.Н. Гольдштейн основные приоритеты развития геомеханики определил, как необходимость повышения точности, информативности испытаний и их автоматизацию [1].

В настоящее время, в связи с развитием компьютерных технологий и развитием расчетных программ наблюдается устойчивая тенденция по использованию более сложных моделей грунта, для определения параметров которых разрабатываются более сложные методики испытаний. Эту тенденцию тоже можно охарактеризовать, как стремление к повышению точности и достоверности экспериментов и как попытку объединить испытания грунтов и геомеханические расчеты в единую систему. Однако получение параметров сложных моделей грунта в ходе экспериментов встречает у изыскателей определенные проблемы. Кроме того, определение механических характеристик сложных моделей грунта требует использования дорогостоящего оборудования и удорожает проведение исследований и увеличивает время их проведения. К тому же, учитывая, что грунтовый массив обладает значительной естественной неоднородностью, и что испытания проводятся в отдельных точках, а объем исследуемых образцов на порядки меньше объема грунта, подвергающегося воздействиям от сооружения – трудно оценить, насколько реально повышается точность испытаний при усложнении моделей.

Многие исследователи, в т.ч. и зарубежные, видят перспективу в развитии полевых методов испытаний в натурных условиях, т.к. образец грунта при отборе и транспортировке в лабораторию подвергается разгрузке и теряет свои первоначальные свойства. Однако проведение полевых исследований значительно более трудоемко и затратно.

В последние годы наблюдается стремление к отказу от методов, связанных с трудоемкими подготовительными работами, к повышению технологичности полевых и лабораторных экспериментов, к более массовому использованию геофизических методов (сейсмо- и электроразведка, георадарные технологии и др.),

широкому применению таких экспресс методов, как статическое зондирование, замене механических испытаний расчетными и экспресс-методами.

Например, проф. Г.Г. Болдырев в [2] считает, что через некоторое время следует отказаться от инженерно-геологических исследований в том виде, в котором они проводятся в настоящее время, и видит большую перспективу в развитии геофизических исследований, в частности на основе измерения скорости прохождения электромагнитных волн в грунтовом массиве.

В работах Б.И. Кулачкина с соавторами [10, 11] подчеркивается необходимость организации комплексных инженерно-геологических изысканий и геотехнических испытаний не только непосредственно оснований сооружений, но и более крупных объектов - геомассивов с учетом природных и техногенных условий и более полного мониторинга. Такой подход, вероятно, связан с тем, что в связи с утяжелением сооружений (ростом этажности, устройством глубокой подземной части), плотностью застройки, значительными техногенными нагрузками и изменением, в следствие этого, свойств массива грунта, влияние строительных объектов распространяется на существенно большую часть массива. Естественно, такое требование приведет к резкому увеличению объема геомеханических исследований, что потребует развития более технологичных видов испытаний.

Следует отметить, что определение будущих основных направлений развития науки и техники, в т.ч. в области геомеханики, представляет собой достаточно сложную задачу. Единственной принятой методикой является определение тенденций развития по анализу изобретательской активности, которая применялась в советское время при проведении патентных исследований. Однако, данная методика позволяет оценить перспективные направления науки весьма условно. Таким образом, к настоящему времени не разработана общая методология по определению перспективных направлений развития геомеханики и инновации в этой сфере не осуществляются системно и целенаправленно, в соответствии с выявленными приоритетами.

В монографии М.В. Королева [6] и статьях А.Н. Власова и М.В. Королева [3–5] для оценки перспективных направлений инноваций в области геомеханических исследований использовался подход, при котором геомеханика рассматривалась как система, эволюция которой осуществляется в соответствии с общими известными законами эволюции технических систем (закон стремления системы к «идеальности»; закон S-образности развития системы; закон «динамизации»; закон полноты частей системы; закон опережающего развития рабочего органа; закон перехода «моно-би-поли»; закон перехода с макроуровня на микроуровень). Законы развития технических систем впервые были сформулированы Г.С. Альтшуллером (1979) и далее развиты в трудах А.А. Гусакова (1983), Е.П. Балашева (1985), А.И. Половинкина (1985, 1988), Б.Л. Злобина и А.И. Зусмана (1989), Ю.П. Салматова (1991, 1996), Н.П. Абовского (1998) и многих других.

Знание основных законов развития систем позволяет определить перспективные направления исследований в этой области в зависимости от

текущего состояния системы и стадии ее развития, понять естественное направление их эволюции, осуществлять управляемую эволюцию элементов системы, т.е. производить целенаправленные усовершенствования, целесообразные и возможные на данном этапе.

Как показывает анализ, история становления геомеханики, появление новых методов и способов геомеханических испытаний тесно связано с появлением новых вызовов и новых задач, возникающих в сфере строительства. Резюмируя, можно сказать, что особенно бурно и целенаправленно новые методы и направления развиваются только тогда, когда старыми известными методами возникающие новые задачи решить невозможно.

Для того чтобы разработать систему базисных принципов в области дальнейшего целенаправленного совершенствования геомеханических испытаний на данном этапе (т.е. рассмотреть и уточнить вопросы методологии инноваций) целесообразно сначала рассмотреть новые актуальные проблемы глобальные вызовы, и вопросы не могут быть решены в объеме известных методов геомеханических исследований. Это поможет определить требования к будущим разработкам в этой области, а эти требования, в свою очередь, помогут уточнить и дополнить совокупность общих подходов и систему базисных принципов (то есть методологию) к инновациям в этой сфере.

К числу таких новых вызовов для РФ на данном этапе, как минимум, можно отнести следующие:

– ***Деградация мерзлоты и изменение температуры многолетнемерзлых грунтов из-за потепления климата в Северном полушарии.*** С учетом того, что 63% территории РФ находится в криолитозоне, а 75% зданий и сооружений построено по принципу сохранения мерзлого состояния грунтов и с учетом того, что мерзлые грунты, обладающие реологическими свойствами, весьма сложны в изучении, сохранение построенных и строительство новых сооружений представляет новую и сложную задачу, решить которую существующими методами невозможно. При применении известных способов и методик испытаний потребуется огромный объем длительных, дорогостоящих и сложных экспериментов. Следовательно, требуется разработка принципиально новых способов и методик, позволяющих существенно снизить время и стоимость испытаний и дающих возможность, желательно в ходе одного опыта, с достаточной для практических целей точностью, определять параметры механических свойств мерзлых грунтов и несущую способность свай при различных значениях отрицательных температур и в процессе оттаивания [7].

– ***Стремительное изменение инженерно-геологических условий в крупных мегаполисах в результате техногенных воздействий на протяжении срока существования построенных сооружений.*** Россия относится к странам с высоким уровнем урбанизации, который продолжает увеличиваться. Сегодня в городское население составляет 80%. За 2013–2019 гг. доля городского населения в общей численности населения России выросла на 0,6%, что связано с «сельско-городскими» миграциями. Особенно стремительно

растут самые крупные мегаполисы, такие как Москва и Санкт-Петербург. Рост мегаполисов порождает множество проблем и приводит к огромному сосредоточенному воздействию на природную среду. Стремительное изменение инженерно-геологических условий в крупных мегаполисах в результате техногенных воздействий на протяжении срока существования построенных сооружений (карст, суффозия, активизация оползней, подтопление территории, загрязнение грунтов оснований и др.) и взаимное влияние сооружений так же вызывает необходимость прогнозировать эти процессы, что неизбежно приведет к резкому увеличению объема геомеханических исследований [9]. Если учесть, что проведение инженерно-геологических изысканий и геомеханических испытаний в мегаполисах осложняется плотностью застройки и большим количеством инженерных коммуникаций, требуется разработка легких мобильных установок, позволяющих производить комплексные геомеханические исследования в стесненных условиях (например, из подвалов домов) с использованием высокоэффективных и информативных методов и методик.

– ***Рост водопотребления, уменьшение запасов пресной воды на суше из-за климатических изменений и необходимость сохранения качества воды в водохранилищах.*** Согласно каталогу, на территории СССР в 1989 г. находилось 41 крупнейшее, 64 крупных, 210 средних и 1906 малых водохранилищ. Общая протяженность береговых линий водохранилищ в РФ составляет 75,4 тыс. км. Переработка берегов водохранилищ вызывает накопление аккумулятивной зоны, обмеление водоемов и ухудшение качества воды. Помимо медленной переработки берегов, вызываю большую опасность составляют крупные оползни, которые часто происходят по берегам рек и водохранилищ. Для мониторинга состояния берегов водохранилищ, разработке эффективных мер по их стабилизации требуется проведение большого объема геомеханических исследований. Учитывая огромную протяженность береговой линии водохранилищ, труднодоступность мест для проведения изысканий так же требуется разработка эффективных мобильных комплексов, позволяющих быстро и с наименьшими затратами определить весь комплекс механических характеристик, используемых в геотехнических расчетах [8].

Кроме этого, для определения перспектив развития геомеханических исследований необходимо учитывать состояние и тенденции развития всей геотехники, геотехнологий и фундаментостроения (новые возможности технологичного устройства фундаментов, укрепления грунтов оснований, новые свойства строительные материалов, машин и механизмов). С совершенствованием геотехнологий по улучшению строительных свойств грунтов, разработкой новых эффективных конструкций фундаментов и с накоплением информации о механических свойствах разных типов грунтов требования к точности геомеханических испытаний, вероятно, будут снижаться. Пояснение представлено на примере (рис.).

Рис. Зависимость стоимости испытаний (1), стоимости сооружения (2) и их суммарной стоимости (3) от точности испытаний: а – для сооружения, стоимость которого значительно зависит от точности определения характеристик; б – для сооружения, стоимость которого мало зависит от точности испытаний

Как известно, стоимость сооружения (кривая 2 на рис.) зависит от достоверности инженерно-геологических изысканий и, соответственно, точности определения механических характеристик грунтов основания. С увеличением точности стоимость сооружения уменьшается за счет уменьшения неоправданных запасов. С другой стороны, при увеличении точности геомеханических испытаний возрастает их стоимость (кривая 1 на рис.). Суммарная же стоимость геомеханических исследований и сооружения (кривая 3 на рис.) будет иметь минимум в определенной точке, которая соответствует не максимальной, а оптимальной точности при минимуме общих затрат. Если стоимость сооружения существенно зависит от точности геомеханических испытаний (рис. а), то оптимальная точность должна быть высокой, если нет (рис. б), то и оптимальная точность испытаний может быть невысокой. То есть, при высокотехнологичном производстве геотехнических работ, нет необходимости однозначно стремиться к экономически неоправданному повышению точности испытаний.

В лаборатории геомеханики Института прикладной механики РАН на основе вышеописанного системного подхода к инновациям в последние годы были разработаны и продолжают создаваться новые перспективные и высокоэффективные способы, методики и оборудование для проведения геомеханических исследований, обладающие высокой информативностью, которые позволяют частично решить вышеуказанные задачи [6–9, 12]. Представляется целесообразным продолжить исследования в данном направлении.

Список литературы

1. Болдырев Г.Г. Методы определения свойств грунтов. Состояние вопроса. Пенза: ПГУАС, 2008. С. 5.
2. Болдырев Г.Г. Будущая механика грунтов, какая она // Независимый электронный журнал «Геоинфо». 2018. [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://www.geoinfo.ru/product/boldyrev-gennadij-grigorevich/budushchaya-mekhanika-gruntov-kakaya-ona-38141.shtml>. (дата обращения: 26.11.2021).
3. Власов А.Н., Королев М.В. Перспективы развития геомеханики как системы // Сборник трудов 7-й Всероссийской конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред». М.: ИПРИМ РАН, 2017. С. 330–333.
4. Королев М.В. О совершенствовании классификации методов геомеханических испытаний // Сборник трудов 7-й Всероссийской конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского «Механика композиционных материалов и конструкций сложных и гетерогенных сред». М.: ИПРИМ РАН, 2017. С. 340–342.
5. Королев М.В. Системные инновации в геомеханике // Материалы докладов Общероссийской научно-практической конференции «Современные полевые и лабораторные методы исследования грунтов – изыскания и проектирование». М.: Геомаркетинг, 2018. С. 22–42.
6. Королев М.В. Системные инновации в методах исследования механических свойств грунтов. М.: Сам Полиграфист, 2018. 376 с.
7. Королев М.В., Власов А.Н., Куцевич О.И., Королев П.М. Многофункциональный мобильный комплекс для экспресс-определения механических свойств грунтов // Сборник трудов I совместной научно-практической конференции ЦЭИИС и ИПРИМ РАН «Обеспечение качества строительства в городе Москве на основе современных достижений науки и техники». М.: Сам Полиграфист, 2019. С. 48–65.
8. Королев М.В., Власов А.Н., Остякова А.В., Лупанова И.А. Угличское водохранилище. Переработка берегов. Мониторинг. Геомеханические исследования. М., 2017. 249 с.
9. Королев М.В., Куцевич О.И. Развитие способа определения механических характеристик грунтов шаровым штампом // Сборник трудов I совместной научно-практической конференции ЦЭИИС и ИПРИМ РАН «Обеспечение качества строительства в городе Москве на основе современных достижений науки и техники». М.: Сам Полиграфист, 2019. С. 161–170.
10. Кулачкин Б.И., Митькин А.А., Магомедов С.С. Состояние и перспективы геотехники и механики грунтов // Вестник ПНИИПУ. Строительство и архитектура. Т. 8. № 1. С. 32–52.

11. Кулачкин Б.И., Радкевич А.И., Александровский Ю.В., Остюков Б.С. Фундаментальные и прикладные вопросы в геотехнике. М., 1999. 151 с.
12. Примеры и причины аварий сооружений. Вопросы оценки и обеспечения качества строительных объектов, надежной работы оснований и фундаментов в условиях меняющихся природных и техногенных воздействий / М.В. Королев, В.Н. Егоров, А.Н. Власов, В.В. Знаменский, О.И. Куцевич, А.Е. Икрамова. М.: Сам Полиграфист, 2020. 215 с.

M.V. Korolev

Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, m-korolev2009@yandex.ru

TO THE QUESTION OF THE PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF GEOMECHANICAL TESTS

Abstract. The issues of determining promising areas for improving geomechanical testing from the point of view of new challenges and tasks of construction are considered. On the basis of a systematic approach, the requirements for innovative developments are determined.

Key words: system innovations; geomechanical research; current challenges; priority areas; prospects for the development of geomechanics.

Дивеев А.А.^{1,2}, Болдырев Г.Г.²

¹Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Инженерно-строительный институт,
кафедра геотехники и дорожного строительства, г. Пенза

²ООО «НПП “Геотек”», г. Пенза, info@npp-geotek.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

Аннотация. Рассмотрены вопросы построения трехмерных цифровых инженерно-геологической и геотехнической моделей. Предлагается при проведении инженерно-геологических и геотехнических исследований использовать GBIM (geotechnical building information modelling) – трехмерную цифровую информационную модель с набором компонент, характеризующих стратиграфию, физико-механические свойства грунтов в основании строительного объекта.

Ключевые слова: 3D инженерно-геологическая модель; 3D цифровая геотехническая модель; процедура построения цифровых моделей.

Информационное моделирование предполагает совместный способ работы по созданию и использованию информационной модели как цифрового двойника (цифровое представление физических и функциональных характеристик) реального физического объекта на различных стадиях его жизненного цикла. Технологии информационного моделирования предполагают использование насыщенных информацией трехмерных моделей объектов и среду общих данных для эффективного доступа и обмена информацией между всеми участниками инвестиционно-строительного проекта. На рынке BIM представлены продукты различных компаний, например, Autodesk, Tekla, Graphisoft, Revit и других, однако, информация из инженерно-геологических изысканий вводится в них вручную из «бумажных» отчетов. Как правило, эти отчеты представляются заказчику в форматах DOC или PDF, а не в цифровом виде, что естественно требует дополнительного времени на их обработку.

Данные, достаточные для построения цифровой геологической модели можно получить из гидрогеологических исследований, инженерно-геодезических и инженерно-геологических изысканий. Результатом инженерно-геодезических изысканий является цифровая модель рельефа местности. Инженерно-геологические изыскания дают набор данных для построения цифровой инженерно-геологической модели (ЦИГМ). Эти данные могут быть получены из лабораторных и полевых испытаний грунтов с использованием различных приборов и устройств. Обычно они входят в состав информационно-измерительных систем.

Применительно к задачам геотехники предлагается использовать GBIM (geotechnical building information modelling) – трехмерную цифровую информационную модель с набором компонент, характеризующих стратиграфию, физико-механические свойства грунтов в основании строительного объекта. GBIM содержит информацию, необходимую для

проектирования оснований зданий и сооружений и является одной из информационных моделей, составляющих BIM (building information modelling) объекта строительства [1, 2].

В настоящий момент ООО «НПП «Геотек»» реализовывает комплексную технологию (Geotek BIM) инженерно-геологических изысканий, включающую не только определение физико-механических характеристик грунтов, но и одновременный расчет оснований фундаментов аналитическими и численными методами (рис. 1). Поскольку информация от лабораторных приборов и полевых испытаний поступает в цифровом виде непрерывно, то все операции выполняются в режиме реального времени, что существенно сокращает сроки инженерно-геологических изысканий и принятия решения о варианте фундамента.

Рис. 1. Структура Geotek BIM

Рекомендуемая процедура изысканий включает следующую последовательность работ. До начала инженерно-геологических изысканий необходимо иметь ситуационный план площадки или трассы изысканий, назначить требуемое количество выработок и точек полевых испытаний, задать тип фундамента, его размеры, глубину заложения и нагрузки, выбрать способ бурения скважин и отбора монолитов грунта, метод полевых исследований. Часть из этих операций следует выполнить, используя цифровую модель рельефа местности. Модель рельефа можно как загрузить в форматах LandXML, DXF, используя известные программы (Civil 3D, ArchiCAD, Credo Топоплан) так и сгенерировать в Geotek Field, опираясь на высотные отметки выработок.

В качестве примера рассмотрено построение ЦИГМ, используя метод статического зондирования [3]. Важно отметить то, что процедура построения ЦИГМ включает использование и других известных методов лабораторных и полевых испытаний грунтов, например, динамическое зондирование, испытания штампами, прессиометром, вращательным срезом, компрессионное сжатие, трехосное сжатие и др.

Статическое зондирование или СРТ методы имеют преимущество перед другими в том, что данные измерений в цифровом формате непрерывно поступают на пульт оператора (буровика) в режиме реального времени. По мере проведения измерений данные отправляются в «цифровое облако» и хранятся в базе полевого компьютера. Скорость считывания параметров зондирования составляет миллисекунды, и они могут быть записаны с любым интервалом по глубине. Обычно рекомендуются интервалы 10–20 см. Подобная плотность измерений позволяет использовать статистические методы обработки данных измерений, что в итоге повышает точность и надежность исследований.

Физические и механические характеристики грунтов определяются с использованием корреляционных уравнений, связывающих параметры зондирования с той или иной характеристикой грунта. Эти уравнения получены для различных типов грунтов и приведены в нормативных технических документах, а также в многочисленной отечественной и зарубежной литературе [3–6]. Приведенные уравнения относятся к глобальным зависимостям, которые получены для грунтов различного типа и генезиса и могут быть рекомендованы только в качестве оценочных значений характеристик.

После того, как определены тип и характеристики грунтов в исследуемом массиве можно построить цифровой инженерно-геологический разрез по выбранному направлению на ситуационном плане. В результате можно получить двумерное поле распределения выбранной характеристики грунта (рис. 3) или типа грунта (инженерно-геологический элемент).

Рис. 3. Цифровой инженерно-геологический разрез

Далее, используя трехмерную сетку, например, значения типа грунта или характеристики грунта в элементах сетки, можно построить трехмерную цифровую инженерно-геологическую модель (рис. 4).

Рис. 4. Цифровая инженерно-геологическая модель: а – фрагмент/сечение 3D-модели основания здания; б – 3D-модель склона

Цифровая геотехническая модель (ЦГМ) строится на основе цифровой инженерно-геологической модели. Различие заключается лишь в том, что для построения ЦГМ необходимо «врезать» в ЦИГМ конструкцию фундамента или здания совместно с фундаментом, конструкцию тоннеля, конструкцию ограждения стен котлована и др. На рис. 4 показаны разрез 3D ЦИГМ, а на рис. 5 – 3D ЦГМ с выработками и конструкцией плитного фундамента.

Рис. 5. Цифровая геотехническая модель основания здания

3D цифровая геологическая модель для последующего использования в 3D программах Civil 3D, Revit, Allplan и др. может быть экспортирована в формате IFC4.

Заключение

Разрабатываемая цифровая информационная система является расширяемой в части используемых методов лабораторных и полевых испытаний грунтов и методов расчета оснований по предельным состояниям.

Основным преимуществом предлагаемой цифровой технологии инженерно-геологических изысканий, является то, что она включает не только построение 3D ЦИГМ и 3D ЦГМ, но и хранение физико-механических характеристик грунтов в цифровом виде. Поскольку информация от лабораторных приборов и полевых испытаний поступает в цифровом виде непрерывно, то все операции выполняются в режиме реального времени, что существенно сокращает сроки инженерно-геологических изысканий.

Список литературы

1. Болдырев Г.Г., Идрисов И.Х., Редин А.В., Дивеев А.А. BIM геотехника и перспективы ее развития в Российской Федерации // Геотехника. 2020. Т. XII. № 4. С. 6–22.
2. Информационные системы в геотехнике – 3D геотехника / Г.Г. Болдырев, В.А. Барвашов, В.И. Шейнин, В.И. Каширский, И.Х. Идрисов, А.А. Дивеев // Геотехника. 2019. Т. XI. № 2. С. 6–27.
3. Рыжков И.Б., Исаев О.Н. Статическое зондирование грунтов. М.: АСВ, 2016. 497 с.
4. Kulhawy F.H., Mayne P.W. Manual on estimating soil properties for foundation design: report EPRI-EL 6800. Palo Alto, CA, USA: Electric Power Research Institute, 1990. 306 p.
5. Lunne T., Robertson P.K., Powell J.J.M. Cone penetration testing in geotechnical practice. Abingdon, UK: E and FN Spon, 1997. 312 p.
6. Robertson P.K., Cabal K.L. Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering, 6th edition. Signal Hill, California: Gregg Drilling and Testing, 2015. 143 p.

A.A. Diveev^{1,2}, G.G. Boldyrev²

¹Penza State University of Architecture and Construction, Penza

²Scientific Production Enterprise Geotek LLC, Penza, info@npp-geotek.ru

USE OF INFORMATION TECHNOLOGIES IN ENGINEERING-GEOLOGICAL SURVEYS

Abstract. The issues of constructing three-dimensional digital engineering-geological and geotechnical models are considered. It is proposed to use GBIM (geotechnical building information modeling). It is a three-dimensional digital information model with a set of components characterizing stratigraphy, physical and mechanical properties of soils at the base of a construction object when carrying out geotechnical and geotechnical studies.

Key words: 3D engineering-geological model; 3D digital geotechnical model; digital modeling procedure.

Матвеев В.В.^{1,2}, Шанина В.В.²

¹Geotechnical Graduate Lab, г. Москва, v.matveev@geogradlab.ru

²МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, г. Москва

МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ ГРУНТОВ

Аннотация. Рассмотрены способы получения и интерпретации некоторых параметров модели поведения грунта с двойным упрочнением. Предложен улучшенный способ получения степенного показателя m , представлены преимущества использования способа опытных величин при обработке параметров прочности. Даны рекомендации для выбора интервалов и вариантов представления модуля разгрузки E_{ur} . Также приведены способы статистической обработки частных значений и их совокупностей, используя ГОСТ 20522-2012 «Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний».

Ключевые слова: параметры моделей; секущий модуль; модуль при разгрузке; одометрический модуль; переуплотнение.

Введение

В настоящее время вопрос определения параметров нелинейных моделей поведения грунтов весьма актуален. Существующие разночтения и возникающие сложности при статистической обработке данных параметров грунтов влияют на точность моделирования, а, следовательно, принятие проектных решений.

Основным руководящим документом, регламентирующим статистическую обработку испытаний грунтов, является ГОСТ 20522-2012 [4]. Методы статистической обработки включают получение результатов из частных определений: среднее арифметическое по формуле 2; метод наименьших квадратов (МНК) (уравнения вида $y = kx + b$) формулы 9 и 10; МНК с константой, равной нулю (уравнения вида $y = kx$) формула 11 [4].

Прочностные параметры

Угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c определяются методом трехосного сжатия по ГОСТ 12248.3-2020 [2] и методом одноплоскостного среза по ГОСТ 12248.2-2020 [1]. Однако, в СТО 36554501-067-2021 [11] не допускается проводить испытания методом одноплоскостного среза для моделей, учитывающих дилатансию, ввиду ненадежности получаемых этим методом углов дилатансии. Однако причина, по которой не стоит использовать результаты, полученные методом одноплоскостного среза, не только в этом, поскольку углы дилатансии можно также получить при обработке трехосных испытаний на деформируемость. В работе [17] показано, что метод испытания оказывает влияние на получаемые параметры прочности. Также интерпретация испытаний методом одноплоскостного среза затруднена ввиду того, что

поверхность среза зафиксирована конструктивно, а в процессе испытания происходит поворот осей главных напряжений [15]. В конечном счете, калибровка параметров моделей проводится именно по трехосным испытаниям, а не по срезам.

В соответствии с [4] для статистической обработки параметров прочности можно использовать два способа: а) по совокупности опытных величин (рис. 1, а); б) по частным значениям угла внутреннего трения φ и удельного сцепления c (рис. 1, б). Способ расчета по совокупности опытных величин предпочтительнее, ввиду отсутствия необходимости испытывать серию образцов на одном монолите, а, следовательно, снижаются требования к размерам монолита. Также этот метод более бережный по отношению к опытным значениям, т.к. отбраковка осуществляется по отдельным опытам, а не сразу всей серии опытов. Таким образом, сокращается неоправданный расход материала образцов и время выполнения опытов.

Рис. 1. Способы статистической обработки прочностных параметров: а – по совокупности опытных величин, б – по частным значениям

Деформационные параметры

Опорное давление p^{ref} и опорные значения модулей деформации являются виртуальными и не несут физического смысла [12], подобно тому, как удельное сцепление не показывает действительное сопротивление сдвигу при отсутствии нормального напряжения, а является параметром зависимости, которая аппроксимирует предельную огибающую.

Опорное давление для трехосных испытаний принимается как боковое, а для компрессионных – как вертикальное. Следовательно, бессмысленно выбирать в качестве опорного давления какое-то конкретное значение, например, эффективное бытовое давление. Рекомендуется использовать этот параметр со значением по умолчанию 100 кПа. Использование единого опорного давления для всех инженерно-геологических элементов помогает проще

проводить сопоставительный анализ опорных значений модулей деформации с архивными или региональными значениями [12].

Чтобы достоверно охарактеризовать всю толщу, монолиты следует отбирать по всей мощности слоя, а испытания на деформируемость проводить при бытовом давлении, соответствующем глубине отбора образцов. Увязка полученных значений проводится их совместной обработкой.

Проводить испытания непосредственно при опорном давлении p^{ref} не требуется, а, следовательно, отбирать монолиты только с кровли инженерно-геологического элемента (ИГЭ) и принимать за опорное давление бытовое давление кровли не имеет смысла.

Степенной показатель m . Данный показатель определяет характер зависимости напряжений и деформаций. Этот параметр участвует в описании зависимостей модулей деформации от опорных модулей и напряжений. Однако, из-за того, что эта зависимость для одометрического и секущего модуля отличается, то рекомендуется определять степенной показатель как для одометрических касательных модулей m_{oed} , так и для секущих модулей m_{50} [11]. Проектировщик выбирает показатель m_{oed} или m_{50} исходя из решаемой задачи [10, 11]. Эти параметры определяются совместно с соответствующими опорными модулями.

Секущий модуль деформации E_{50} . Частные значения секущего модуля деформации E_{50} в ГОСТ 12248.3-2020 [2] вычисляются по формуле 9.20: $E_{50} = \frac{q_{max}}{2\varepsilon_1}$, где q_{max} – максимальный девиатор напряжений при разрушении образца в конкретном опыте. Однако, в [7, 20, 21] рекомендуется использовать уже статистически обработанные для всей совокупности значения φ и c , а модуль вычислять по формуле $E_{50} = \frac{q_f}{2\varepsilon_1}$, где $q_f = \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} (\sigma_3 + c \operatorname{ctg} \varphi)$.

Для статистической обработки совокупности, полученные частные значения E_{50} наносятся на билигарифмическую координатную плоскость, где $x = \ln \frac{\sigma_3 + c \operatorname{ctg} \varphi}{p^{ref} + c \operatorname{ctg} \varphi}$ и $y = \ln E_{50}$ (рис. 2, а). Опорный секущий модуль E_{50}^{ref} и показатель m_{50} могут быть найдены методом наименьших квадратов, для этого используются формулы 9 и 10 [4], в которых значения $\operatorname{tg} \varphi$, c , τ , σ следует заменить на m_{50} , $\ln(E_{50}^{ref})$, x , y [11, 16]. Далее следует стандартная процедура статистической проверки для исключения возможных ошибок согласно пп. 7.7 и 7.8 [4], проведя соответствующие замены значений.

Иногда, например, при небольшой мощности ИГЭ зависимость секущего модуля E_{50} от бокового давления может обладать слабой корреляцией, а показатель m_{50} может получиться даже отрицательным. В таком случае полученные значения E_{50} следует обработать по пп. 6.2 и 6.3, получив осредненное значение $\overline{E_{50}}$ и $\overline{\sigma_3}$. Показатель m можно определить по процедуре, описанной ниже. Выборка секущих модулей расширяется за счет трехосных испытаний, проведенных для определения прочности, при этом потребуется нормирование секущих модулей по $\overline{E_{50}}$, чтобы зафиксировать полученное

осредненное значение (рис. 2, б). Обработка осуществляется методом наименьших квадратов с нулевой константой, то есть по формуле 11 [4], в которой значения $\text{tg}\varphi$, τ , σ следует заменить на m_{50} , $\ln \frac{\sigma_3 + c \text{ctg} \varphi}{\bar{\sigma}_3 + c \text{ctg} \varphi}$, $\ln \frac{E_{50}}{\bar{E}_{50}}$, со стандартной процедурой отбраковки. Для вычисления E_{50}^{ref} можно воспользоваться обратной формулой $E_{50}^{ref} = \bar{E}_{50} \left(\frac{p^{ref} + c \text{ctg} \varphi}{\bar{\sigma}_3 + c \text{ctg} \varphi} \right)^{m_{oed50}}$.

Рис. 2. Статистическая обработка E_{50} и m_{50} : а – стандартная, б – расширенная

Модуль деформации при разгрузке и повторном нагружении E_{ur} зависит от положения петли разгрузки. Чем ближе петля к максимальному девиатору, тем она больше, а значение E_{ur} меньше [13].

С одной стороны, интервал разгрузки должен наиболее достоверно характеризовать работу грунта при разгрузке. Но с другой стороны, не всегда такие данные есть на этапе проведения лабораторных исследований. Поэтому, в целях унификации, в [2] предложен единый метод выбора интервала в зависимости от разновидности грунта и вертикального бытового давления. В случае необходимости оценить максимальную деформацию при разгрузке, петлю разгрузки следует начинать как можно ближе к предполагаемому максимальному значению девиатора (рис. 3, а).

Для повышения точности определения E_{ur} рекомендуется проводить несколько петель разгрузки и повторного нагружения на одном интервале, чтобы их либо обработать совместно, либо выбрать наиболее репрезентативную петлю [19]. При составлении схемы испытания можно предусмотреть несколько петель разгрузки и повторного нагружения, например, часть петель запланировать по ГОСТ 12248.3-2020 [2], часть в соответствии с предполагаемой разгрузкой при выемке котлована, еще часть так, чтобы разгрузка начиналась незадолго до достижения пиковой прочности. В отчете рекомендуется привести значения для различных интервалов, чтобы проектировщик мог выбрать их, исходя из решаемой задачи.

Рис. 3. Модуль деформации при разгрузке E_{ur} : а – минимальный E_{ur} , б – модуль E_{ur} по ГОСТ 12248.3-2020 [2]

Следует отметить, что в [10] упоминается о возможном влиянии разгрузки на характер нагружения. Как следствие, такие испытания в некоторых случаях могут быть непригодны для получения параметров прочности, коэффициента разрушения и даже секущего модуля.

Частные значения модуля деформации повторного нагружения E_{ur} в [2] вычисляются по формуле 9.21, но для повышения точности рекомендуется частные значения E_{ur} определять методом наименьших квадратов по совокупности *всех точек* в заданном интервале петли [16].

Иногда интервал настолько мал, что дискретизация измерительных датчиков не позволяет достоверно определить модуль в заданном интервале. Чтобы преодолеть технические ограничения, можно взять секущие на начальном участке разгрузки или начальном участке повторного нагружения с более крупных петель и только в их диапазоне обработать точки МНК (рис. 3, б).

Статистическая обработка совокупности и процедура отбраковки проводятся аналогично обработке секущего модуля деформации E_{50} . В результате будет получен опорный модуль E_{ur}^{ref} .

Частные значения коэффициента поперечной деформации ν_{ur} определяются в том же диапазоне, что и E_{ur} [2]. Для повышения точности рекомендуется определять ν_{ur} методом МНК. Ввиду того, что в модели значение ν_{ur} принимается постоянным, и не зависящим от напряженно-деформированного состояния (НДС) [20], то статистическая обработка осуществляется в соответствии с пп. 6.2 и 6.3 [4].

Одометрический касательный модуль деформации E_{oed} определяется в условиях невозможности бокового расширения. Такие условия соблюдаются в компрессионных приборах, а также в трехосных, в режиме K_0 -консолидации.

Для компрессионных испытаний не рекомендуется использовать стандартную схему испытаний по п. 8.2 ГОСТ 12248.4-2020 [3], поскольку это приводит к искаженным результатам [14]. Следует воспользоваться

примечанием к пп. 8.1 и 8.2 [3] и провести испытание в более бережном режиме. При статическом режиме нагружения испытание необходимо начинать с небольших ступеней, при этом коэффициент приращения нагрузки $LIR = \Delta\sigma/\sigma$ должен быть постоянным и иметь небольшую величину. Также, для водонасыщенных грунтов можно порекомендовать кинематический режим нагружения с контролем порового давления [9].

Следует отметить, для глинистых грунтов E_{oed} определяется на участке нормального уплотнения и, следовательно, не может быть определен для давлений меньше бытовых σ_{zg} (рис. 4, а), а для переуплотненных грунтов – меньше напряжения предуплотнения σ_p (рис. 4, б).

Рис. 4. Выбор участка для определения модуля E_{oed} : а – песчаные и нормально уплотненные грунты, б – переуплотненные грунты

Проведение касательной графическим способом подвержено влиянию субъективных факторов. Для более точной оценки E_{oed} компрессионную кривую рекомендуется аппроксимировать аналитической кривой, причем для глинистых грунтов только на участке нормального уплотнения.

Статистическая обработка совокупности и процедура отбраковки проводятся аналогично обработке секущего модуля деформации E_{50} . В результате будет получен опорный модуль E_{oed}^{ref} и показатель m_{oed} .

Коэффициент разрушения R_f . Для описания кривой нагружения при трехосном сжатии в модели упрочняющегося грунта используется гиперболическая зависимость. Асимптотой в этой зависимости является асимптотический девиатор q_a . Коэффициент разрушения R_f определяется как отношение асимптотического девиатора к девиатору разрушения: $R_f = q_a/q_f$.

Частное значение параметра R_f может быть найдено графически на плоскости $\varepsilon_1 - \varepsilon_1(q/q_f)^{-1}$ [8, 16, 19]. При этом экспериментальные точки, соответствующие начальному упругому участку (при изотропной консолидации), участку разупрочнения (после достижения пиковой прочности),

а также петлям разгрузки и повторного нагружения должны быть исключены (рис. 5). Угол наклона прямой соответствует значению R_f .

Рис. 5. Коэффициент разрушения R_f

Аналитически параметр R_f находится методом МНК по формулам 9 и 10 [4], где значения s , σ , τ следует заменить R_f , $(\varepsilon_1)^{-1}$, $(q/q_f)^{-1}$. Использовать для аналитической обработки зависимость $\varepsilon_1 - \varepsilon_1 (q/q_f)^{-1}$ не совсем корректно, поскольку в таком случае переменные не являются независимыми. Статистическая обработка частных показателей и их возможная отбраковка осуществляется в соответствии с пп. 6.2 и 6.3 [4].

Параметры переуплотнения

К параметрам переуплотнения относятся: напряжение предуплотнения σ_p , напряжение переуплотнения POR , коэффициент переуплотнения OCR . Эти параметры определяются для глинистых грунтов.

Напряжение предуплотнения σ_p . Частные значения могут быть получены как из компрессионных, так и из трехосных испытаний по траектории K_0 . По ГОСТ Р 58326-2018 [5] напряжение предуплотнения σ_p должно быть проинтерпретировано графическими методами Казагранде и Беккера. Ввиду высокого разброса получаемых значений, вследствие влияния субъективных факторов при интерпретации, более достоверную оценку можно дать при одновременном использовании нескольких методов, в т.ч. более точных, например, билогарифмических или использующих разгрузку [18, 22].

Напряжение предуплотнения σ_p зависит от эффективного бытового давления, поэтому совместная обработка совокупности его значений обычно не проводится, но эти значения необходимы для обработки параметров OCR и POR .

Напряжение переуплотнения POR (рис. 6, а). Для статистической обработки вычисляются частные значения $POR = \sigma_p - \sigma_{zg}$ для каждого образца, дальнейшую обработку и возможную отбраковку следует проводить в соответствии с пп. 6.2 и 6.3 [4].

Рис. 6. Параметры переуплотнения: а – напряжение переуплотнения POP , б – коэффициент переуплотнения OCR , в – построения для обработки OCR

Как показывают исследования [6, 12], использование POP для описания начального НДС предпочтительно, особенно для ИГЭ, имеющих значительную мощность.

Коэффициент переуплотнения OCR (рис. 6, б). Для статистической обработки на координатной плоскости по одной оси откладывается эффективное бытовое давление σ_{zg} , определенное в соответствии с [5], по другой – напряжение предуплотнения σ_p . Угол наклона прямой, выходящей из начала координат, соответствует OCR (рис. 6, в). Аналитическая обработка осуществляется МНК с нулевой константой, то есть по формуле 11 [4], где значения $\tan \varphi$, τ , σ следует заменить OCR , σ_p , σ_{zg} .

Заключение

Статистическая обработка параметров нелинейных моделей грунтов не требует особых методов, достаточно тех, которые уже есть в ГОСТ 20522-2012 [4]. В то же время правильное применение этих методов позволяет с одной стороны получить достоверные результаты, а с другой оптимизацию расходов на выполнение дорогостоящих испытаний.

Список литературы

1. ГОСТ 12248.1-2020 Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза.
2. ГОСТ 12248.3-2020 Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия.
3. ГОСТ 12248.4-2020 Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия.
4. ГОСТ 20522-2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний.

5. ГОСТ Р 58326-2018 Грунты. Методы лабораторного определения параметров переуплотнения.
6. Мельников Р.В., Порошин О.С. Отличие использования параметров OCR и ROP при деформировании переуплотненного грунта под нагрузкой в программе PLAXIS // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2015. № 3. С. 87–91.
7. Мирный А.Ю., Тер-Мартirosян А.З. Области применения современных механических моделей грунтов // Геотехника. 2017. № 1. С. 20–26.
8. Мирный А.Ю. Методика интерпретации результатов трехосных испытаний с использованием гиперболической модели деформирования // Материалы Пятнадцатой Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». М.: Геомаркетинг, 2019. С. 74–77.
9. Проект ГОСТ Р Грунты. Метод компрессионного сжатия с заданной скоростью деформации. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://npp-geotek.com/upload/iblock/53d/53dbed3631469b973876255bc7b6f31f.pdf> (дата обращения: 26.11.2021).
10. Сигута Ю.В. Определение параметров для модели Hardening Soil. Практика // Независимый электронный журнал «Геоинфо». [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.geoinfo.ru/products-pdf/opredelenie-parametrov-dlya-modeli-hardening-soil-praktika.pdf (дата обращения: 26.11.2021).
11. СТО 36554501-067-2021 Лабораторное определение параметров моделей нелинейного механического поведения грунтов с объемным и двойным упрочнением.
12. Федоренко Е.В., Пеньков Д.В. К вопросу получения исходных данных для модели грунта Hardening Soil // Грунтоведение. 2020. № 2(15). С. 19–29.
13. Bershov A.V., Mirny A.Y., Usov A.N. Determination of the unloading modulus of deformation in dispersive soils and its accounting in designing // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2020. Vol. 57. No 1. <https://doi.org/10.1007/s11204-020-09630-x>.
14. Crawford C.B. Interpretation of the consolidation test // Journal of Soil Mechanics and Foundations Division. 1964. No. 90(5). P. 87–102.
15. Holtz R.D., Kovacs W.D. An introduction to geotechnical engineering. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1981. 732 p.
16. Kell C. SIGMA/W material model series: Hardening Soil Model». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.seequent.com/sigma-w-material-model-series-hardening-soil-model/> (дата обращения: 22.11.2021).
17. Kulhawy F.H., Mayne P.W. Manual on estimating soil properties for foundation design: report EPRI-EL 6800. Palo Alto, CA, USA: Electric Power Research Institute, 1990. 306 p.

18. Matveev V.V., Shanina V.V. The influence of subjective factors on the accuracy of graphical constructions to interpret the preconsolidation pressure in IL-tests // Proceedings of 3rd European regional Conference of IAEG. Athens: National Group of Greece of IAEG, 2021. Vol. 2. P. 10–17.
19. Parrock A.L., Strydom J.S., Rieger V.J. Why stabilise? Using triaxial tests for determining pavement stiffness and shear strength parameters of mechanically modified layers // Journal of the South African Institution of Civil Engineers. 2008. No. 50. P. 2–12.
20. PLAXIS CONNECT edition V21.01. Material models manual. Exton, PA, USA: Bentley, 2021. 274 p.
21. Stress-strain modeling with GeoStudio 2021. Calgary, Alberta, Canada: GEOSLOPE International, 2021. 124 p.
22. Umar M., Sadrekarimi A. Accuracy of determining pre-consolidation pressure from laboratory tests // Canadian Geotechnical Journal. 2016. Vol. 54. No. 3. P. 441–450. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0203>.

V.V. Matveev^{1,2}, V.V. Shanina²

¹Geotechnical Graduate Lab, Moscow, v.matveev@geogradlab.ru

²Lomonosov Moscow State University, Moscow

METHODS OF STATISTICAL TREATMENT OF SOIL NON-LINEAR MODELS' PARAMETERS

Abstract. The methods of obtaining and interpreting some parameters of the behavior model of soil with double hardening are considered. An improved method for obtaining a power exponent m is proposed, the advantages of using the method of experimental quantities when processing strength parameters are presented. Recommendations are given for the selection of intervals and options for the presentation of the unloading module E_{ur} . The methods of statistical processing of particular values and their aggregates using GOST 20522-2012 “Soils. Methods for statistical processing of test results” are also given.

Key words: model parameters; secant modulus; unloading-reloading modulus; oedometer modulus; overconsolidation.

Болдырев Г.Г., Ачилов И.Ш.

ООО «НПП “Геотек”», г. Пенза, info@npp-geotek.ru

ИСПЫТАНИЯ ГРУНТОВ МЕТОДОМ ВРАЩАТЕЛЬНОГО СРЕЗА

Аннотация. В публикации рассмотрена методика определения модуля сдвига и недренированной прочности из испытаний вращательным срезом. Приведены конструкция устройства вращательного среза и результаты испытаний в песке. Показана возможность определения максимального значения модуля сдвига и его деградация с ростом деформации сдвига в процессе вращательного среза. Выполнено сравнение значений модуля сдвига из испытаний в условиях трехосного сжатия и вращательного среза.

Ключевые слова: вращательный срез; модуль сдвига; деградация модуля сдвига; недренированная прочность; трехосное сжатие.

Испытания методом вращательного среза согласно ГОСТ 20276-2012 [1] проводятся на глинистых, органо-минеральных и органических грунтах, в т.ч. с крупнообломочными включениями (2–10 мм в количестве не более 15% по массе), из которых сложно отобрать монолиты, для нахождения следующих характеристик:

1) сопротивления грунта срезу τ_{max} :

$$\tau_{max} = \frac{M_{max} - M_0}{B}, \quad (1)$$

где B – постоянная крыльчатки, м³; M_{max} – максимальный измеренный крутящий момент, кН·м; M_0 – крутящий момент на преодоление трения штанг крыльчатки по грунту, кН·м.

2) сопротивления грунта недренированному сдвигу $c_u = \tau_{max}$.

Для проведения испытаний в полевых условиях существуют различные установки вращательного среза, в состав которых входят: крыльчатки различных размеров со штангами; устройства для создания и измерения крутящего момента; устройство для вдавливания крыльчатки в грунт [4, 5].

Одним из направлений развития устройств вращательного среза для испытаний в полевых условиях является автоматизация процесса измерений и определение дополнительных к ГОСТ 20276-2012 [1] характеристик грунтов.

В ООО «НПП “Геотек”» разработано опытное устройство вращательного среза (рис. 1), которое представляет собой силовой механизм, состоящий из электропривода для создания крутящего момента, датчиков для измерения крутящего момента и осевой нагрузки. К силовому механизму крепятся крыльчатки различных размеров, а сам он устанавливается на буровую установку через оголовник и набор полых штанг.

Рис. 1. Устройство вращательного среза ООО «НПП «Геотек»»: 1 – четырехлопастные крыльчатки; 2 – оголовник для крепления устройства на буровую установку; 3 – силовой механизм с измерительными датчиками и электроприводом; 4 – набор штанг

Данным устройством измеряются и контролируются: скорость поворота крыльчатки, °/с; осевая нагрузка, Н; угол поворота крыльчатки, °; крутящий момент, Н·м.

Главная конструктивная особенность данного устройства – это создание и измерение крутящего момента на более близком расстоянии к точке проведения испытания, непосредственно в забое скважины или в массиве грунта.

Как правило, испытания методом вращательного среза проводятся с целью определения максимального и остаточного значений недренированной прочности [1, 2]. Однако методом вращательного среза возможно нахождение и деформационных характеристик, в виде модуля сдвига, а через него и линейного модуля деформации [3]:

а) мобилизованный секущий модуль сдвига G , кПа:

$$G = \frac{H \cdot M}{\pi \cdot R^4 \cdot \varphi}, \quad (1)$$

где M – измеренный крутящий момент, кН·м; φ – угол поворота, рад; R – радиус крыльчатки, м; H – высота крыльчатки, м.

б) линейный модуль деформации E , кПа:

$$E = 2 \cdot G \cdot (1 + \nu), \quad (2)$$

где G – модуль сдвига, кПа; ν – коэффициент Пуассона.

в) сопротивление недренированному сдвигу c_u (для прямоугольной крыльчатки при $H/D = 2$), кПа:

$$c_u = \frac{6 \cdot M}{7 \cdot \pi \cdot D^3}, \quad (3)$$

где M – максимальный крутящий момент, кН·м; D – диаметр крыльчатки, м.

г) сопротивление грунта срезу τ , кПа:

$$\tau = \frac{M}{B}, \quad (6)$$

где M – измеренный крутящий момент, кН·м; B – постоянная крыльчатки, принимаемая в зависимости от типа крыльчатки, м³.

$$B = \frac{\pi \cdot D^2}{2} \cdot \left(H + \frac{D}{3} \right) \quad (7)$$

д) силы трения на боковой поверхности крыльчатки при ее вертикальном погружении в грунт f_s , кПа:

$$f_s = \frac{N}{A_s} \quad (8)$$

где N – осевая нагрузка, кН; A_s – площадь боковой поверхности крыльчатки, м².

е) коэффициент чувствительности S_t :

$$S_t = \frac{c_u}{c_{u.rest}} \quad (9)$$

где $c_{u.rest}$ – остаточное значение недренированной прочности, кПа (при установившемся значении крутящего момента M_{rest}).

С целью отработки конструкции устройства вращательного среза проведены испытания на стенде, конструкция которого показана на рис. 2. Стенд состоит из опорной рамы с траверсами, емкости для грунта с нагрузочным диском, двух гидравлических домкратов, на одном из которых располагается тензодатчик сжатия мембранного типа.

В опытах в качестве аналогового грунта использовался песок средней крупности (табл. 1). Опыты проводились в цилиндрической рабочей камере, в которой вокруг крыльчатки формировался массив песка.

Рис. 2. Устройство вращательного среза на испытательном стенде

Таблица 1

Физические характеристики песка

Наименование параметра	Значение
Влажность, %	1,69
Плотность ρ , г/см ³	1,45
Плотность частиц ρ_s , г/см ³	2,71
Коэффициент пористости e	0,9
Удельный вес γ , кН/м ³	14,22

Домкратами моделировалась пригрузка в 3,55 и 7,1 кН, что при пересчете на площадь поперечного сечения рабочей камеры (0,071 м²) соответствует начальному напряженному состоянию в массиве песка 50 и 100 кПа, соответственно. Срез песка проводился со скоростью вращения крыльчатки 1°/с.

Используя данные испытаний, построены зависимости крутящего момента M от угла поворота φ крыльчатки при различных значениях пригрузки. На данных графиках выделены точки максимального ($C1$, $C2$) и установившегося ($D1$, $D2$) значения крутящего момента (рис. 3).

Рис. 3. Зависимость крутящего момента M от угла поворота φ крыльчатки

С использованием измеренных значений крутящего момента M и угла φ поворота крыльчатки определены зависимости:

- 1) сопротивления недренированному сдвигу c_u от угла поворота φ крыльчатки при различных начальных напряженных состояниях грунта (рис. 4);
- 2) секущего модуля сдвига G от угла поворота φ крыльчатки при различных начальных напряженных состояниях грунта (рис. 5).

Рис. 4. Зависимость сопротивления недренированному сдвигу c_u от угла поворота φ крыльчатки

Рис. 5. Зависимость секущего модуля сдвига G от угла поворота φ крыльчатки

На кривых сопротивления недренированному сдвигу показаны точки, по соответствующие максимальному значению сопротивления недренированному сдвигу ($C1$, $C2$) и мобилизованные значения сопротивления недренированному сдвигу при различных углах поворота крыльчатки, то есть при различной деформации сдвига.

На кривых секущего модуля сдвига выделены несколько характерных точек: $A1$, $A2$ – начальные точки испытаний; $B1$, $B2$ – точки максимального значения модуля сдвига (начального модуля сдвига G_0); $C1$, $C2$ – точки максимального крутящего момента; $D1$, $D2$ – точки установившегося крутящего момента.

На промежутках между точками $A1$, 2 и $B1$, 2 графиков виден рост модуля сдвига, обусловленный ростом крутящего момента при малых изменениях угла поворота, и заканчивающийся установлением модуля сдвига при максимальном значении, после которого начинается его деградация. При этом максимальное значение модуля сдвига не соответствует максимальному значению крутящего момента.

На графиках можно увидеть тенденцию смещения точек ($B1$, $B2$) максимального значения модуля сдвига в сторону меньших углов поворота (деформаций) при росте пригрузки от собственного веса грунта, то есть при уменьшении коэффициента пористости e .

С целью сравнения значений модуля сдвига были выполнены испытания песка в условиях трехосного сжатия. При этом всестороннее давления в камере прибора принималось равным 50 и 100 кПа.

По результатам данных испытаний определены следующие деформационные характеристики грунта:

1) модуль деформации E , МПа (рис. 6):

$$E = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_1} \quad , \quad (10)$$

где $\Delta\sigma_1$ – приращение вертикального напряжения в заданном диапазоне, МПа;
 $\Delta\varepsilon_1$ – приращение относительной вертикальной деформации образца, д.ед.;

2) коэффициент Пуассона ν :

$$\nu = \frac{\Delta\varepsilon_3}{\Delta\varepsilon_1} = \frac{\Delta\varepsilon_v + \Delta\varepsilon_1}{2 \cdot \Delta\varepsilon_1} \quad , \quad (11)$$

где $\Delta\varepsilon_3$ – приращение относительной поперечной деформации образца, д.ед.;
 $\Delta\varepsilon_v$ – приращение относительной объемной деформации образца, д.ед.;

3) модуль сдвига G , МПа:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad . \quad (12)$$

Рис. 6. Зависимости между вертикальным напряжением и вертикальной деформацией

Полученные характеристики грунта представлены в табл. 2.

Найденные в ходе испытаний методом трехосного сжатия значения модуля сдвига сопоставлены с модулями сдвига, найденными методом вращательного среза (рис. 7). Результаты лабораторных испытаний показывают, что значения модулей сдвига, полученные методом вращательного среза, близки к трехосному сжатию.

Таблица 2

Результаты испытаний методом трехосного сжатия

№	Давление в камере σ_3 , МПа	Вертикальное напряжение σ_1 , МПа	Модуль деформации E , МПа	Коэффициент Пуассона ν (поперечной деформации)	Модуль сдвига G , МПа
1	0,052	0,263	17	0,33	6,5
2	0,102	0,519	36	0,32	14

Рис. 7. Корреляция результатов испытаний методом трехосного сжатия с исследованиями методом вращательного среза

Заключение

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- 1) методом вращательного среза возможно определение не только прочностных, но и деформационных характеристик грунта;
- 2) значения модуля сдвига зависят от начального напряженного состояния и плотности песка;
- 3) выявлена деградация модуля сдвига с ростом угла поворота крыльчатки при пригрузке 50 кПа от 6,45 до 0,05 МПа (коэффициент деградации модуля сдвига $K_G = G_{max}/G_{rest} = 129$), а при пригрузке 100 кПа от 13,79 до 0,17 МПа ($K_G = 81$);
- 4) максимальное значение модуля сдвига не соответствует максимальному значению крутящего момента;
- 5) результаты испытаний методом трехосного сжатия показали хорошее совпадение с вращательным срезом. Это дает возможность предполагать, что определяемые в полевых условиях деформационные характеристики грунта

методом вращательного среза могут приравняться к результатам лабораторных испытаний. Однако для подтверждения данного вывода требуется проведение серии испытаний с различными дисперсными грунтами и при различных начальных напряженных состояниях.

б) конструкция устройства позволяет проводить автоматизированные испытания методом вращательного с момента задавливания в грунт буровой установкой;

7) испытания устройства подтвердили его функциональные возможности.

Список литературы

1. ГОСТ 20276-2012 Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости.
2. ASTM D2573 Standard test method for field vane shear test in cohesive soil.
3. Biscontin G., Pestana J.M. Influence of peripheral velocity on undrained shear strength and deformability characteristics of a bentonite-kaolinite mixture. Geotechnical engineering report No. UCB/GT/99-19. Berkeley, CA, USA: Department of Civil and Environmental Engineering, University of California 1999. 25 p.
4. ISO 22476-9 Geotechnical investigation and testing – field testing. Part 9: field vane test.
5. Recommended standard for field vane shear test: report 2:93E. Linköping, Sweden: SGF, 1993.

G.G. Boldyrev, I.Sh. Achilov

Scientific Production Enterprise Geotek LLC, Penza, info@npp-geotek.ru

VANE SHEAR TEST OF SOILS

Abstract. It is discussed the methodology for determining the shear modulus and undrained strength from vane shear tests. The design of the vane shear device and the results of tests in sand are presented. The possibility of determining the maximum value of the shear modulus and its degradation with an increase in shear deformation in the process of vane shear is shown. A comparison is made of the shear modulus values from triaxial compression and vane shear tests.

Key words: vane shear; shear modulus; degradation of the shear modulus; undrained strength; triaxial compression.

Болдырев Г.Г., Костяев А.Е.

ООО «НПП “Геотек”», г. Пенза, info@npp-geotek.ru

ИСПЫТАНИЯ ГРУНТОВ МЕТОДОМ КОМБИНИРОВАННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Аннотация. В публикации приведены результаты исследований деформационных свойств грунтов методом бурового и статического зондирования. Показаны корреляционные зависимости между параметрами зондирования и компрессионным модулем деформации.

Ключевые слова: буровое зондирование; статическое зондирование; корреляционные зависимости; модуль деформации.

В настоящее время в практике инженерно-геологических изысканий наиболее часто применяется исследование свойств грунтов методом статического зондирования (СРТ). Данный метод прошел испытание временем и совместно с лабораторными методами позволяет проводить количественную оценку множества физико-механических характеристик грунтов [5, 11–14]. Однако данный метод имеет свои ограничения при исследовании свойств песчаных и многолетнемерзлых грунтов. В зависимости от усилия, необходимого для вдавливания зонда в прочные грунты (в т.ч. мерзлые), необходимо применять установки с большой собственной массой или использовать опорно-анкерное устройство.

В то же время метод бурового зондирования [2, 3, 9, 10] позволяет проводить исследования с подобной категорией грунтов практически с любой стандартной буровой установкой, не оборудованной прессом для задавливания зонда. Последнее обстоятельство снижает стоимость буровой установки, что является немаловажным для организаций, выполняющие инженерно-геологические изыскания.

Метод статического зондирования используется в практике изысканий не менее 70 лет и за это время накоплен как положительный опыт его использования, так и получены многочисленные корреляционные зависимости между параметрами статического зондирования (лобовое сопротивление, силы трения, поровое давление) и свойствами грунтов [5, 9, 10–12]. Метод бурового зондирования является относительно новым и поэтому подобные корреляционные уравнения отсутствуют. Однако, если использовать измеренные параметры статического зондирования и измеренные параметры бурового зондирования (крутящий момент, осевая нагрузка) в рассматриваемой точке исследуемого массива грунта, то можно получить корреляции между статическим и буровым зондированием и далее свойствами грунтов.

Как правило, подобные испытания проводятся раздельно в соседних точках площадки исследований. Согласно нормативным требованиям, расстояние между точками испытаний должно быть не менее 2 м, для исключения взаимного влияния. Однако вследствие природной неоднородности

сложения грунтов при отмеченном расстоянии измеренные параметры статического зондирования отличаются друг от друга. Различие может составлять десятки процентов [8].

Проблему нахождения корреляций и влияния неоднородности грунтов можно решить, измеряя одновременно как параметры статического зондирования, так и параметры бурового зондирования на исследуемой глубине в массиве грунтов [1].

На рис. 1 показана буровая колонна, состоящая из статического зонда (например, СРТу), режущего инструмента в виде, например, трехлепесткового долота, набора полнопроходных шнеков, оголовника, датчика силы и крутящего момента. Последний имеет стандартные переходники для соединения с колонной шнеков и вращателем бурового станка.

Рис. 1. Буровая колонна в сборе

Конструкция первого звена буровой колонны показана детально на рис. 2. Конструктивно зонд перемещается поступательно вертикально при вращении буровой колонны. Применение полнопроходных шнеков вызвано возможностью использования беспроводной передачи данных на поверхность грунта.

Рис. 2. Конструкция первого звена буровой колонны

Рассмотрены результаты полевых и лабораторных испытаний грунтов, выполненные на площадке ООО «НПП «Геотек»». Инженерно-геологические условия показаны на рис. 3. Комплекс испытаний был выполнен с целью сравнения деформационных характеристик грунтов, определяемых различными методами испытаний. В процессе исследований были измерены параметры бурового и статического зондирования (рис. 4, 5), определены прямым методом значения компрессионного и дилатометрического модулей деформации (рис. 6, б).

Страт. индекс	№ ИГЭ	Абс. отм.	Глуб. зал.	Мощность	Описание грунтов	Глуб. подз. вод (м)
fQIV	1a	168,70	0,10	0,10	Асфальт	Воды нет
	2a	168,60	0,20	0,10	Щебень известняка	
	1	168,20	0,60	0,40	Почвенно-растительный слой	
	2	166,20	2,60	2,00	Глина светло-коричневая, полутвердая, слюдистая	
	3	161,60	7,20	4,60	Глина зеленовато-коричневая, тугопластичная, слюдистая, ожезненная, с включениями карбонатов	
	2	159,90	8,90	1,70	Глина полутвердая	
	4	150,70	18,10	9,20	Песок крупный желтовато-серый	
	5	148,80	20,00	1,90	Глина серо-зеленая, тугопластичная, слюдистая, ожезненная	
aQIV						

Рис. 3. Вид грунтов на площадке исследований

На рис. 4 приведены параметры бурового зондирования, а на рис. 5, а – среднее из шести значений лобового сопротивления при статическом зондировании.

Рис. 4. Средние значения измеренных параметров бурового зондирования

Рис. 5. Измеренные параметры статического и бурового зондирования: а – лобовое сопротивление при статическом зондировании; б – удельное давление в буровом зондировании; в – удельный крутящий момент; г – суммарная мощность нагрузки

Используя формулы (1)–(6) определены:

– средняя скорость погружения буровой колонны, ϑ , м/с:

$$\vartheta = \frac{h_{t+\Delta t} - h_t}{\Delta t}, \quad (1)$$

где h_t – глубина скважины в момент времени t ; $h_{t+\Delta t}$ – глубина скважины в момент времени $t + \Delta t$; Δt – интервал времени между измерениями;

– мощность осевой нагрузки на текущей глубине, кДж/с:

$$P_v = N\vartheta, \quad (2)$$

где N – осевая нагрузка на текущей глубине, кН;
– мощность вращательной нагрузки на текущей глубине, кДж/с:

$$P_r = 2\pi M \omega, \quad (3)$$

где M – текущий крутящий момент в забое скважины, кН·м; ω – частота вращения бурового инструмента, с⁻¹;
– суммарная мощность нагрузки на текущей глубине, кДж/с:

$$A = P_v + P_r, \quad (4)$$

– удельная энергия, величина работы, необходимая для разработки единичного объема грунта при бурении скважины, кДж/м³:

$$E = \frac{2\pi\omega M}{V} = \frac{P_r}{V}, \quad (5)$$

где V – объем грунта, м³;
– удельное давление на грунт в забое:

$$q_b = \frac{N}{\pi R^2}, \quad (6)$$

где R – радиус поперечного сечения бурового инструмента, м.

На рис. 6–8 и в табл. 1–3 приведены корреляционные зависимости, полученные для трех типов грунтов: суглинок тугопластичный, песок средней крупности и глина тугопластичная.

Определение модуля деформации по данным статического зондирования выполнено с использованием таблиц И.1, И.2 из СП 47.13330-2012 [7].

Значения модуля деформации для случая испытаний плоским dilatометром определены по формуле:

$$E = \frac{(1-\mu^2)\sigma_h^k B}{h}, \quad (7)$$

где σ_h^i – боковое давление при времени, равное 1 мин; σ_h^k – стабилизированное боковое давление (п.п. 8.10); μ – коэффициент Пуассона; B – ширина пластины dilatометра; h – толщина пластины dilatометра.

Значения компрессионного модуля деформации определены путем лабораторных испытаний по ГОСТ 12248-4.2020 [4].

Рис. 6. Корреляция удельной энергии с модулем деформации: а – литологическая колонка; б – входные данные: статическое зондирование, плоский дилатометр, компрессионное сжатие; в – квадратичная зависимость; г – компрессионное сжатие; д – плоский дилатометр

Таблица 1

Корреляция удельной энергии (€) с модулем деформации

Глубина, м	Тип грунта	СРТ (СП 47.13330) Квадратичная	Компрессионное сжатие	Плоский дилатометр
1–10	Суглинок тугопластичный	$20,39 - 1,04\epsilon + 0,02\epsilon^2$ $R^2 = 0,17$	$7,59 - 0,48\epsilon + 0,01\epsilon^2$ $R^2 = 0,51$	$-6,6 + 2,16\epsilon - 0,07\epsilon^2$ $R^2 = 0,52$
10–15	Песок средней крупности	$9,56 + 1,81\epsilon - 0,05\epsilon^2$ $R^2 = 0,31$	—	—
15–19	Глина тугопластичная	$-274,25 + 53,23\epsilon - 2,33\epsilon^2$ $R^2 = 0,19$	—	—

Рис. 7. Корреляция суммарной мощности нагрузки с модулем деформации: а – литологическая колонка; б – входные данные: статическое зондирование; плоский дилатометр; компрессионное сжатие; в – статическое зондирование; г – компрессионное сжатие; д – плоский дилатометр

Таблица 2

Корреляция суммарной мощности (А) с модулем деформации

Глубина, м	Тип грунта	CPT (СП 47.13330) Квадратичная	Компрессионное сжатие	Плоский дилатометр
1–10	Суглинок тугопластичный	$12,5 - 0,009A + 0,0000,24A^2$ $R^2 = 0,09$	$4,2 - 0,01A + 0,000027A^2$ $R^2 = 0,24$	$11,2 - 0,006A + 0,0002A^2$ $R^2 = 0,63$
10–15	Песок средней крупности	$16,14 + 0,17A - 0,002A^2$ $R^2 = 0,025$	—	—
15–19	Глина тугопластичная	$33,17 - 0,19A + 0,001A^2$ $R^2 = 0,19$	—	—

Рис. 8. Корреляция удельного момента с модулем деформации: а – литологическая колонка; б – входные данные: статическое зондирование; плоский дилатометр; компрессионное сжатие; в – обратная зависимость; г – линейная зависимость; д – компрессионное сжатие; е – плоский дилатометр

Таблица 3

Корреляция удельного момента ($\mathcal{H} = M/V$) с модулем деформации

Глубина, м	Тип грунта	СРТ (СП 47.13330) Обратная	СРТ (СП 47.13330) Линейная	Компрессионное сжатие	Плоский дилатометр
1–10	Суглинок тугопластичный	$7,75 + 967/\mathcal{H}$ $R^2 = 0,21$	$-0,01\mathcal{H} + 14,88$ $R^2 = 0,15$	$13,8 - 0,05\mathcal{H} + 0,00007\mathcal{H}^2$ $R^2 = 0,3$	$-13,8 + 0,14\mathcal{H} - 0,0002\mathcal{H}^2$ $R^2 = 0,3$
10–15	Песок средней крупности	$31,88 - 1208/\mathcal{H}$ $R^2 = 0,26$	$0,092\mathcal{H} + 9,4$ $R^2 = 0,24$	—	—
15–19	Глина тугопластичная	$37,09 - 2492/\mathcal{H}$ $R^2 = 0,38$	$0,02\mathcal{H} + 19,85$ $R^2 = 0,42$	—	—

Заключение

1. Корреляция удельной энергии с модулем деформации соответствует лучшему значению коэффициента детерминации по сравнению с удельным моментом и суммарной мощностью нагрузки.

2. Точность подбора уравнения регрессии наибольшая для случая корреляции модуля деформации из компрессионного сжатия и наименьшая для случая статического зондирования.

Список литературы

1. Болдырев Г.Г. Полевые методы испытаний грунтов. Пенза: ПАТА, 2013. 356 с.
2. Болдырев Г.Г., Болдырева Е.Г., Идрисов И.Х. Устройство для измерения параметров зондирования и бурения. Патент № 2712897 от 31.01.2020.
3. Болдырев Г.Г., Кальберген Р.Г., Кушнир Л.Г., Новичков Г.А. Буровое зондирование грунтов // Инженерные изыскания. 2012. № 12. С. 38–42.
4. ГОСТ 12248.4-2020 Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия.
5. ГОСТ 19912-2012 Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием.
6. Рыжков И.Б., Исаев О.Н. Статическое зондирование грунтов. М.: АСВ, 2010. 496 с.
7. СП 47.13330-2012 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96*».
8. Alshibli K.A., Okeil A., Alramahi B. Update of correlations between cone penetration and boring log data. Baton Rouge, LA, USA: Louisiana Transportation Research Center, 2008. 147 p.
9. Bevilacqua M., Ciarapica F.E., Marchetti B. Acquisition, processing and evaluation of down hole data for monitoring efficiency of drilling processes // Journal of Petroleum Science Research. 2013. Vol. 2. Issue 2. P. 49–56.
10. Cardu M., Oreste P., Pettinau D., Guidarelli D. Automatic measurement of drilling parameters to evaluate the mechanical properties of soils // American Journal of Applied Sciences. 2013. Vol. 10. No. 7. P. 654–663.
11. Kulhawy F.H., Mayne P.W. Manual on estimating soil properties for foundation design: report EPRI-EL 6800. Palo Alto, CA, USA: Electric Power Research Institute, 1990. 306 p.
12. Lunne T., Robertson P.K., Powell J.J.M. Cone penetration testing in geotechnical practice. Abingdon, UK: E and FN Spon, 1997. 312 p.
13. Mayne P.W. Integrated ground behavior: in-situ and lab tests // Deformation Characteristics of Geomaterials. 2005. Vol. 2. P. 155–177.

14. Robertson P.K., Cabal K.L. Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering, 6th edition. Signal Hill, CA, USA: Gregg Drilling and Testing, 2015. 143 p.

G.G. Boldyrev, A.E. Kostyaev

Scientific Production Enterprise Geotek LLC, Penza, info@npp-geotek.ru

TESTING OF SOILS BY THE COMBINED SOUNDING METHOD

Abstract. It is presented the results of studies of the deformation properties of soils by the method of drilling and static penetration. Correlation relationships between the drilling sounding and static penetration parameters and the compression modulus of deformation are given.

Key words: drilling sounding; static penetration; correlation dependences; elast modulus.

Дробинина Е.В.

ПГНИУ, геологический факультет, лаборатория прогнозного моделирования, г. Пермь
Пермский филиал ООО «Противокарстовая и береговая защита», г. Пермь, alenadrobina@yandex.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ КАМЕРАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС

Аннотация. Демонстрируются преимущества применения геоинформационных систем (ГИС) при проведении комплексной оценки карстовой опасности в процессе проведения инженерно-геологических изысканий. На конкретном примере показана оптимизация камеральной обработки материалов с использованием ГИС, в частности, описывается методика морфометрического и морфоструктурного анализа, оценка площадной поверхностной закарстованности. Приводится детальная характеристика условий и факторов развития карстового процесса на изучаемой территории.

Ключевые слова: карст; геоинформационные системы; карстовая опасность; карстовые воронки.

Проведение инженерно-геологических изысканий требует от исполнителя комплексного подхода к анализу имеющихся материалов, скорости и качественной обработке данных полевых и лабораторных исследований. Для работы с пространственными данными весьма успешно на современном этапе инженерно-геологических изысканий применяются геоинформационные системы (ГИС), позволяющие производить сбор, хранение, обработку (в т.ч. пространственный анализ) и визуализацию данных. Использование ГИС значительно упрощает процесс камеральной обработки и позволяет инженер-геологу в короткие сроки дать качественную и количественную оценку исследуемых инженерно-геологических процессов и явлений.

В данной работе рассматривается применение ГИС при проведении инженерно-геологических изысканий в районах развития карста. Также сделан акцент на расширение возможностей некоторых используемых пакетов инструментов с целью повышения скорости процесса обработки для снижения вероятности ошибок по субъективным личностным причинам и случайным факторам камеральной обработки при выполнении «рутинных» процедур. В качестве пилотного выбран участок в пределах Республики Марий Эл: окрестности оз. Яльчик, расположенного в центральной части Волжского района на юге национального парка «Марий Чодра».

Участок приурочен к юго-западной оконечности Вятского вала, представляющего собой систему вытянутых субмеридиональных брахиантиклиналей, разобщенных синклинальными понижениями. Одним из ключевых элементов здесь является Шургинская полоса поднятий, в пределах которой выделяется Яльчевская структура. Влияние тектонических структур на развитие карста в значительной мере проявляется через трещиноватость горных пород. Наиболее интенсивная тектоническая трещиноватость,

благоприятствующая широкому развитию карстовых процессов, отмечается в зонах сопряжения крупных положительных и отрицательных структур и в пределах локальных тектонических поднятий.

С использованием ГИС в ходе комплексной оценки карстоопасности был проведен анализ неотектонической активности территории посредством построения базисных морфометрических поверхностей. Базисные поверхности представляют собой цифровую модель рельефа (ЦМР) местности в определенный этап неотектонического развития территории [3].

На первом этапе схема построения базисных поверхностей сводилась к формированию слоя водотоков, представленного сегментами различных порядков. Порядок водотоков – это классификационная числовая характеристика водотока, определенная на основе количества его притоков. Порядок водотоков определялся по методу Страхлера: всем сегментам водотоков, не имеющим притоков, присваивалась единица (водотоки первого порядка). При пересечении водотоков с одинаковым порядком, последний возрастал на единицу. Так, на изучаемой территории овражно-балочная и речная сети характеризуются водотоками от первого до четвертого порядков. Последний мало информативен: развит локально, на юго-западе территории.

Затем производились перевод вершин сегментов различных порядков в точки и внесение в последние абсолютных отметок рельефа местности с последующей их интерполяцией. Базовые поверхности низших порядков лишь незначительно отличаются от современного рельефа. Поверхности более высоких порядков заметно отличаются от последнего, что позволяет выявить относительно крупные неотектонические структуры [3].

При сравнении базисных поверхностей разных порядков друг с другом и ЦМР можно выделить положительные (поднятия) и отрицательные (понижения) неотектонические структуры (рис. 1).

Если оценить характер распределения карстовых воронок на изучаемой территории, несложно заметить, что они преимущественно тяготеют к положительным структурам. Интересно, что это явно проявляется при сравнении относительно древней базисной поверхности, наиболее полно отражающей контуры неотектонических структур, с современной, когда наблюдается отрицательный эксцесс и большая разбросанность частот ряда с ярко выраженной асимметрией в сторону положительных значений.

Применение ГИС весьма полезно при проведении интегральной оценки карстоопасности с целью изучения природных факторов развития карстового процесса. Так, созданные инструменты для морфометрического анализа – оценки расчлененности рельефа – позволили быстро и с высокой степенью достоверности отметить высокую плотность карстовых форм на участках с хорошей вертикальной расчлененностью рельефа. Примечательно, что характер распределения карстовых форм в зависимости от этого параметра близок к бимодальному. Также наблюдается повышенная концентрация форм на участках

с незначительным или малым уклоном рельефа, там, где инфильтрация превалирует над плоскостным стоком (рис. 2).

Рис. 1. Кривые распределения карстовых воронок в зависимости от величины приращения абсолютных отметок базисных поверхностей различного порядка и ЦМР

Рис. 2. Кривые распределения карстовых форм в зависимости от морфометрических параметров: а — вертикальной расчлененности; б — уклона рельефа местности

Развитие процесса растворения на изучаемой территории связано с карбонатными и сульфатно-карбонатными породами приуральского и

биармийского отделов пермской системы. Среди нижнепермских образований широко распространены породы ассельского и сакмарского ярусов. Отложения ассельского яруса развиты повсеместно, залегают согласно на карбонатных образованиях гжельского яруса карбона, представлены преимущественно доломитами и известняками. Глубина залегания кровли яруса колеблется в широких пределах от 140 до 270 м.

Сакмарский ярус залегает согласно на ассельском. В основании выполнен доломитами (до 20–30 м), выше по разрезу – гипсо-ангидритовой толщей мощностью 40–70 м. В местах, где толща трещиновата и закарстована, гипс занимает господствующее положение. В целом по разрезу, за исключением его верхней части, мощностью от нескольких метров до 10–15 м, и гипсы, и ангидриты плотные, крепкие. Верхняя часть повсеместно размыта и разрушена в результате эрозионно-карстовых процессов.

Выше залегают доломитизированные известняки и доломиты, нередко окремненные и загипсованные, казанского яруса биармийского отдела, в верхней части разреза сильновыветрелые, разрушенные до состояния муки, прослои которой, как правило до 5 м, прослеживаются на различных глубинах от 0,5 до 30,0 м. Сильнотрещиноватые и разрушенные казанские породы на повышенных участках доказанского рельефа менее трещиноваты в его понижениях. Глубина залегания кровли пород варьируется в пределах от 15 до 40 м. Вскрытая общая мощность казанских образований составляет 80 м.

Красноцветные отложения уржумского яруса биармийского отдела на рассматриваемой территории преимущественно размыты и отмечаются на весьма ограниченных по площади участках (в северо-восточной части). Представлены мергелями пестроцветными плотными глинистыми и глинами с прослоями алевролитов и песчаников.

К эрозионному врезу древней речной долины Палео-Волги приурочены неогеновые отложения (русовая фация плиоценового возраста): разнотернистые пески с прослоями глин, с гравием и галькой в основании разреза. Мощность варьируется в широких пределах и в зонах максимальных переуглублений достигает 140 м.

Повсеместно дочетвертичные образования палеозоя и неогена перекрываются отложениями четвертичной системы: аллювиально-флювиогляциальными среднечетвертичными песками с включениями гальки и гравия, с подчиненными прослоями суглинков, иловатых глин, торфа. Мощность четвертичных отложений не превышает 40 м.

По данным инженерно-геологических изысканий до глубины 75,0 м на исследуемом участке на глубине 6,7–9,2 м, на абсолютных отметках от 64,6 до 66,8 м (межень 2019 г.) вскрыт один выдержанный водоносный горизонт грунтовых вод, приуроченный к среднечетвертичным песчаным отложениям. Ввиду отсутствия выдержанного водоупора, грунтовые воды могут быть гидравлически связаны с трещинно-карстовыми. При бурении карстологических

скважин горизонт трещинно-карстовых вод не вскрыт, вероятно, активизация карстового процесса может быть приурочена к глубинам ниже указанной.

По химическому составу воды преимущественно гидрокарбонатные натриево-кальциевые, реже гидрокарбонатные кальциевые. Воды горизонта пресные, с минерализацией от 0,173 до 0,235 г/дм³ (среднее значение – 0,200 г/дм³), агрессивны по отношению к сульфатным породам и к доломитам, преимущественно неагрессивны по отношению к известнякам, о чем свидетельствуют большинство химических анализов грунтовых вод и расчеты агрессивности по отношению к карстующимся породам.

Режим грунтовых вод отражает периодические колебания уровня оз. Яльчик – паводковый подъем в летнюю и зимнюю межень. За счет увеличения питания водотоков, в т.ч. и оз. Яльчик, в паводковые периоды, возможен подпор подземных вод пресными водами оз. Яльчик, вследствие которого вероятно также изменение химического состава и агрессивности подземных вод.

Сезонные колебания уровня воды в озере отражаются в сезонном колебании уровня грунтовых вод, что оказывает благоприятное влияние на развитие карстовых процессов. Следует отметить, что максимальное развитие форм подземного карста в массиве связано, согласно принципиальной схеме гидродинамической зональности Г.А. Максимовича [2], с зоной периодического колебания уровня карстовых вод (переходной). Эта особенность формирования полостей в растворимых породах массива подтверждена результатами наблюдений за режимом подземных вод, проведенных трестом «ВерхнекамТИСИЗ» в 1971–1972 гг. (годовой цикл) на территории г. Кунгура. Исследователями отмечено, что усиление гидродинамической активности фильтрационного потока в послепаводковые периоды преимущественно в пределах зоны колебания уровней подземных вод, является основной причиной возникновения карстовых деформаций на поверхности поймы, I и II надпойменных террас [1].

На изучаемой территории поверхностные проявления карстового процесса представлены воронками как карстово-суффозионными, так и карстово-обвальными. Поверхностная закарстованность оценена по результатам дешифрирования космоснимков, анализа топографических карт, фондовых и опубликованных материалов, результатам полевого рекогносцировочного обследования.

Озерные котловины, широко развитые на участке, имеют карстовое и суффозионно-карстовое происхождение. Озеро Яльчик представляет собой систему из двух озер – Большого и Малого, соединенных протокой. На данный момент оз. Яльчик – самое большое озеро в Республике Марий Эл с вероятной тенденцией его дальнейшего увеличения за счет интенсивного развития карстовых процессов на берегах озера. Берега озера характеризуются циркообразными изгибами, отражающими относительно молодые по возрасту провалы [4]. Однако, анализ космоснимков Земли для оценки изменения

площади зеркала оз. Яльчик показал, что поверхность зеркала за последние 10 лет (с июня 2011 г. по настоящее время) изменилась незначительно. Причем изменения контура уреза воды в озере, по большей части, могут быть связаны с годовыми колебаниями уровня воды в озере. Новых циркообразных изгибов, связанных с формированием свежих карстовых провалов за последние 10 лет, не наблюдается.

По данным отчета «Научно-исследовательские работы по изучению влияния карста на условия сельского и гидромелиоративного строительства в юго-восточной части Нечерноземной зоны РСФСР. Карты районирования южной части Горьковской области масштаба 1:100 000 и Помарского участка Марийской АССР масштаба 1:50 000 с пояснительной запиской» (г. Дзержинск Нижегородской обл.) в 1979 г. вблизи оз. Яльчик было зафиксировано несколько десятков карстовых воронок и три свежих провала. Отмечено, что размеры карстовых воронок (провалов с выположенными бортами) варьируются от 7 до 70 м. Также согласно фондовым материалам отчета «Оценка карстовой опасности и предложения по мероприятиям для обеспечения эксплуатационной безопасности на аварийном участке провала на 24 км железнодорожной линии Зеленый Дол – Йошкар-Ола» (г. Дзержинск Нижегородской обл.) в 2,3 км юго-западнее участка работ в апреле 2000 г. сформировалось карстово-суффозионная депрессия, диаметром 160 на 250 м, глубиной – 7 м, спровоцировавшая оседание полотна на 24 км железной дороги «Зеленый Дол – Йошкар-Ола» на 0,7 м по вертикали и некоторое горизонтальное смещение пути протяженностью около 100 м.

Таким образом, всего на площади 24,8 км² было зафиксировано 109 поверхностных карстопроявлений, представленных карстовыми и карстово-суффозионными воронками (56 шт.), понижениями (38 шт.) и озерными котловинами (15 шт.).

Оценка площадной поверхностной закарстованности весьма успешно реализована с применением ГИС. Так, после дешифрирования и подтверждения рекогносцировкой карстового генезиса выявленных форм, оценивались их морфометрические параметры. С этой целью был создан инструмент для расчета диаметров карстовых форм, в т.ч. овальных и неправильной формы.

Согласно п. 5.2.11 СП 11-105-97, ч. II [6] и «Руководству по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста» [5] вокруг существующих карстопроявлений следует выделять и обособлять зоны по степени удаленности: I – условно благоприятная для строительства (удаленность более 50 м); II – неблагоприятная для строительства (удаленность от 20 до 50 м); III – опасная для строительства (удаленность менее 20 м). Процесс зонирования также осуществлен с использованием ГИС.

В дополнение к этому был создан инструмент, позволяющий в автоматическом режиме ранжировать трассу возможных проектируемых линейных объектов на зоны по степени удаленности в зависимости от пересечения их трассой. Применение данного инструмента позволило

значительно сократить по времени процесс категорирования участков линейных объектов и повысить его качество.

Таким образом, применение ГИС в инженерных изысканиях с целью оценки карстовой опасности повышает ее качество, сокращает время выполнения, снижает вероятность ошибок по субъективным личностным причинам камеральной обработки при осуществлении «рутинных» операций.

Список литературы

1. Катаев В.Н., Кадебская О.И. Геология и карст города Кунгура. Пермь: Пермский государственный университет, ГИ УрО РАН, 2010. 236 с.
2. Максимович Г.А. Основы карстоведения. Т. 1. Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермь: Пермское книжное издательство, 1963. 447 с.
3. Нугманов И.И., Нугманова Е.В., Чернова И.Ю. Основы морфометрического метода поиска неотектонических структур. Казань: Казанский университет, 2016. 53 с.
4. Озера Среднего Поволжья / Отв. ред. И.Н. Сорокин, Р.С. Петрова. Л.: Наука, 1976. 236 с.
5. Саваренский И.А., Миронов Н.А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М.: ПНИИИС, 1995. 167 с.
6. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов.

E.V. Drobinina

Perm State University, Perm
Perm Branch of the Karst-Control and Bank Protection LLC, Perm, alenadrobinina@yandex.ru

OPTIMIZATION OF OFFICE STUDIES OF THE ENGINEERING SURVEYS RESULTS USING GIS

Abstract. The advantages of using geographic information systems (GIS) during comprehensive karst hazard assessment during the engineering surveys are demonstrated. The optimization of office studies of the engineering surveys results using GIS is presented on the specific area. The technique of morphometric and morphostructural analysis, the assessment of surface karst distribution is described in particular. The detailed description of the conditions and factors of karst process development is given for the study area.

Key words: karst; geographic information systems; karst hazard; karst sinkholes.

Ермолов А.А.

МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория геоэкологии
Севера, г. Москва, alexandr.ermolov@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ ПО ПОИСКУ И ВЫЯВЛЕНИЮ КАРЬЕРОВ ГРУНТОВЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА «БОВАНЕНКОВО – УХТА (III НИТКА)»

Аннотация. Рассматриваются природные, производственные и материально-технические аспекты проведения поисковых работ в Арктической зоне Российской Федерации, характеризующейся сложными природно-климатическими и инженерно-геологическими условиями, а также ограниченным распространением грунтовых строительных материалов.

Ключевые слова: инженерно-геологические изыскания; грунтовые строительные материалы; карьеры; поисковые работы.

Основной целью инженерно-геологических изысканий общераспространенных полезных ископаемых (ОПИ) является получение необходимых и достаточных сведений для организации добычи и обеспечения потребностей строительства инженерных объектов грунтовыми строительными материалами. На первом этапе производится поиск карьеров ОПИ, задачами которого является выявление и оконтуривание перспективных участков проявления грунтовых строительных материалов, отвечающих требованиям заказчика по видам, объемам, условиям добычи и размещению относительно объектов проектирования. На втором этапе производится разведка карьеров ОПИ на участках, отвечающих вышеуказанным требованиям, и согласованных генеральным проектировщиком.

В настоящей публикации рассматриваются особенности работ первого этапа – поиска перспективных участков проявления ОПИ, как наиболее актуального с геологической точки зрения. Несмотря на полностью инженерно-геологический состав работ, их содержание имеет выраженную специфику. Поэтому действующая нормативная база включает СП 11-109-98 «Изыскания грунтовых строительных материалов» [2], разработанный в развитие основных положений и требований СП 47.13330.2016 [3].

Район поиска карьеров ОПИ охватывал территории Приуральского района Ямало-Ненецкого АО и городского округа Воркута Республики Коми. Протяженность участка более 340 км, ширина полосы поиска 20 км (по 10 км от оси III нитки магистрального газопровода «Бованенково–Ухта»).

Физико-географические, геологические и геокриологические условия отдельных частей территории заметно отличаются, что определяет многообразие геолого-литологических обстановок в зоне поиска. В геоморфологическом плане территория расположена в областях развития морских террас четвертичного возраста, районах расчлененных равнин моренной и водно-ледниковой

аккумуляции, включая участки распространения озов и камов, повышенных денудационно-аккумулятивных равнин, предгорной равнины Полярного Урала и его отрогов. Равнинный рельеф осложнен долинами средних и малых рек и ручьев, к крупным относятся реки Уса, Большая Сырьяга, Нярма-Яха, Воркута, Сейда, Кара и др. Сравнительно неширокое распространение имеют заболоченные участки и озера.

Характеристика четвертичных отложений восточной части Большеземельской тундры подробно изложена в литературе [1]. Современными исследованиями, выполненными при проведении инженерных изысканий на этапах проектирования I и II ниток магистрального газопровода установлено, что в отдельных районах поиска грунтовые строительные материалы имеют ограниченное распространение.

Основными задачами поискового этапа являлись:

- выделение и оконтуривание перспективных участков проявления общераспространенных полезных ископаемых (песчаный грунт, минеральный грунт, торф, щебенистый грунт), согласование их местоположения с заказчиком;
- получение предварительных данных о запасах и качестве грунтов полезного слоя и горно-геологических условиях перспективных участков проявления ОПИ.

Способ разработки карьеров ОПИ – открытый, сухой. Решение задач осуществлялось комплексом стандартных методов, включающих: сбор и анализ архивных данных, рекогносцировочное обследование территории, буровые работы, гидрогеологические наблюдения в скважинах, отбор проб грунтов, лабораторные исследования грунтов, камеральная обработка материалов.

Перед выполнением полевых работ специалистами камеральной группы был проведен сбор, обобщение и анализ архивных и фондовых геологических данных, картографических материалов, выполнено предполевое дешифрирование спутниковых снимков и разработана геоинформационная система с целью формирования плана поисковых работ, предварительного выделения участков перспективных в отношении распространения требуемых видов грунтов.

На основании разработанных материалов в бесснежный период года было выполнено рекогносцировочное обследование с целью изучения природных и техногенных условий территории, визуального обследования намеченных на подготовительном (предполевом) этапе работ участков поиска ОПИ, выявления труднодоступных участков, подъездных путей, особенностей рельефа, инфраструктуры, уточнения и дополнения данных инженерных изысканий прошлых лет, результатов предполевого дешифрирования космо- и аэрофотоснимков, исследовались обнажения, существующие карьеры ОПИ и пр.

Наряду с указанными задачами производилось изучение инженерно-геологических и геолого-геоморфологических условий местности, выявление и оценка проявлений опасных геологических процессов и гидрологических

явлений, способных осложнить разработку карьеров ОПИ и пр. Это имеет большое значение для обеспечения потребностей проектирования и строительства, а также для оценки их воздействия на окружающую среду. Результаты таких исследований во многом являются определяющими при принятии проектных решений и определении целесообразности инженерных мероприятий в конкретных условиях, позволяют прогнозировать природные и техногенные риски.

Рекогносцировочное обследование проводилось по всей полосе поиска (10 км в стороны от оси трассы). При выборе маршрутов учитывались материалы инженерных изысканий по объекту «Магистральный газопровод “Бованенково – Ухта”», использовались топографические и геологические карты, навигационное оборудование. В ходе рекогносцировочных маршрутов проходились единичные скважины для вскрытия перекрывающих отложений, изучения полезной толщи с визуальным определением состава отложений, отбором образцов грунта. В условиях максимальной оттайки поверхностных отложений работы проводились как переносными установками УКБ 12-25, так и ручным буром. Причем ручное бурение до глубин 3-4 м оказалось наиболее оперативным и информативным, а также и позволяло получать геологическую информацию на нескольких участках (до 10–15 скважин) в течение одного маршрутного дня. По результатам таких маршрутов определялись перспективность участков и целесообразность продолжения поисковых буровых работ на них.

Наряду с указанными видами исследований проводились работы по сбору исходных данных, получению сведений о возможных ограничениях на размещение карьеров, собственниках земель, водоохранных зонах и пр.

Результаты рекогносцировочного обследования подтвердили сложность поставленной задачи. Было установлено фактическое отсутствие песчаных отложений на значимой части территории, в т.ч. в пределах террасовых комплексов речных долин. В частности, песчано-гравийные и гравийно-галечные грунты не были выявлены в аллювиальных отложениях поймы и I надпойменных террас большинства крупных и средних рек равнинной части территории. На тех немногих участках, где данные отложения присутствовали в руслах рек (в пределах водоохранных зон) и фрагментарно в пределах II и III надпойменных террас, слабо выраженных в рельефе, зачастую отмечался высокий уровень грунтовых вод или значительная мощность вскрышных толщ, неудовлетворяющая условиям задания.

Межледниковый аллювий надпойменных террас нередко перекрыт повсеместно распространенными покровными суглинками мощностью до 3,0–4,0 м, облекающими почти все неровности рельефа, спускаясь на III, а в отдельных случаях и на II надпойменную террасу. Наличие покровных суглинков сильно затрудняло поиск перспективных участков, т.к. прямой связи между рельефом и мощностью данных отложений не наблюдалось. Напротив, зачастую можно было выявить инверсионную картину распространения

покровных суглинков с увеличением их мощности на относительно выровненных или возвышенных участках.

Отсутствие песчаных, песчано-гравийных и гравийно-галечных (щебенистых) грунтов в аллювии надпойменных террас и ограниченное распространение последних в пределах зоны поиска привело к необходимости корректировки первоначального плана поисковых работ. По результатам рекогносцировочного обследования было скорректировано положение более 60% выделенных на подготовительном этапе работ участков и намечено большое количество новых перспективных площадей. При этом значимая часть новых участков генетически приурочена к водно-ледниковым отложениям, образующим весьма специфические формы рельефа. Большей частью они залегают на повышенных участках или на склонах, имеют прерывистое распространение как в плане, так и в разрезе.

В северной части территории поиска в области развития морских террас и в предгорных районах песчаные и песчано-гравийные грунты формируют пологие увалы или столообразные террасовые останцы, и несмотря на ограниченное распространение лучше выражены в рельефе, что облегчало поисковые работы. О наличии песчаных отложений здесь свидетельствовали дефляционные котловины, бронированные мелкообломочным материалом, заметные на значительном расстоянии.

Наряду с природными условиями, определяющими факторами служили ограничения возможности переезда тяжелой техники через существующие нитки магистрального газопровода, отсутствие мостовых переходов через реки (в части обеспечения подъездных дорог к карьерам), отсутствие железнодорожных переездов, а также различные ограничения на использование земель в целях добычи полезных ископаемых. На юге территории поиска эти факторы дополняло появление лесной растительности и отсутствие каких-либо дорог.

Другим немаловажным аспектом, связанным с результатами рекогносцировочного обследования, стал выбор буровых техники для проведения основного этапа работ в зимний период. При выборе буровых установок учитывалось многообразие инженерно-геологических условий отдельных районов зоны поиска, различные виды и состав грунтов, слагающих верхнюю часть разреза – от слабых грунтов (торф, суглинки и глины текучей консистенции) до окрепших известняков, широким распространением крупнообломочных отложений и многолетнемерзлых грунтов.

Таким образом, рекогносцировочное обследование явилось важнейшим этапом поисковых работ, во многом предопределившим их успешное завершение. Многоэтапный подход полностью оправдал себя в отношении результатов поисковых работ и позволил минимизировать временные, трудовые и финансовые издержки на проведение бурения в сложных природно-климатических условиях. В результате выполненных работ были решены задачи первого этапа разведки карьеров ОПИ – выделены и оконтурены перспективные

участки проявления общераспространенных полезных ископаемых, согласовано их местоположение с заказчиком. Получены предварительные данные о запасах и качестве грунтов полезного слоя и горно-геологических условиях перспективных участков проявления ОПИ.

Дешифрирование спутниковых снимков, сбор и анализ фондовых данных выполнены в рамках работ по госбюджетной теме научно-исследовательской лаборатории геоэкологии Севера географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова № 121051100167-1.

Список литературы

1. Станкевич Е.Ф. Четвертичные отложения восточной части Большеземельской тундры // Известия Академии наук СССР. Серия геологическая. 1962. № 5. С. 93–103.
2. СП 11-109-98 Изыскания грунтовых строительных материалов.
3. СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96*».

A.A. Ermolov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, alexandr.ermolov@gmail.com

FEATURES OF THE WORK ON THE SEARCH AND IDENTIFICATION OF QUARRIES OF GROUND BUILDING MATERIALS TO ENSURE THE CONSTRUCTION OF MAIN GAS PIPELINE “BOVANENKOVO – UKHTA (III THREAD)”

Abstract. The publication considers the natural, industrial, and logistical aspects of prospecting in the Arctic zone of the Russian Federation, characterized by complex climatic and engineering-geological conditions and limited distribution of ground building materials.

Key words: engineering-geological surveys; ground building materials; quarries; prospecting.

Кочев А.Д.

ООО «Институт “Транспроектинжиниринг”», г. Москва, a.kochev@mail.ru

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫХ ВОРОНОК В г. МОСКВЕ

Аннотация. До конца 1980-х гг. на территории г. Москвы образовалось порядка 42 карстово-суффозионных воронок. Исследования механизма их образования основывались на методах физического моделирования с использованием эквивалентных материалов и разработках детерминистских расчетных математических моделей, по результатам применения которых оценивались напряженно-деформированное состояние закарстованных участков и параметры деформаций на поверхности земли. При этом исследователями предлагались различные механизмы протекания процесса; в расчетах диаметров карстово-суффозионных провалов и воронок повсеместно использовалось значение мощности относительно водоупорных глин, разделяющих карбонатный массив и покровные отложения. В работе предлагается новый взгляд на механизм карстово-суффозионных процессов, основанный на результатах комплексных инженерно-геологических исследований, проведенных непосредственно на участках образования воронок. Механизм заключается в разрушении глин снизу вверх под действием циклических аэродинамических и гидродинамических нагрузок, вызванных резкими колебаниями уровня трещинно-карстовых вод благодаря значительным откачкам. Мощность глин при этом не влияет на размеры воронок на поверхности земли.

Ключевые слова: карстово-суффозионные процессы; комплексные инженерно-геологические исследования; механизм образования провалов и воронок; моделирование; карбонатный массив; относительно водоупорные глины; «вакуумный» эффект; закарстованность; трещиноватость.

Введение

На территории г. Москвы насчитывается 42 карстово-суффозионные воронки (КСВ), причем все они расположены в северо-западной части города на площади порядка 11 км². По мнению многих специалистов, первые случаи образования КСВ зафиксированы в конце 1950-х гг.; в Территориальных геологических фондах (ТГФ) ПГО «Центргеология» (ныне – Федеральное бюджетное учреждение «Территориальный фонд геологической информации по Центральному федеральному округу») имеются сведения о возникновении воронок и провалов в следующих годах: 1932, 1937, 1947, 1949, 1950, 1953, 1958, 1959, 1960, 1963 и т.д. При этом инженер-геологи, изучающие опасные процессы, высказывали различные возможные причины образования воронок: наличие подземных коммуникаций, старых заброшенных колодцев, подземных военных складов, секретных объектов и др. Далеко не все связывали образование воронок с подземными карстовыми формами. Специальные исследования, подтверждавшие карстово-суффозионную природу наблюдаемых деформаций, не осуществлялись. Большинство специалистов-карстоведов считают, что активизация карстово-суффозионных процессов (КСП) является следствием

мощных откачек из каменноугольных водоносных горизонтов [2, 4, 9, 12, 20], а некоторые, что это естественный природный процесс [14]. Следует добавить, что за последние 33 года случаев образования КСВ в г. Москве не отмечалось; с 1989 г. мощные откачки из каменноугольных водоносных горизонтов были прекращены.

Целенаправленные исследования КСП в г. Москве начались в конце 1970-х гг., когда были разрушены два пятиэтажных жилых здания. Большое внимание уделялось изучению механизма образования воронок.

Согласно В.Н. Кожевниковой [4], образование провалов обусловлено развитием и нарастанием до критических значений гидродинамических сил по мере снижения напоров карстовых вод. В результате этого происходят различные фильтрационные деформации глин: «контактный выпор, вымыв глинистых пород на контакте с известняками». Помимо гидродинамического давления на глинистую толщу, перекрывающую карбонатный массив, действует так называемый «вакуумный» эффект вследствие резкого снижения уровней подземных вод ниже кровли карбонатного массива. Глины переходят в мягкопластичную и текучепластичную консистенцию и **выдавливаются в полости** и трещины карбонатных пород. Вслед за этим происходит **обрушение** вышележащих песчано-глинистых пород. По механизму образования деформаций В.Н. Кожевникова выделяет два типа – локализованное провалообразование и широкомасштабные оседания поверхности земли.

Л.Г. Чертковым [20] указывается, что развитие суффозионного процесса в покровной толще на участках распространения водоупорных глин возможно лишь при условии их разрушения – наличия в водоупоре сквозных нарушений. При этом подчеркивается, что вопрос о характере и механизме локального нарушения сплошности глин остается нерешенным, но отмечается, что современные нарушения в глинах приурочены, как правило, к древним карстовым провалам.

Анализ инженерно-геологических условий, результатов изучения напряженного состояния массивов пород и его изменений при нарушении гидрогеологических условий позволил В.М. Кутепову [10, 11] предложить «гравитационно-суффозионно-гравитационный» механизм образования провалов в северо-западной части г. Москвы. В начальной стадии образования провалов предполагается их цилиндрическая форма с вертикальными стенками. Дальнейшее развитие провалов не рассматривается, что, по-видимому, связано со сложным характером механизма последующего развития деформаций (в каждой части массива он различен и остается до сих пор дискуссионным). И математическое моделирование таких процессов крайне затруднительно, поскольку рост деформаций предполагается нестационарным, а многие необходимые при этом параметры состояния геологической среды неизвестны.

Так, определение коэффициента устойчивости массива проводится по расчетно-теоретической схеме, использующей заданные размеры ослабленных зон – нарушений сплошности глинистого водоупора, параметры незаполненных

карстовых полостей и др., определить которые в процессе специальных комплексных инженерно-геологических исследований (не говоря уже об инженерных изысканиях) на современном этапе не представляется возможным в условиях г. Москвы.

В связи с трудностями изучения КСП в природных обстановках, когда зарождение процесса происходит на больших глубинах, получило широкое развитие изучение механизма деформаций покровной толщи в лабораторных условиях. Использовались методы физического моделирования на эквивалентных материалах [1, 3, 13, 16, 19], моделировался процесс собственно провалообразования над карстовыми полостями. Предполагалось, что механизм провалов имеет много общего с оседаниями, при этом указывалось, что последние представляют собой не менее сложный процесс [17], протекающий намного медленнее первых.

На «мокрых» моделях в водонасыщенной части песчаной толщи при значительном градиенте вертикальной фильтрации формируется зона фильтрационного разрушения, которая распространяется вверх до уровня грунтовых вод (УГВ). При достижении ею УГВ происходит обрушение неводонасыщенных несвязных разностей, результатом которого является провал на поверхности [19]. В данной и близких к ней моделях зона фильтрационного разрушения имеет параболическую, эллиптическую, каплевидную и подобные формы.

На «сухих» моделях наблюдается выпадение сводов (А.В. Аникеев, Р.Б. Давыдько, Г.В. Короткевич, О.Б. Нещеткин, В.В. Толмачев, Г.М. Троицкий, В.П. Хоменко [18] и др.), что в общем соответствует теории горного давления М.М. Протодяконова (1933 г.). В данных моделях приемник покровного материала имитируется открытой крупной карстовой полостью. В условиях г. Москвы такие полости встречаются редко, чаще наблюдаются чередование небольших полостей высотой 10–20 см или сильнотрещиноватые и закарстованные зоны. Открытые полости не были встречены непосредственно под подошвой глинистого экранирующего слоя; чаще они встречаются в интервале глубин от 5 до 20 м ниже кровли карбонатного массива [7]. Объем такого открытого пространства (эффективной пустотности), способного принимать материал покровной толщи, в настоящее время определить невозможно. А от этой коллекторской способности массива во многом зависят и параметры деформаций на поверхности.

Важно отметить заслуживающие внимания результаты моделирования деформаций покровной толщи на термопластических эквивалентных материалах [2]. Подтверждается куполообразная или близкая к ней форма разуплотненной зоны в покровных отложениях. Характер же разрушения глинистого экранирующего слоя отражается в виде вывалов в подошве этого слоя.

Необходимо упомянуть и о предложенной модели случайного гидроразрыва слабопроницаемого слоя [2]. Так, отмечается, что резкое уменьшение давления воды в основании разделяющего слоя до критических

отметок вызывает отслаивание и отстреливание кусков глины с его подошвы (скорость их оседания на дно полости заметно меньше, чем в начале движения). Пласт растрескивается по системе поверхностей отрыва. Волна дробления практически мгновенно достигает кровли слоя. Такой процесс А.В. Аникеев назвал «случайным гидроразрывом» и предложил условие возможности гидроразрыва, зависящее от состояния глинистых пород, их минерального состава, дисперсности, концентрации порового раствора и многих других факторов. Отмечается также, что наибольшую опасность для водоупоров представляют колебания пьезометрического уровня трещинно-карстовых вод, характерные для сезонной эксплуатации водозаборов и опытных фильтрационных работ.

В целом, мнения многих авторов о механизмах протекания КСП различны и основываются на результатах моделирования процессов деформаций в покровной толще и кровле карстовых полостей. В связи с этим назрела настоятельная необходимость изучения данного процесса в природной обстановке непосредственно на участках образования КСВ.

Краткая характеристика участка исследований

Ниже представлены методика и результаты комплексных детальных исследований масштаба 1:500, выполненных на участке образования одной из КСВ. Общая площадь исследований – 15 тыс. м². Данный участок расположен на поверхности третьей (ходынской) террасы в 2 км от русла р. Москвы; в тектоническом отношении приурочен к краевой части небольшого поднятия – структуре IV порядка. До глубины 40 м залегают четвертичные пески с прослоями суглинков и супесей, ниже – маломощные (1–5 м) глины юрского возраста. Уровень грунтовых вод (УГВ) отмечается на глубине от 12 до 13 м, амплитуды колебания уровней незначительны и составляют в основном 0,2–0,3 м. По многолетним стационарным наблюдениям, на данной и смежных территориях эти колебания настолько малоамплитудны, что сколько-нибудь существенного влияния на интенсивность протекания рассматриваемого процесса оказать не могут. Температура воды – 9–12°C, максимальная – 14°C, что несколько выше фоновых значений. Изменения температуры за время авторских наблюдений не превысили 0,5–0,8°C. Характерно повышенное содержание хлора (до 136 мг/л) и нитратов (до 50–60 мг/л), что указывает на загрязнение водоносного комплекса, хотя в пределах участка работ утечек из коммуникаций обнаружено не было.

Мезо-кайнозойская толща подстилается известняками и доломитами верхне-среднекарбонового возраста (вскрытая мощность – 40 м), в кровле которых повсеместно отмечаются карбонатные глины с пропластками мергеля и известняка мощностью 8–10 м. Уровень подземных вод в карбонатном массиве находится на глубине 48,5–50,5 м. Напор водоносного горизонта был снижен в течение длительной эксплуатации на 25–30 м. Вблизи воронки он имеет

свободную поверхность – осушенная часть карбонатных пород составляет 2–4 м. Температура воды 7,5–8,5°C, колебания за период авторских наблюдений не превысили 0,2–0,4°C.

Методика исследований

Для подтверждения генезиса наблюдаемых воронок, изучения факторов и условий, механизма и динамики КСП был разработан и использован комплекс методов, включающий раскоп воронок, геодезические и визуальные наблюдения за динамикой развития воронок и деформаций зданий, наземные геофизические исследования, динамическое зондирование, бурение скважин с комплексом каротажа и межскважинной геофизики, лабораторных работ и режимных гидрогеологических наблюдений [9].

Раскоп воронки производился в целях обнаружения возможных приповерхностных объектов искусственного происхождения, способных вызвать наблюдаемые деформации. Он осуществлялся экскаватором по двум взаимно перпендикулярным поперечникам на глубину 6 м, захватывая всю ширину геодинамически нарушенной зоны, ниже подошвы распространения техногенных образований на 2–3 м. При этом документировались состав пород, условия их залегания, характер деформаций.

Геодезические и визуальные наблюдения проводились по специально установленным грунтовым и стенным маркам. В процессе развития КСВ фиксировались изменения параметров трещин и очертаний воронки, проводились обследования отмоستок, стен и подвалов прилегающих зданий.

Наземные геофизические исследования включали тотальную сейсморазведку методом общей глубинной точки (МОГТ), электроразведочные (режимные вертикальные электрическое зондирования в модификации двух составляющих (ВЭЗ МДС)), гравиметрические и радиоволновые исследования.

Динамическое зондирование проводилось установкой УБП-15 на глубину до 8,0–16,5 м в 17 точках; по значениям лобового сопротивления конуса определялся модуль общей деформации.

Бурение скважин осуществлялось станком УРБ-3АМ. В целях изоляции смежных водоносных комплексов использовались обсадные колонны в интервале всей мощности отложений четвертичного и юрского возраста. Для лучшей сохранности керна бурение по закарстованному массиву велось укороченными рейсами безнасосным способом с внутренней циркуляцией промывочной жидкости (карстовых вод). Было пробурено пять скважин глубиной до 80 м. Они закладывались по результатам геофизических исследований, а одна непосредственно в образующейся воронке. По стандартным методикам были выполнены комплекс каротажа (КС, ПС, ГК, РХ, кавернометрия, резистивиметрия, термометрия), инженерно-геологическое и гидрогеологическое опробование, а также комплекс лабораторных анализов образцов и подземных вод.

По результатам бурения определялись интегральные показатели степени закарстованности, одновременно учитывающие степень трещиноватости, карстовой пустотности карбонатных толщ, зон дробления и процентное содержание заполненных карстовых полостей [7]:

$$K_3 = \frac{\sum m_{10} + \sum m_{по} + \sum m_{пз} + \sum m_p}{M}, \quad (1)$$

где m_{10} – высота столбиков керна пород менее 10 см, м; $m_{по}$ – высота открытой (незаполненной) карстовой полости, м; $m_{пз}$ – высота заполненной карстовой полости, м; m_p – высота разрушенной (раздробленной, дезинтегрированной) зоны, м. При этом отношение $\frac{\sum m_{10}}{M}$ является показателем степени пустотности.

Работы выполнялись ПГО «Гидроспецгеология» при участии ряда организаций Министерства геологии СССР, Госстроя СССР, Мосгорисполкома, АН СССР, Министерства нефтяной промышленности СССР и др. (порядка 15 организаций). Отношение к изучению КСП в г. Москве в 1980-е гг. было достаточно серьезным.

Результаты исследований

Использование впервые столь обширного комплекса методов позволило не только получить информацию о состоянии геологической среды, но и определить возможность и границы применимости каждого из них для оценки карстово-суффозионной опасности территории города [5, 7]. Полученные непосредственно на участке образования КСВ результаты инженерно-геологических исследований позволили предложить и обосновать механизм развития КСП в условиях г. Москвы [6].

Ниже рассматриваются наиболее информативные результаты изучения различными методами в последовательности, отражающей развитие и протекание самого процесса, т.е. снизу вверх – от очага его зарождения в карбонатных породах и перекрывающих их глин через водонасыщенную песчано-глинистую толщу до зоны аэрации и выхода на дневную поверхность.

По данным бурения и скважинной геофизики, наблюдается неравномерная трещиноватость и закарстованность карбонатного массива как в плане, так и по вертикали. Закарстованность выражена зонами трещиноватых и кавернозных пород, внутрипластовыми полостями, заполненными щебнем карбонатных пород, доломитовой мукой, песчано-глинистым материалом. Среди каверн встречаются открытые и заполненные, размер их составляет в среднем 0,2–3,0 см, иногда до 7,0 см, заполненные полости достигают высоты 7 м, открытые зафиксированы по провалам бурового инструмента – 1,4 м, в среднем – 0,1–0,4 м. Рассчитанные значения показателя степени закарстованности составили 72–86% по скважинам, находящимся в непосредственной близости и в проекции воронки, а по периферии исследуемого участка 34–56% (рис. 1).

Рис. 1. Схематическая карта состояния геологической среды. *Обозначения:* 1 – изолинии абсолютных отметок кровли разуплотненных пород по данным ВЭЗ МДС (штриховые линии – предполагаемые), 2 – изолинии абсолютных отметок подошвы разуплотненных пород со значениями модуля общей деформации менее 10 МПа по данным динамического зондирования, 3 – линейные трещиноватые зоны в карбонатных породах, выделенные по результатам сейсморазведки, 4 – линейные нарушения в карбонатных породах по данным ВЭЗ МДС, 5 – контур воронки, 6 – скважина, в числителе – ее номер, в знаменателе – мощность юрских глин (м), справа – значение показателя степени закарстованности (%)

Заполнитель карстовых полостей по разрезу исследован палинологически. Выявлен смешанный спорово-пыльцевой спектр, содержащий палинологический материал как юрского, так и четвертичного возраста. Отмечено резкое уменьшение содержания четвертичных пыльцы и спор вниз по разрезу с 234 зерен (интервал 65–67 м) до 81 (интервал 75–76 м), что подтверждает не только вертикальный характер, но и фильтрационную природу их переноса. Этот вывод получил подтверждение данными минералогического анализа дубликатов образцов карстового заполнителя (иммерсионный метод). В тяжелой фракции установлено присутствие минералов метаморфического и

магматического происхождения (гранат, дистен, ильменит, слюда, пироксен, эпидот, сидерит), содержание которых с глубиной резко уменьшается, а дисперсность песчаного заполнителя увеличивается. Следует также отметить, что гранулометрический состав песчаных пород нижней толщи четвертичных отложений и карстового заполнителя показывает их близкую схожесть. Это говорит о том, что дифференциации песчаных частиц по размеру в процессе их выноса под влиянием фильтрационных сил не происходит.

Исследованиями **методом ВЭЗ МДС** в карбонатных породах выявлены линейные нарушения, прослеживаемые с юго-востока на северо-запад и с юго-запада на северо-восток и пересекающиеся в 7 м от северного торца жилого дома (см. рис. 1). Пространственное положение линейных зон трещиноватости подтверждено сейсморазведкой МОГТ в комплексе с микросейсмокаротажем и вертикальным сейсмическим профилированием. Они диагонально пересекаются в проекции воронки, протягиваясь под торцевые части жилых зданий. Ширина зон составляет 10–12 м; повышенная закарстованность в их пределах подтверждается результатами буровых работ и межскважинного сейсмоакустического просвечивания. Максимальная закарстованность наблюдается в плоскости створа скважин № 4–5. Таким образом, установлено, что участок образования воронки приурочен к узлу двух взаимно пересекающихся линейных зон тектонического происхождения с максимальной закарстованностью карбонатных пород.

Значения условного градиента вертикальной фильтрации составили: в воронке и в непосредственной близости от нее – 3,3–4,5, а по периферии участка – до 2,7. Согласно результатам режимных гидрогеологических наблюдений максимальная амплитуда среднемесячных колебаний уровня подольско-мячковского водоносного горизонта составила 5 м, суточных – около 7 м (рис. 2).

Изучение физико-механических свойств глинистых отложений оксфордского яруса в пределах участка позволило выявить следующие закономерности. Так, по направлению к воронке увеличиваются: естественная влажность с 18–19 до 23–24%, пористость – с 33–34 до 39–40%, относительное объемное набухание с 5–6 до 9–10% при одновременном снижении числа пластичности с 15–16 до 13% за счет роста содержания песчаного материала. Такие же закономерности были выявлены в 1970-е гг. на аналогичных участках в рассматриваемом районе; установлено столь же резкое изменение свойств глинистых грунтов вблизи КСВ [20].

Анализ данных **ВЭЗ МДС** позволил выявить зону пониженных значений удельных электрических сопротивлений (УЭС) в обводненной части разреза. При фоновых значениях УЭС в 100–200 Ом·м в массиве зафиксирована зона с сопротивлениями порядка 2–16 Ом·м, имеющая форму купола с максимальным поперечником до 40–50 м. Песчано-глинистые породы с низкими значениями УЭС интерпретируются как сильно разуплотненные, что подтверждается характером бурения – свободное погружение бурового снаряда под действием

собственного веса. Режимные ВЭЗ МДС показали, что влажность и плотность естественного сложения практически полностью восстанавливаются после прекращения роста воронки уже через 4–5 месяцев.

Рис. 2. Графики водоотбора и изменения уровня подольско-мячковского водоносного горизонта в скважинах

Разуплотнение песчано-глинистых отложений отмечается и сейсморазведкой: в интервале «УГВ – карбонатный массив» наблюдается зона частотного затухания отраженных волн. Поперечник геодинамически нарушенной зоны вдоль сейсмического профиля, параллельного зданию № 1 (см. рис. 1) и проходящего через центр воронки, оценивается в 36 м.

Таким образом, комплексом методов зафиксированы заметные изменения физического состояния обводненной песчано-глинистой толщи, в которой выявлена аномальная зона в виде «купола разуплотнения», достигающего своей кровлей подошвы зоны аэрации.

В зоне аэрации впервые проведенным в г. Москве раскопом воронки (1987 г.) было доказано отсутствие искусственных пустот до глубины 5–6 м. Судя по особенностям залегания «культурного» слоя, ранее здесь имела место аналогичная воронка значительно меньшей амплитуды, что подтверждает существующее представление об унаследованности в их развитии.

По данным динамического зондирования, область повышенной разуплотненности песков зоны аэрации приурочена к воронке и протягивается под основание указанного здания, захватывая всю его ширину, причем зона разуплотнения имеет форму неправильного конуса с вершиной, обращенной вниз и упирающейся в кровлю «купола разуплотнения» (см. рис. 1). Сравнение результатов зондирования 1982 и 1987 гг. показало, что распределения

плотности песков до глубины 8–13 м аналогичны за исключением участка самой воронки и ее бортов в пределах 5–6 м.

Резюмируя вышеизложенное, можно сказать, что каждый метод дает представление о состоянии определенной части рассматриваемого разреза (точечное, линейное или площадное). Информация об изменениях физических полей, получаемая различными косвенными методами, может быть суммарной (осредненной) или строго локализованной, например, по литологическому признаку. Как видно из краткого описания, результаты комплексных исследований в целом дают полную картину состояния геологической среды на участке образования воронки.

Наряду с изучением общих инженерно-геологических условий участков проявления КСП большое значение имеют наблюдения за динамикой развития воронок и деформаций рядом расположенных зданий. Так, образовавшаяся 20 мая 1987 г. воронка первоначально представляла собой небольшое понижение, вытянутое в субмеридианальном направлении: ширина (a) – 8 м, длина (l) – 10 м, максимальная глубина (H) – 0,6 м. В дальнейшем, до конца июня, наблюдалось постепенное углубление со скоростью в среднем до 5–7 см/сут (рис. 3, сплошные линии), наиболее интенсивное оседание отмечено во время сильных дождей 15–16 июня – 45 см/сут. Максимальные размеры воронки: l – 12,5 м, a – 10,2 м, H – 2,65 м. До конца августа деформаций поверхности не отмечалось.

С 26 августа после планировки участка с воронкой в центральной ее части осуществлялось бурение скважины; с 30 августа началось постепенное оседание спланированной поверхности в пределах прежних границ воронки (см. рис. 3, штриховые линии). При этом образовались новые трещины отпора и расширились прежние (рис. 4).

К 15 сентября произошло замыкание всех систем трещин по периферии воронки, с 20 сентября рост трещин не наблюдался, 2 октября оседание прекратилось. Максимальные размеры вторично активизировавшейся воронки составили: l – 9,45 м, a – 8,0 м, H – 0,61 м, т.е. воронка не вышла за пределы прежних границ. Наибольшие деформации (рост трещин, амплитуда оседания) приходятся на период бурения в карбонатных породах. Анализ технологического режима бурения и кинетики роста воронки показал, что основной причиной резкого увеличения скорости деформаций является значительная динамическая нагрузка на покровную толщу за счет вибрации бурового станка массой около 16 т. По окончании бурения (20.09.1987) деформации прекратились.

В конце мая 1988 г. произошло повторное оживление воронки, которое было спрогнозировано автором с коллегами в результате исследований 1987 г. Оседание составило 20–30 см, диаметр достиг 20 м, причем западный край воронки захватил отмостку здания № 1.

Рис. 3. Кинетика развития карстово-суффозионной воронки. Обозначения: сплошные линии – углубление воронки, штриховые линии – оседание спланированной поверхности в пределах прежних границ воронки

Рис. 4. Кинетика развития систем трещин воронки. Обозначения: 1 – северная, 2 – южная, 3 – восточная, 4 – западная экспозиция воронки

Механизм образования КСВ

В результате комплексных инженерно-геологических исследований на северо-западе г. Москвы был описан механизм образования КСВ [5, 6, 9], который заметно отличается от предложенных ранее, и в несколько уточненном виде представлен ниже. Так, резкие скачки уровня подземных вод в каменноугольных отложениях (рис. 5) до 5–7 м/сут приводят к двум процессам, разрушающим глинистый экранирующий слой: аэродинамическому и гидродинамическому разрушению.

Рис. 5. Схема образования КСВ

Первый тип разрушения глинистых грунтов происходит в случае снижения уровня карстовых вод ниже кровли карбонатного массива примерно на 1–5 м за счет возникновения так называемого «вакуумного» эффекта, влияние которого неоднократно наблюдалось в режимных скважинах в периоды проведения мощного водоотбора в исследуемом районе г. Москвы. Из-за резкого всасывания воздуха было крайне затруднительно закрыть устье скважины с помощью оголовника. Велика вероятность, что давление всасывания концентрируется в местах подводящих каналов в карбонатных породах, упирающихся снизу в

глинистый экран. На важность учета «вакуумного» эффекта указывается в работе [4]; китайские геологи также отводят большую роль «вакуумного поглощения» в образовании провалов и оседаний [15].

Второй тип разрушения (аэродинамический и гидродинамический) происходит вследствие восстановления уровня, когда подземные воды, не достигнув подошвы относительно водоупорных глин, создают избыточное давление сжатыми газами, а достигнув, – действием трещинно-карстовых вод. В этом случае в режимных скважинах наблюдается выход мощной струи воздуха [9]. Наибольшему давлению подвергаются все те же места подводящих каналов к подошве глинистых отложений, размеры которых могут быть невелики от первых до десятков см, называемые **«работающими трещинами или каналами»** в работе [12].

Разрушение глин связано с многократными (циклическими) повторениями этих двух типов разрушения в течение длительного времени – годы и десятки лет на фоне мощных откачек из трещинно-карстовых вод, сопровождающихся резкими скачками уровня (до 7 м/сут). Процесс разрушения (размягчение, размыв и т.п.) глин протекает эффективнее на участках, где глинистые отложения обладают более слабыми физико-механическими свойствами и повышенной трещиноватостью, содержат большое количество обломочного материала, а также на участках с древними карстовыми провалами, где глинистый слой был когда-то разрушен и в настоящее время является ослабленным. Разрушение глинистого слоя и вынос глинистых частиц в закарстованный массив подтверждается данными палинологического анализа, полученными автором с коллегами. Спорово-пыльцевой анализ заполнителя карстовых полостей и трещин показал их наличие на глубинах 70–80 м и глубже, т.е. ниже подошвы их залегания на 25–30 м и более, что подтверждает фильтрационную природу.

Под действием градиента вертикальной фильтрации через нарушение в водоупоре происходит прорыв грунтовых вод и песка четвертичного возраста в закарстованный карбонатный массив. В связи с этим над указанной зоной нижняя часть песчаной толщи оказывается разуплотненной. Далее процесс развивается снизу вверх, захватывая все новые части разреза. В водоносной части четвертичных отложений формируется своеобразный «купол разуплотнения». По достижении «куполом» УГВ начинается перераспределение масс песков зоны аэрации, где формируется «конус разуплотнения» с обращенной вниз вершиной, над которым, собственно, и образуется воронка оседания. Такая геометрия подтверждается комплексом геофизических методов, бурением скважин и динамическим зондированием.

Размеры и скорость развития воронки определяются в основном положением пьезометрической поверхности и амплитудой многократных длительных резких колебаний уровней подземных вод в каменноугольных отложениях, глубиной залегания УГВ, наличием глинистых прослоев в покровной толще, их мощностью и глубиной залегания, а также объемом

песчаного материала, способного выноситься в закарстованный массив. **Размеры КСВ в данном случае не зависят от мощности перекрывающих юрских или верхнекаменноугольных глинистых пород;** их мощность и свойства влияют на время протекания аэродинамического и гидродинамического разрушения защитного слоя. Следует отметить, что все детерминистские методы расчетов используют параметр мощности глинистого слоя для оценки диаметров провалов или воронок.

На взгляд автора, если бы не были прекращены мощные откачки из трещинно-карстовых вод более 30 лет назад, КСВ в настоящее время могли бы образовываться и на участках, где мощность юрских и верхнекаменноугольных глин заметно превышает 5 м. Вопрос лишь во времени разрушающего воздействия на глины снизу вверх.

Рост самой КСВ может длиться до одного-двух месяцев, т.е. в московском регионе имеет место не быстрое провалообразование, а относительно медленное карстово-суффозионное оседание. К настоящему времени еще не разработана расчетная математическая модель, адекватно описывающая предложенный механизм протекания КСП, что объясняется его сложностью, когда необходимо учитывать аэродинамическое и гидродинамическое давление, циклический характер воздействий на относительно водоупорный глинистый слой, объем **эффективной пустотности** закарстованного массива, способного принимать песчаный материал.

В настоящее время не наблюдается развития КСП, что связано с отсутствием мощных откачек из трещинно-карстовых вод и резких скачков их уровней, с восстановлением пьезометрических уровней выше кровли карбонатного массива, а также с залечиванием нарушений в глинистом экранирующем слое за счет их пластичности. Это, в свою очередь, является в некотором смысле «запасом прочности» для выбранного критериального критического значения мощности глинистого экрана (5 м) при оценке опасности КСП в Москве [9].

Список литературы

1. Аникеев А.В. Моделирование провалообразования в песчаной покровной толще закарстованного массива // Сборник научных трудов «Геологические исследования литосферы» / Отв. ред. В.М. Моргалев. М.: Наука, 1988. С. 52–56.
2. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М.: Изд-во РУДН, 2017. 328 с.
3. Давыдько Р.Б., Толмачев В.В. О моделировании механизма карстовых провалов // Труды ПНИИИС. 1977. Вып. 47. С. 123–133.
4. Кожевникова В.Н. Особенности механизма образования просадок и провалов в результате изменений гидрогеологических условий закарстованных территорий // Прогноз изменения гидрогеологических

- условий застраиваемых территорий: сборник научных трудов ПНИИС / Под ред. И.Я. Пантелеева. М.: Стройиздат, 1980. С. 116–132.
5. Кочев А.Д. Комплексная оценка состояния геологической среды на участке карстово-суффозионной воронки в г. Москве // Материалы 15 научной конференции молодых ученых геологического факультета МГУ. Секция «Грунтоведение, инженерная геология и охрана геологической среды». М.: Изд-во МГУ, 1988. С. 97–104.
 6. Кочев А.Д. Опыт изучения механизма образования карстово-суффозионной воронки в условиях крупного города // Тезисы докладов регионального совещания «Проблемы изучения техногенного карста». Кунгур, 1988. С. 78–79.
 7. Кочев А.Д. Факторы и условия развития карстово-суффозионных процессов на территории г. Москвы // Инженерные изыскания. 2019. Т. 13. № 5–6. С. 8–20. <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2019-13-5-6-8-20>.
 8. Кочев А.Д., Чертков Л.Г., Зайонц И.Л. Карстово-суффозионные процессы на территории г. Москвы и проблема оценки их опасности // Инженерная геология. 2018. Т. 13. № 6. С. 24–32. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-6-24-32>.
 9. Кочев А.Д., Чертков Л.Г., Зайонц И.Л., Афанасьев В.Ю. Методика и результаты комплексного изучения карстово-суффозионных процессов в г. Москве // Инженерная геология. 1989. № 6. С. 77–94.
 10. Кутепов В.М. Формирование напряженного состояния массивов горных пород на закарстованных территориях // Инженерная геология. 1983. № 1. С. 67–81.
 11. Кутепов В.М., Кожевникова В.Н. Устойчивость закарстованных территорий / Отв. ред. П.Ф. Шевцов. М.: Наука, 1989. 149 с.
 12. Лехов А.В. Моделирование карстового процесса // Тезисы докладов Всесоюзного совещания «Строительство на закарстованных территориях». М.: НИИОСП, 1983. С. 3–4.
 13. Мартин В.И., Травкин А.И. Моделирование карстовых провалов и прогноз устойчивости закарстованных территорий для строительства // Тезисы докладов научно-технического семинара «Моделирование формирования суффозионных и карстовых полостей» / Отв. ред. В.Е. Закоптелов. Пермь, 1979. С. 18–20.
 14. Парфенов С.И., Кутателадзе И.Ф. О поверхностных проявлениях карста в Москве // Сборник статей «Вопросы изучения режима подземных вод и инженерно-геологических процессов» / Под ред. В.И. Савченко. М.: Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1976. Вып. 108. С. 70–73.
 15. Печеркин И.А. Механизм и динамика карстовых деформаций // Тезисы докладов научно-технического совещания «Методика инженерно-геологических и гидрогеологических исследований карстовых областей в связи с промышленным и городским строительством» / Под ред. И.А. Печеркина. Пермь, 1988. С. 3–6.
 16. Толмачев В.В., Давыдько Р.Б., Хоменко В.П. Экспериментальное изучение механизма карстовых деформаций // Тезисы докладов научно-технического

- семинара «Моделирование формирования суффозионных и карстовых полостей». Пермь, 1979. С. 24.
17. Толмачев В.В., Карпов Е.Г., Хоменко В.П. Механизм деформаций горных пород над подземными карстовыми формами // Инженерная геология. 1982. № 4. С. 46–59.
 18. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
 19. Хоменко В.П., Зиангиров Р.С. Экспериментальное изучение закономерностей формирования провалов в песках, перекрывающих карстовые полости // Инженерная геология. 1981. № 2. С. 72–84.
 20. Чертков Л.Г. Карстовые и суффозионно-провальные явления на территории г. Москвы и методика их инженерно-геологического изучения: автореф. дис. ... канд. геол.- мин. наук. М.: МГУ, 1984. 22 с.

A.D. Kochev

Institute Transprojectengineering LLC, Moscow, a.kochev@mail.ru

STUDYING THE MECHANISM OF THE FORMATION OF THE KARST-SUFFUSION FUNNELS IN MOSCOW

Abstract. Until the end of the 1980s about 42 karst-suffusion funnels were formed in Moscow. The study of the mechanism of their formation was based on the methods of physical modeling using equivalent materials and the development of deterministic computational mathematical models. The results obtained were used to assess the stress-strain state of karst areas and the parameters of deformations on the earth surface. At the same time, the researchers proposed various mechanisms of the process. When calculating the diameters of karst-suffusion sinkholes and funnel the value of the thickness relative to impermeable clays separating the carbonate massif and covering deposits was used everywhere. The paper proposes a new view of the mechanism of karst-suffusion processes, based on the results of complex engineering-geological studies carried out directly in the areas of funnels' formation. The mechanism consists in the destruction of clays from the bottom up under the action of cyclic aerodynamic and hydrodynamic loads caused by sharp fluctuations in the level of fractured-karst waters due to significant pumping. In this case, the thickness of the clays does not affect the size of the funnels on the earth surface.

Key words: karst-suffusion processes; complex engineering-geological studies; mechanism of formation of sinkholes and funnels; modeling; carbonate massif; relatively impermeable clays; “vacuum” effect; karstification; fracturing.

Петров Н.Ф., Никонорова И.В.

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, историко-географический факультет, кафедра
физической географии и геоморфологии, г. Чебоксары, petrovnf@gmail.com, niko-inna@yandex.ru

НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ К ОБЪЕМАМ ПОНЯТИЙ И К ТЕРМИНОЛОГИИ СКЛОНОВЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ДВИЖЕНИЙ ГОРНЫХ ПОРОД

Аннотация. Рассмотрены истоки некоторых негативных явлений в современном оползневедении, примеры несоответствия определений многих понятий их содержанию, сущности явлений. Обращено внимание на жесткую связь качества проектно-изыскательских работ с качеством нормативных технических документов (НТД) особенно в условиях диктатуры экспертизы и падения доверия к изыскателям. Подчеркнута особая вредность для строительства сохранения в новых устаревших положений прежних НТД, не соответствующих современным достижениям науки о склоновых процессах. Ситуация демонстрируется примерами из свода правил, насыщенного архаичными представлениями о принципиальных для научного оползневедения понятиях: «оползень», «оползневой процесс», «оползневой механизм», и фактом возвышения «Схемы типизации оползней» И.О. Тихвинского в ранг «Классификации оползневых процессов», хотя сам автор схемы таковой ее не считал.

Ключевые слова: объект и предмет оползневедения; оползневой процесс; оползневая система (ОС); границы и структурные элементы ОС; стенка срыва и ложе оползня; потенциальная и кинетическая энергии обвальных и оползневых масс (каменных лавин); зона транзита каменных лавин.

Введение

Авторское мнение по ключевым принципам оползневедения – науки о геологических опасностях, их прогнозе, предупреждении и защите от их разрушительных последствий, должно быть известно заинтересованной публике по многочисленным авторским публикациям за 1980–2020 гг. [6–8], и, казалось бы, нет причин в нападении о них сегодня. Но трудно оставаться равнодушными к таким материалам, как оценка устойчивости правобережья р. Волги (водохранилища) для строительства здесь нового моста для дороги «Москва – Нижний Новгород – Казань», или к недавно опубликованному СП 420.1325800.2018 [12], которые остались в методологическом отношении на уровне оползневедения 30–40-летней давности. В них нет даже намека на изучение внутреннего строения оползней.

Возникает вопрос: неужели авторы этих документов, принадлежащие, очевидно, к довольно властной группе ретроградов, не способны осознать тот наносимый проектно-изыскательскому сообществу и строительству вред, тормозя сознательно или бессознательно проникновение в науку об опасных склоновых процессах новых созидательных идей и разработок особенно из области структурного оползневедения, как основы для составления корректных расчетных моделей? Этот вред исчисляется миллионами средств из-за принятия

некомпетентно принятых проектных решений. Данное сообщение продиктовано желанием еще раз обратить внимание специалистов на связь многих бед в проектно-изыскательском деле с диктатом геотехнического подхода и несовершенных нормативных технических документов (НТД), на необходимость повышения роли и качества проектно-изыскательских работ, касающихся проблем оценки устойчивости склонов и откосов, не путем ужесточения контроля за изысканиями, не повышением роли экспертизы, а путем поощрения повышения профессионализма, чести и ответственности изыскателя за качество полевых материалов, за повышение и осознание решающей роли инженерно-геологической составляющей в решении проблемы устойчивости склонов (сегодня господствует геотехника).

Материалы и дискуссия

Ниже приведены *основные понятия оползневедения*, сформулированные одним из авторов публикации в 1980-е гг. в процессе разработки Единой универсальной классификации оползней (ЕУКО). К ним относятся определения «объекта» и «предмета» оползневедения, понятий «оползневой механизм» и «оползневой процесс», определяющие стратегию оценки устойчивости и выбор мер по стабилизации оползней [6].

Оползень (объект оползневедения) – специфическое геологическое тело или система горнопородных тел с определенными структурными, функционально-динамическими и другими свойствами и отношениями, формирующимися при оползневом процессе.

Оползневой процесс (объект оползневедения у авторов свода правил (СП)) – процесс отделения (*отрыва*) части горных пород, слагающих склоновый массив, и последующего его смещения в пределах ложа с образованием *стенки срыва* и последующего его смещения в *пределах ложа с сохранением материальной связи* с геологической средой. Такое определение отличает оползни не только от обвалов, осыпей, но и от десерпции, курума, солифлюкции и др. Признак «в пределах ложа» позволяет отличать оползни и от «каменных лавин» [1, 12, 14], функционирующих за пределами ложа.

Оползневой механизм (предмет оползневедения) – система оползневых тел, взаимодействующих между собой путем соприкосновения и совершающих определенные движения друг относительно друга и неподвижного ложа. Такой оползневой механизм представляет собой модель фактического оползня с познанной структурой, его сущностью.

Раньше механизм определялся так (Е.П. Емельянова [2], Г.К. Бондарик) – движение геосистемы (оползня) – «последовательная смена ее (его) состояний».

До авторских работ в определении «оползневого процесса» основной фразой была – движение «без потери контакта» с ложем, хотя давно доказано, что к этому признаку следует добавить новые признаки, такие как, например, «отрыв» и «смещение в пределах ложа, образуя стенку срыва и сохраняя

материальную связь с геологической средой». Но в СП 420.1325800.2018 [12], к сожалению, сохранена старая редакция «оползневого процесса» из СП 11-105-97 [11].

На фоне вышесказанного – *главное замечание к обоим СП*: в них отношение к оползням строится как к безликим оползневым процессам (геотехнический подход), а не как к специфическим геологическим телам и комплексам тел оползневого происхождения, как к результатам оползневых процессов. Ведь каждому известно, что *инженеры-изыскатели* (геодезисты, геологи и др.) в полевых условиях имеют дело *не с процессами*, а с результатами этих процессов – *оползневыми телами*, их строением, структурой, составом и состоянием, их формой и размерами, многими другими особенностями, *позволяющими* в комплексе с особенностями геологической среды склонового (приоткосного) массива и его обрамления (выше и ниже склона) понять механизм образования оползня, его генезис, *оползневой процесс* [3, 4, 5, 10, 13]. С этих позиций СП 420.1325800.2018 [12] отражает вчерашний день оползневедения. Он не содержит названий и определений структурных элементов оползней, не учит изыскателей картировать оползневые системы, распознавая их части в полевых условиях, т.е. изучать их на современном уровне и составлять на этой основе более совершенные расчетные модели.

В материалах инженерно-геологических изысканий для моста автомобильной дороги через р. Волгу (Куйбышевского водохранилище) таких материалов обнаружить не удалось! И задачи по оценке устойчивости здесь решались на сомнительных расчетных моделях, хотя с геотехнических позиций внешне все выглядит солидно.

Таким образом, первую задачу в процедуре оценки устойчивости (составление наиболее приемлемой расчетной модели) СП 420.1325800.2018 [12] не решает. Не решает СП и вторую задачу (выбор или *назначение расчетных сдвиговых параметров грунтов зоны действительного или прогнозного смещения*), и третью задачу (выбор расчетного метода). Вернее, в СП 420.1325800.2018 [12] последняя задача решена даже хуже, чем в СП 11-105-97 [11] с явным ущемлением отечественного опыта в разработке расчетных методов в пользу зарубежных, не обладающих никакими преимуществами. Явно недостаточно уделено внимание методам конечных элементов, условиям их применения.

К существенным недостаткам анализируемых документов можно отнести почти полное игнорирование ими *компонентно-элементного состава оползневых систем*, как существенной части «структурного оползневедения» – нового направления в науке об оползнях, без которых в принципе невозможно составить корректные расчетные модели [14, табл.].

Не менее важен в строительных целях *учет таксономического аспекта* при изучении оползней. И это не случайно. Во многих науках о Земле (минералогия, петрография и др.) наиболее принципиальные вопросы сосредотачиваются в таксономическом аспекте [7, 9], отражая их теоретическую зрелость. Не является исключением и наша наука. Речь идет о номенклатурном

уровне (точности) определении природных оползней в процессе их полевых исследований с точностью до класса и подкласса, группы и подгруппы, типа и подтипа. В принципе, чем точнее определен таксон оползня, тем точнее и расчетная модель, и результаты расчетов.

Следует обратить внимание и еще на одну из особенностей оползней – на их приуроченность к ложу в отличие от других склоновых процессов. С учетом этой особенности основные типы склоновых процессов можно охарактеризовать так. Оползни – отрыв и смещение в пределах ложа; обвал – отрыв и падение, опрокидывание, качение, движение за пределами ложа – каменная лавина; оползень-обвал – отрыв, смещение в пределах ложа, (оползание), падение и движение (за пределами ложа), каменная лавина. Таким образом, каменная лавина как поток глыбово-щебнистых сухих и влажных масс – самостоятельное гравитационное образование, имеющее оползневое и обвальное происхождение и особенные закономерности движения и распространения, тесно связанные с ландшафтом [13, 14].

Заключение

Необходимо отметить, что нельзя наивно думать, что возможна успешная деятельность в области изучения и прогнозирования склоновых процессов в практических целях, не разобравшись в их научной классификации, в их строении и типах движения, в простых и сложных оползневых системах. Разработанный авторами ЕУКО – основа для составления корректных расчетных моделей, т.к. построению такой модели предшествует процедура распознавания в поле изучаемого оползня как системы с позиций ее принадлежности к одному из известных таксонов ЕУКО по механизму (по строению и движению). Составленная графическая схема механизма искомого оползня и есть основа его расчетной модели.

Авторы надеются, что предложенные разработки помогут изыскателям на всех стадиях работ, начиная с обследования территории и завершая составлением окончательного технического отчета по результатам проведения инженерно-геологических изысканий не допускать те просчеты, которые рассматривались на примере двух объектов моста через р. Волгу и СП 420.1325800.2018 [12].

Список литературы

1. Анисимова Н.Г., Бурова В.Н., Викторов А.С. и др. Природные опасности России. Т. 3. Экзогенные геологические опасности / Под. ред. В.М. Кутепова, А.И. Шеко. М.: КРУК, 2002. С. 263–288.
2. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов. М.: Недра, 1972. 310 с.
3. Золотарев Г.С. Инженерная геодинамика. М.: Изд-во МГУ, 1983. 328 с.

4. Инженерная геология России. Т. 2. Инженерная геодинамика территории России / Под ред. В.Т. Трофимова и Э.В. Калинина. М.: КДУ, 2013. 816 с.
5. Пендин В.В., Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. М.: ЛЕНАНД, 2015. 320 с.
6. Петров Н.Ф. Оползневые системы. Сложные оползни. Кишинев: Штиинца, 1988. 226 с.
7. Петров Н.Ф. Характеристика номенклатурных таксонов оползневых систем // Материалы конференции «Эколого-геоморфологические исследования (Арчиовские чтения–2015)». Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. С. 46–65.
8. Петров Н.Ф., Никонорова И.В. Структурные компоненты оползней, проблемы их картирования и составления корректных расчетных моделей // Материалы Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». М.: Геомаркетинг, 2019. С. 24–31.
9. Петров Н.Ф., Никонорова И.В., Никитина О.В. Структурное оползневедение: аспекты классификации. Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 2017. 218 с.
10. Проблемы классифицирования склоновых гравитационных процессов / Отв. ред. М.В. Чуринов, Е.А. Толстых. М.: Наука, 1985. 204 с.
11. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов.
12. СП 420.1325800.2018 Инженерные изыскания для строительства в районах развития оползневых процессов. Общие требования.
13. Стром А.Л. Оценка размеров возможных областей поражения каменными лавинами в горных и предгорных районах // Материалы Общероссийской научно-практической конференции «Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях». М.: Геомаркетинг, 2021. С. 43–50.
14. Хромовских В.С. Каменный дракон. М.: Мысль, 1984. 156 с.

N.F. Petrov, I.V. Nikonorova

Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, petrovnf@gmail.com, niko-inna@yandex.ru

SOME REMARKS ON THE SCOPE OF CONCEPTS AND ON THE TERMINOLOGY OF SLOPE GRAVITATIONAL MOTIONS OF ROCKS

Abstract. The sources of some negative phenomena in modern landslide science, examples of inconsistency of definitions of many concepts with their content, the essence of the phenomena are considered. Attention is drawn to the tight connection between the quality of design and survey work

and the quality of normative technical documents (NTD), especially in the context of the dictatorship of expertise and the decline in trust in prospectors. The publication emphasizes the special harmfulness for the construction of preserving in the new NTD the outdated provisions of the previous NTD, which do not correspond to the modern achievements of science on slope processes. The situation is illustrated by examples from the joint venture, saturated with archaic ideas about concepts that are fundamental for scientific landslide studies: “landslide”, “landslide process”, “landslide mechanism”, and the fact of the rise of the “Landslide typification scheme” by I.O. Tikhvinsky to the rank of “Classification of landslide processes”, although the author of the scheme did not consider it as such.

Key words: landslide science object and subject; landslide process; landslide system (LS); boundaries and structural elements of the LS; main scarp and landslide bed; potential and kinetic energies of landslide masses (rock avalanches); zone of transit of rock avalanches.

Куропаткина Т.Н., Любимова Т.В.

Кубанский государственный университет, Институт географии, геологии, туризма и сервиса, кафедра нефтяной геологии, гидрогеологии и геотехники, г. Краснодар, kharchenkotanya@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ УЧАСТКА ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

Аннотация. В настоящее время в практике инженерно-геологических изысканий отсутствуют специальные тектонические исследования, позволяющие в полной мере учесть особенности инженерно-геологических условий территорий с горно-складчатым строением. В работе на примере участка побережья от г. Геленджика до г. Туапсе приводится оценка активности приповерхностных разрывных структур низкого ранга, оказывающих влияние на условия строительства. Проведено геодинамическое районирование территории с выделением разноуровневых блоков, формирующих восемь морфоструктурных зон. Выполненное исследование существенно уточнило плановое расположение разрывных структур и уточнило неотектоническое строение изучаемой территории.

Ключевые слова: геодинамическое районирование; морфотектонический анализ; инженерная геотектоника.

Интенсивное освоение Черноморского побережья Краснодарского края показало, что при проведении инженерно-геологических изысканий специалисты сталкиваются с необходимостью обнаружения, картирования и оценки активности разрывных нарушений, в первую очередь, трасс линейных сооружений. В связи с этим исследование приповерхностных разрывных структур, получивших орографическое выражение, в ходе оценки инженерно-геологических условий на разных стадиях проектирования является важным и актуальным.

В традиционном подходе к инженерно-геологическому районированию тектонические структуры используются только для обособления наиболее крупных таксонов – инженерно-геологических регионов, которые отражают наиболее существенные различия в строении земной коры, наборе формаций, степени дислоцированности и т.д. [4]. В работе рассматривается участок Черноморского побережья от г. Геленджика до г. Туапсе, орографически принадлежащий Афипско-Дефановской ступени, которая на западе ограничена поперечным Геленджикским, а на востоке – Туапсинским разломами [5]. По типу складчатости – это Новороссийский морфоструктурный район низкогорного складчатого рельефа, развитый в условиях пликтивно-дизъюнктивных дислокаций мел-палеогеновых пород флишевой формации южного склона Северо-Западного Кавказа. Таким образом, территория оказывается в пределах одного крупного таксона и обособление тектонических структур более низкого ранга требует разработки специальной методики.

В работе предложена следующая методика, базирующаяся на структурно-геоморфологическом анализе данных.

1. Картографический анализ в геоинформационной системе ArcGis (создание векторной модели эрозионной сети, расчет морфометрических характеристик). Анализ карты густоты (горизонтальное расчленение) рельефа, карты глубины (вертикальное расчленение) и карты общего расчленения рельефа, построенных по общепринятым методикам [2, 6] позволил определить степень однородности рельефа как одного из главных компонентов инженерно-геологических условий.

2. Инженерно-тектонический анализ с выявлением разномасштабных разрывных структур, делящих Афиписко-Дефановскую орографическую ступень на более мелкие блоки. Метод базируется на представлении о том, что рельеф является тектонически активным, не измененным существенно денудацией [3]. В таком случае картографическая количественная оценка новейших вертикальных смещений выявленных блоковых структур проводится путем сопоставления абсолютных отметок вершин и водоразделов. Это позволяет выявить сопоставимые по масштабному рангу, гипсометрически обособленные блоки или группы сопряженных блоков.

3. Инженерно-геодинамическое районирование территории проведено исходя из величины картографически оцениваемых новейших относительных вертикальных смещений смежных блоков. Межблоковые разломы по такой количественной оценке могут подразделяться на весьма активные (с амплитудой в 300 м и более от разницы отметок вершин водоразделов), активные (с амплитудой 200–300 м) и рядовые (с амплитудой до 300 м от разницы отметок вершин водоразделов).

Полученные результаты показали, что, исходя из выполненной оценки рельефа, можно выделить пять категорий участков с различными показателями расчлененности рельефа. Установленная категоричность показывает усложнение инженерно-геологических условий территории за счет увеличения элементов рельефа. При этом отмечается общее усложнение рельефа с запада на юго-восток, что хорошо коррелируется с усложнением строения Новороссийского синклиория и увеличением количества выпадаемых атмосферных осадков в этом же направлении.

Результатом инженерно-тектонических построений послужила карта тектонических блоков с выделенными на ней разрывными нарушениями низкого (IV) ранга. На основе данной карты выполненное инженерно-геодинамическое районирование позволило выделить восемь морфоструктурных зон (рис.), которые имеют следующие уровни абсолютных отметок (H): 0–100; 100–200; 200–300; 300–400; 400–500; 500–600; 600–700; 700–800 и 800–900 м.

Построенная схема инженерно-геодинамического районирования существенно детализирует представление о тектоническом строении изучаемого отрезка Черноморского побережья Краснодарского края и согласуется с имеющейся информацией по ее неотектоническому строению южного склона Северо-Западного Кавказа [1].

Рис. Схема инженерно-геодинамического районирования.
Условные обозначения по принципу «светофора»

Предлагаемая схема использования комплекса методов для оценки инженерно-тектонического строения горно-складчатых территорий отвечает требованиям, предъявляемым на разных стадиях инженерно-геологических изысканий, начиная от этапа подготовки документов территориального планирования и до подготовки проектной документации. Внедрение подобных превентивных исследований позволит сократить затраты на оценку влияния тектонической обстановки на условия строительства и эксплуатации зданий и сооружений. Результаты работы могут служить основой для выбора оптимальной методики инженерных изысканий, а также оценки предполагаемых рисков, связанных с наличием активных разрывных структур.

Список литературы

1. Несмеянов С.А. Неоструктурное районирование Северо-Западного Кавказа: опережающие исследования для инженерных изысканий. М.: Недра. 253 с.
2. Орлова А.В. Блочные структуры и рельеф. М.: Недра, 1975. 232 с.
3. Пиотровский М.В. Морфометрический ряд форм рельефа и тектонических структур // Вопросы географии. 1992. С. 12–19.
4. Попов И.В. Инженерная геология СССР. Ч. IV. Кавказ. М.: Изд-во МГУ, 1971. 246 с.

5. Трихунков Я.И. Неотектонические преобразования кайнозойских складчатых структур Северо-западного Кавказа // Геотектоника. 2016. № 5. С. 67–81.
6. Философов В.П. Основы морфометрического метода при поисках тектонических структур. Саратов: Изд-во Саратовского университета. 232 с.

T.N. Kuropatkina, T.V. Lyubimova

Kuban State University, Krasnodar, kharchenkotanya@mail.ru

RESEARCH OF THE TECTONIC FEATURES OF THE BLACK SEA COAST AREA OF THE KRASNODAR REGION DURING ENGINEERING-GEOLOGICAL SURVEYS

Abstract. Currently, in the practice of engineering-geological surveys, there are no special tectonic studies that allow to fully take into account the peculiarities of the engineering-geological conditions of territories with a mountain-folded structure. In this work, on the example of the coastal area from Gelendzhik to Tuapse, an assessment of the activity of near-surface fracture structures of a low rank, influencing the construction conditions, is given. Geodynamic zoning of the territory was carried out with the identification of different-level blocks that form eight morphostructural zones. The study carried out significantly refined the planned location of the ruptured structures and refined the neotectonic structure of the study area.

Key words: geodynamic zoning; morphotectonic analysis; engineering geotectonics.

СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ»

**Ковалев А.Н., Блужина А.С., Вихарева Р.В., Слепухин Е.А.,
Селифонов А.В.**

ФАУ «Главгосэкспертиза России», г. Москва, a.kovalev@gge.ru

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ БАЗЫ ДАННЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ В ФОРМЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Аннотация. Формирование единой цифровой платформы топографической информации – одна из наиболее актуальных задач при переходе строительной отрасли на технологии информационного проектирования. Внедрение прогрессивных технологий в методы проведения инженерно-геодезических изысканий не ограничивается применением современного геодезического оборудования и технологий и совершенно не решает вопрос накопления результатов инженерных изысканий для последующего использования. Задачи цифровизации строительной отрасли предъявляют дополнительные требования к инженерным изысканиям. На сегодняшний день необходимо не просто получать актуальную информацию о ситуации и рельефе местности, элементах планировки, проявлениях опасных природных процессов и факторов техногенного воздействия, но получать ее в сжатые сроки. Создание цифровой платформы базы данных инженерных изысканий в формате информационной модели позволит решить данную проблему.

Ключевые слова: цифровая платформа базы данных инженерных изысканий; цифровизация; инженерные изыскания; BIM; информационная система обеспечения градостроительной деятельности.

Одна из ключевых задач при выполнении инженерных изысканий – получение необходимых материалов и исходных данных. Например, при выполнении инженерно-геодезических изысканий необходим сбор, систематизация и анализ ранее выполненных материалов: топографо-геодезических, аэрофотосъемочных, материалов дистанционного зондирования Земли, землеустроительных и других фондовых (архивных) материалов и данных. Необходим сбор и анализ информации о геоморфологии, гидрографии, получение сведений о наличии опасных природных и техногенных процессов, влияющих на формирование рельефа, получение необходимой информации о глубине промерзания грунтов [5]. Для повышения достоверности результатов инженерных изысканий требуется располагать достоверной информацией требуемого содержания и соответствующего формата, полученной в сжатые сроки.

Нормативный технический документ, действовавший достаточно длительное время, а именно, в период с 01.09.1990 по 31.12.2017 ГКИНП-17-002-90 «Инструкция о государственном геодезическом надзоре СССР» [1] устанавливал, в т.ч. порядок регистрации и учета производимых на территории

СССР аэросъемочных, топографо-геодезических и картографических работ, систематизацию и хранение результатов и материалов по этим работам для их использования в интересах отраслей народного хозяйства, науки и обороны страны, а также учет производимых на территории СССР космических фотосъемок. На практике получить исчерпывающую и необходимую топографо-картографическую информацию об участке и районе работ с учетом сжатых сроков не представлялось возможным.

В настоящее время состояние государственного картографо-геодезического фонда (КГФ) Российской Федерации, его полнота и доступность, наличие в нем материалов и данных, а также оперативность предоставления заинтересованным лицам информации по наличию материалов и данных в фондах, не соответствуют современным требованиям.

Законодательное регулирование фондов субъектов Российской Федерации (региональные КГФ), органов муниципального управления (муниципальные КГФ) и картографо-геодезических фондов юридических лиц (корпоративные или частные КГФ) отсутствует, и объединение фондов в единую информационную систему не реализовано [4].

Пункт 2 положения о выполнении инженерных изысканий для подготовки проектной документации, строительства, реконструкции объектов капитального строительства, утвержденное постановлением Правительства РФ № 20 от 19.01.2006 [2], содержит следующие сведения: «Инженерные изыскания выполняются в соответствии с требованиями технических регламентов, а также с учетом материалов и результатов инженерных изысканий, которые хранятся в государственных информационных системах обеспечения градостроительной деятельности».

Информационная система обеспечения градостроительной деятельности – это организованный в соответствии с требованиями Градостроительного кодекса РФ [6] систематизированный свод документированных сведений о развитии территорий, их застройке, о земельных участках и иных сведений, необходимых для обеспечения органов государственной власти, органов местного самоуправления, физических и юридических лиц достоверной информацией, необходимой для осуществления градостроительной, инвестиционной и иной хозяйственной деятельности, включающий в себя материалы в текстовой и графической формах.

Тем не менее, материалы и результаты инженерных изысканий, которые хранятся в государственных информационных системах обеспечения градостроительной деятельности, очень часто не учитываются.

Действующая редакция Градостроительного кодекса РФ [6] не ограничивает права юридических и физических лиц создавать и вести свои информационные системы для осуществления градостроительной деятельности. В частности, к таким градостроительным информационным системам, относятся современные системы класса BIM (building information modeling).

Тенденции развития BIM-технологий в строительстве влияют не только на совершенствование и цифровизацию деятельности проектных организаций, разработчиков программного обеспечения, представителей строительной отрасли, но и на смежные отрасли, влияющие на формирование информационной модели.

BIM-технологии являются мировым трендом, получившим развитие и на территории РФ. В ходе исполнения ряда положений Градостроительного кодекса РФ [6] и выполнения поручений Президента России о цифровизации в строительной отрасли принято Постановление Правительства № 331 от 05.03.2021 [3], которое устанавливает с января 2022 г. обязательное формирование и ведение информационной модели объекта для заказчика, застройщика, технического заказчика и эксплуатирующей организации при заключении договора по подготовке проектной документации для строительства, реконструкции, капитального ремонта объекта, финансируемого с привлечением бюджетных средств.

Уже сегодня строительная отрасль входит в новую эпоху, указывая на необходимость и предпосылки создания единой цифровой платформы базы данных инженерных изысканий в форме информационной модели, предоставляющей заинтересованным сторонам интерактивный, беспрепятственный доступ к цифровым данным изысканий по телекоммуникационным каналам связи.

Одним из основных направлений развития единой цифровой платформы базы данных инженерных изысканий должно быть нормативное правовое и информационное объединение на единой отечественной технологической и программно-информационной платформе класса BIM в единую доступную автоматизированную информационную систему.

В целях эффективного функционирования единой платформы необходимо внедрение современных подходов к предоставлению материалов и данных, обусловленных высокими темпами цифровизации строительной отрасли.

Развитие единой цифровой платформы базы данных инженерных изысканий в форме информационной модели в ближайшее время должно стать приоритетным направлением градостроительной деятельности, поскольку позволит экономить бюджетные средства и сократить сроки реализации крупных инвестиционных проектов, финансируемых государством.

Список литературы

1. ГКИНП-17-002-90 Инструкция о государственном геодезическом надзоре СССР.
2. Постановление Правительства РФ № 20 от 19.01.2006 «Об инженерных изысканиях для подготовки проектной документации, строительства, реконструкции объектов капитального строительства».

3. Постановление Правительства РФ № 331 от 05.03.2021 «Об установлении случая, при котором застройщиком, техническим заказчиком, лицом, обеспечивающим или осуществляющим подготовку обоснования инвестиций, и (или) лицом, ответственным за эксплуатацию объекта капитального строительства, обеспечиваются формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства».
4. Проект постановления Правительства Российской Федерации «Стратегия топографо-геодезического и картографического обеспечения Российской Федерации на перспективу до 2030 года».
5. Селифонов А.В., Ковалев А.Н., Ковалева Т.Н. Современные требования к инженерно-геодезическим изысканиям // Специальный выпуск журнала «Вестник государственной экспертизы». 2021. С. 136.
6. Федеральный закон № 190-ФЗ от 29.12.2004 «Градостроительный кодекс Российской Федерации».

A.N. Kovalev, A.S. Bluzhina, R.V. Vikhareva, E.A. Slepukhin, A.V. Selifonov

Main Department of State Expertise, Moscow, a.kovalev@gge.ru

CREATION OF A DIGITAL DATABASE PLATFORM FOR ENGINEERING SURVEYS IN THE FORM OF AN INFORMATION MODEL

Abstract. The formation of a unified digital topographic information platform is one of the most urgent tasks in the transition of the construction industry to information design technologies. The introduction of advanced technologies in engineering-geodetic surveys is not limited to the use of modern geodetic equipment and technologies, and does not solve the issue of accumulation of engineering survey results for subsequent use at all. The tasks of digitalization of the construction industry impose additional requirements on engineering research. To date, it is necessary not only to receive up-to-date information about the situation and terrain, planning elements, manifestations of dangerous natural processes and factors of man-made impact, but to receive it in a short time. The creation of a digital database platform for engineering surveys in the form of an information model will solve this problem.

Key words: digital database platform for engineering surveys; digitalization; engineering surveys; BIM; information system for urban planning activities.

Яценко А.И.

ООО «Фирма Г.Ф.К.», г. Москва, aiy@icentre-gfk.ru

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ И ПОРТОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Аннотация. Публикация посвящена описанию автоматизированной системы деформационного мониторинга (АСДМ) при строительстве и эксплуатации особо опасных объектов – причалов загрузки и разгрузки нефтеналивных судов морских портов. АСДМ реализована с использованием автоматизированных электронных тахеометров Leica TS 16, высокоточных призм, программного обеспечения Leica GeoMoS. Система работает в автоматизированном режиме без участия оператора и обеспечивает в круглосуточном режиме контроль деформаций причальной стенки. Достижимая точность контроля положения отбойного бруса причальной стенки 1–2 мм. Прогноз безопасности – 18–36 месяцев.

Ключевые слова: мониторинг; безопасность; деформации; электронный тахеометр; геодезические призмы; Leica TS 16; Leica GeoMoS; автоматизированная система деформационного мониторинга (АСДМ); прогноз безопасности.

Введение

Морские и речные пути издревле использовались человечеством, как наиболее удобный способ доставки грузов и пассажиров в любые отделенные места. Российское побережье, протяженностью почти 39 тыс. км, омывается краевыми и внутриматериковыми водами 13 морей, принадлежащих трем океанам. В настоящее время объем речных и морских грузоперевозок в структуре российского грузового и пассажирского оборота составляет всего 2%, при 63% объема общемировых морских грузоперевозок. В современных условиях Правительство РФ уделяет большое внимание модернизации современной инфраструктуры портов, ее реконструкции, внедрению современных цифровых технологий и методов перевалки грузов. «Из 67 морских портов только шасть загружены в полную мощность!» – из речи Президента РФ В.В. Путина 20 октября 2021 г.

В последнее время значительный стимул развития получили порты, расположенные вдоль Северного морского пути: Саббета, Диксон, Тикси, Певек и другие сопутствующие гидротехнические сооружения (ГТС) инфраструктуры речных и морских причалов.

Реконструкция, возведение новых инфраструктурных сооружений, увеличение мощностей по перевалочному грузообороту, увеличение тоннажа торговых судов требуют проведения дноуглубительных работ, возведение ГТС с глубоководными причальными стенками, частично являющихся стенами судоходных каналов.

Постоянное воздействие неблагоприятных погодных условий, таких как

ветер, шторма, волнения, продолжительные отрицательные температуры, навал и «намерзание» льда и пр., а так же воздействия судов при швартовке и стоянке на ограждающие поверхности причалов приводят к нарушению их целостности, к вымыванию заполняющих материала, к разрушению вертикальных причальных стенок, внезапному проседанию асфальтовых покрытий автотранспортных и крановых путей, деформации опор трубопроводных коммуникации, резервуаров хранения транспортируемых сжиженных продуктов и пр.

Возникновение внезапных деформаций инфраструктуры ГТС порта может приводить к авариям и экологическим катастрофам.

Требования нормативных технических документов

Согласно ГОСТ Р 54523-2011 [1] для обеспечения безопасной эксплуатации объектов портовых ГТС создается система наблюдений и контроля сооружения. Она проводится по определенной программе в процессе эксплуатации портовых ГТС в целях оценки технического состояния.

– Мониторинг технического состояния сооружений проводят для обеспечения их безопасной эксплуатации и нарушений режима эксплуатации и принятия мер по устранению данных дефектов и нарушений (п. 3.11.14 [1]).

– Мониторинг технического состояния сооружений проводится путем их регулярных и периодических технических осмотров (раздел 6 [1]).

– Методика и объем технических осмотров и наблюдений при мониторинге должны обеспечивать достоверность и полноту информации для заключения о текущем техническом состоянии сооружений и их безопасной эксплуатации.

- При обследовании сооружений должно проверяться геометрические размеры конструктивных элементов и их пространственное положение, которые не должны выходить за установленные проектом или нормативными документами пределы».

Автоматизированная система деформационного мониторинга (АСДМ) относится к инструментальному, детальному контролю.

Описание конструкции причалов

Космический снимок двух причалов, на которых была установлена «Автоматизированная система деформационного мониторинга причала» (АСДМ причала) приведен на рис. 1, а, поперечный разрез причала – на рис. 1, б.

Как видно из рис. 1, причал представляет сложную инженерную конструкцию, установленную на трубах диаметром 1220×12 мм с шагом 4 м, с анкерами стальными диаметром 63,5 мм ES 670 по деревянным балкам и укрепленными ж/б оголовком 1500×6000 мм. Внутренняя полость причала заполнена песком. Для предотвращения вымывания наполнителя причал

огражден металлическим шпунтом Ларсен L607n длиной 28,0 м, задавленным в дно акватории на глубину 10,0 м. Внутренняя часть «выстлана» геотекстилем. Причалы имеют асфальтовое покрытие на щебеночном основании.

Рис. 1. Космический снимок (а) и поперечный разрез (б) причалов

Проблемы эксплуатации причалов

Как было отмечено выше, природные и техногенные воздействия на причалы («причальную стенку») приводят к деформации ограждающих конструкций из шпунта Ларсен L607n, образованию «свищей», (расхождению или разрыву соединительных замков, разрушению соединительного пояса, разрыву дренажных мембран, вымыванию песчаного наполнителя, образованию скрытых полостей и деформаций поверхности причала, транспортных путей и т.п.). Это негативно сказывается на уровне безопасности портового сооружения в целом, бесперебойному функционированию инфраструктуры портового сооружения, слаженной работе транспорта, трубопроводов, безаварийности работы персонала на транспорте, сохранности жидкостей в емкостях, предотвращению возможности разлива нефтепродуктов, снижению общего уровня экологической безопасности и имидже порта.

Для постоянного контроля технического состояния причалов [1, 2], необходимо непрерывно проводить измерение линейных размеров и планово-высотное положение элементов конструкции причалов. Для этого на контролируемых причалах устанавливаются высотные марки для нивелирования и высокоточные марки (призмы) для уточнения планово-высотных координат.

Описание установленной системы

Для снижения рутинных операций по деформационному контролю конструкций причала, повышению оперативности получения актуальной информации, своевременного принятия решений по обеспечению безопасности грузоперевалочных операций и эксплуатации инфраструктуры порта была разработана и затем реализована концепция АСДМ причала.

АСДМ причала была реализована на оптоэлектронном принципе измерения расстояния P в газовой среде на отражающую поверхность геодезической марки (знака). Для увеличения точности АСДМ на контролируемые элементы были установлены специальные высокоточные светоотражающие (световозвращающие) призмы.

В основу определения прямоугольных координат, наблюдаемых (контролируемых) точек электронными тахеометрами, лежит полярный метод (рис. 2), в котором измеряется расстояние P от места расположения тахеометра до наблюдаемой точки и угол Φ . Затем вычисляются координаты по формулам:

$$X = P \cdot \cos\Phi, \quad (1)$$

$$Y = P \cdot \sin\Phi. \quad (2)$$

Рис. 2. Принципиальная схема полярного метода

Автоматизированные электронные тахеометры имеют встроенное специальное программное обеспечение (СПО), осуществляющее в автоматическом режиме определение плановых координат и высот наблюдаемых точек. Управляющее СПО системы дает возможность многократно переопределять координаты наблюдаемых точек в течение времени и на основании накопленных данных вычислять изменения координат (смещения, деформации), скорость смещения, а также другие величины. По результатам анализа изменения положения групп наблюдаемых (контролируемых) точек делаются выводы о состоянии, как отдельных конструктивных элементов, так и о причалах в целом.

Для обеспечения надежности получаемых результатов выполняются многократные измерения при обязательном контроле стабильности положения автоматизированных электронных тахеометров. Для контроля стабильности

положения тахеометров применяется периодическое переопределение координат тахеометра методом «обратной засечки» от стабильных пунктов, закрепленных точными призмами, и при необходимости, при значительном изменении положения тахеометра перерасчет его текущих координат.

Для работы АСДМ на причале установлены два тахеометра на пилонах с приборными шкафами (рис. 3).

Рис. 3. Тахеометр на причальном пилоне

На наблюдаемых зонах причалов – различных участков колесоотбойного бруса установлено 36 мониторинговых призм. Механическая защита наблюдаемых (мониторинговых) призм от повреждения, таких как швартовые тросы, наезд погрузочной техники, изменения положения призмы-марки из-за внешних причин и пр. осуществляется специальными металлическими укрытиями (рис. 4).

Рис. 4. Защита мониторинговой призмы

Для контроля устойчивости тахеометров устанавливаются, вне зоны возможных деформаций, пункты планово-высотной обоснования с призмами для обратной засечки (рис. 5).

Рис. 5. Пункт планово-высотной обоснования с призмой для обратной засечки

Около каждого тахеометра установлен датчик температуры и атмосферного давления в защитном кожухе (рис. 6). Кожух, защищающий датчик от прямых солнечных лучей выполнен из специального пластика, и обеспечивает точное измерение температуры и атмосферного давления.

Рис. 6. Датчик температуры и атмосферного давления в защитном кожухе

В штатном режиме функционирования АСДМ причал осуществляет несколько циклов измерений в сутки по назначенным группам точек. В начале каждого цикла измерений, тахеометры TS1 и TS2 уточняют свое положение методом обратной засечки относительно установленных на пунктах ПВО призм (MT1...MT6). Это обеспечивает получение фактических данных с учетом коррекции (drift-смещения) положения прибора.

Функциональная схема представлена на рис. 7.

Рис. 7. Функциональная схема

На следующем этапе производятся измерения пространственных координат мониторинговых призм, расположенных на различных участках колесоотбойного бруса и технологических эстакад. Для удобства измерений и последующей обработки призма объединены в наблюдаемые группы.

Полученные данные в ходе циклов мониторинга от датчиковой аппаратуры, после автоматизированной первичной обработки размещаются в реляционной базе данных MS SQL [5].

При смещении какой-либо из наблюдаемых точек на величину более заданного предельного значения АСДМ причал направляет сообщение специалистам по заранее утвержденному списку.

На основе этих данных создается автоматизированное рабочее место геодезиста (АРМ Геодезия), которое обеспечивает специалистов полным спектром информацией о значении координат наблюдаемых точек:

- для определения превышения предельных состояний конструкции;
- оповещение персонала о приближении и/или предельных значений наблюдаемых параметров;
- для построения графиков для визуализации процессов;
- представления данных в табличных и/или градиентных формах, удобных для восприятия информации;
- накопление информации для последующего проведения *постпроцессового* анализа с оценкой направления и величины смещения элементов наблюдаемого объекта.

Пример табличных форм представлен на рис. 8, графиков – на рис. 9.

Offset tables - максимальные смещения

Автоматизированная система мониторинга технического состояния гидротехнических сооружений причалов морского порта

Offset tables - максимальные смещения в период с 04.05.2021 по 03.06.2021

Текущие смещения Максимальные смещения Карта точек

Период:

ID	Точка	Название	Тип	Координаты			Смещения				Время измерения
				X	Y	H	ΔX	ΔY	ΔH	$\Delta 3D$	
47	TS1	Обычная		22487.0226	80468.6453	9.8299	-0.0001	-0.0017	-0.0062	0.0064	13.05.2021, 08:10:25
48	TS2	Обычная		22746.9744	80464.607	7.5307	-0.0006	0	-0.0083	0.0083	13.05.2021, 11:10:23
7	D01	Обычная		22836.57	80444.5124	3.3465	0.0033	0.0117	0.001	0.0122	24.05.2021, 18:01:26
8	D02	Обычная		22806.6706	80445.0539	3.3608	0.0008	0.0086	0.0043	0.0096	24.05.2021, 18:01:19
9	D03	Обычная		22805.0416	80445.1046	3.347	0.0031	0.0075	0.0008	0.0082	11.05.2021, 17:01:11
10	D04	Обычная		22780.3305	80445.5329	3.3426	-0.0074	-0.0086	-0.0044	0.0122	21.05.2021, 10:00:51
11	D05	Обычная		22778.7416	80445.5787	3.3359	0.0038	0.0039	-0.0115	0.0128	18.05.2021, 20:00:52
12	D06	Обычная		22753.28	80446.05	3.3578	0.0008	-0.0003	0.0051	0.0051	06.05.2021, 06:00:46
13	D07	Обычная		22751.7165	80446.0754	3.3287	0.0044	0.001	0.0027	0.0053	27.05.2021, 14:00:44
14	D08	Обычная		22724.9397	80446.5721	3.3584	-0.0004	-0.003	0.0014	0.0033	01.06.2021, 18:00:38
15	D09	Обычная		22723.6647	80446.606	3.3533	0.0026	-0.0034	0.0015	0.0045	01.06.2021, 19:00:35
37	D31	Обычная		22390.3296	80452.9162	3.3322	-0.0025	0.0154	-0.0007	0.0156	06.05.2021, 05:00:20
38	D32	Обычная		22387.1111	80453.0029	3.3271	-0.002	0.0146	-0.0004	0.0148	04.05.2021, 02:00:16
16	D10	Обычная		22698.9894	80447.1005	3.3508	0.0019	-0.0053	-0.0068	0.0088	04.05.2021, 02:00:23
17	D11	Обычная		22696.584	80447.1478	3.3438	0.0035	-0.006	0.0024	0.0074	01.06.2021, 19:00:23
18	D12	Обычная		22654.0034	80447.9301	3.3013	0.0042	0.0148	-0.0289	0.0327	19.05.2021, 11:02:08

Рис. 8. Табличные формы АСДМ причал

Рис. 9. График наблюдений точки на отбойном брус системы АСДМ причал

Обеспечение стабильности пунктов планово-высотного обоснования

Стабильность пунктов планово-высотного обоснования (ПВО) проверяется периодически (раз в полгода) контрольными измерения от пунктов геодезической сети 1-го / 2-го класса. Это особенно необходимо в начальные

периоды эксплуатации АСДМ, когда происходят «незначительные» деформации, связанные с обустройством («закладкой») пунктов ПВО.

Так же необходимо обеспечить «температурную» защиту пунктов ПВО, от погодных воздействий (прямая солнечная радиация, резкая смена температуры и пр.). Для этого пилоны утепляют термозащитным материалом с последующим «одеванием» в пластиковую оболочку.

Точность системы

Точность определения системы местоположения призм складывается из нескольких факторов:

- внутренней точности ATRplus тахеометра;
- угловой точности прибора;
- типа и точности центрирования призмы. Это расстояние точного соотношения оптического центра призмы с вертикальной осью держателя призмы;
- выбранной программы измерения EDM;
- внешних условия измерения - влияния погодных факторов на процесс измерения и возможность внесения дополнительных ошибок в получаемые данные.

В представленном проекте АСДМ причал были применены современные тахеометры фирмы Leica Geosystems концерна Hexagon TS16 A R1000 1", которые имеют типовую точность $\pm 1,0 \text{ мм} + 1,5 \text{ ppm}$, с угловой точностью 1" на стандартную призму [4]. Примененные мониторинговых GMP104 и GMP101 ПВО призмы обеспечивают эту точность [5].

Значительную зависимость на точность измерений оказывает рефракция света, вызывая преломление световых лучей в атмосфере и проявляющееся в кажущемся смещении удаленных объектов. Вследствие того, что атмосфера является средой оптически неоднородной, лучи света распространяются в ней не прямолинейно, а по некоторой кривой линии. Для значительного снижения влияния рефракции при выполнении измерений выбирается такой период времени, когда это эффект минимален.

По результатам расчетов было получено, что предельные плановые поперечные расчетные смещения шпунта причальной стенки могут составлять $1/200$ [3] ($17,6 \text{ м } 1/200$) = 88 мм, не нарушая работоспособность причала. Приборная точность определения координат для тахеометров серии TS16 A R500 1" при длине визирного луча до 100-150 м составит менее $\pm 1 \text{ мм}$. Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что примененный тип оборудования, приборов и расположение, а также закрепление призм, программное обеспечение Leica GeoMoS [5], полностью обеспечат требуемую точность измерений для определения деформаций конструкций причальной стенки.

Список литературы

1. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований.
2. ГОСТ Р 54523-2011 Портовые гидротехнические сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
3. СП 70.13330.2012 Несущие и ограждающие конструкции.
4. Решение для мониторинга Leica GeoMoS. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://leica-geosystems.com/ru/products/total-stations/software/leica-geomos> (дата обращения: 15.10.2021).
5. Leica TS16. Технические характеристики. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://geosystems.ru/upload/iblock/3a2/3a20b7179819995981f7dd001c1c799b.pdf> (дата обращения: 15.10.2021).

A.I. Yashchenko

The Firm G.F.K. LLC, Moscow, aiy@icentre-gfk.ru

APPLICATION OF AN AUTOMATED DEFORMATION MONITORING SYSTEM TO ENSURE SAFE OPERATION OF TRANSPORT FACILITIES AND PORT INFRASTRUCTURE

Abstract. The publication is devoted to the description of the automated system for deformation monitoring (ASDM) during the construction and operation of highly hazardous facilities – berths for loading and unloading oil tankers of seaports. ASDM is implemented using automated electronic tacheometers Leica TS 16, high-precision prisms, Leica GeoMoS software. The system operates in an automated mode without the participation of an operator and provides round-the-clock monitoring of the deformations of the quay wall. The achievable accuracy of control of the position of the fender bar of the quay wall is 1–2 mm. The safety forecast is 18–36 months.

Key words: monitoring; safety; deformations; electronic tacheometer; geodetic prisms; Leica TS 16; Leica GeoMoS; automated system for deformation monitoring (ASDM); safety forecast.

**Зорина В.В., Воскресенский И.С., Михеева С.Н., Сократов С.А.,
Сучилин А.А., Ушакова Л.А., Шафоростов В.М.**

МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, г. Москва, victoria.zorina10@gmail.com,
isvoskresensky@rambler.ru, arshinchik@mail.ru, sokratov@geogr.msu.ru, asuhov308@gmail.com,
la.ushakova@mail.ru, gislabinfo@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ГНСС И БЛА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ АБРАЗИОННОГО БЕРЕГА МОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ В РАЙОНЕ г. СЕВАСТОПОЛЯ

Аннотация. Дистанционное зондирование оползневого склона абразионного берега побережья п-ова Крым в пределах г. Севастополя, включает локализацию точек опорной геодезической сети с помощью глобальной навигационной спутниковой системы и зондирование с применением беспилотных летательных аппаратов (БЛА), направленное на исследование морфологии оползневого склона абразионного берега. Зондирование с применением БЛА состоит из аэросъемки участка исследований на высотах 50–100 м с дальнейшим составлением крупномасштабного ортофотоплана из мозаики аэроснимков и формированием цифровой модели рельефа для анализа морфометрии рельефа и моделирования. Разработанный метод дистанционного зондирования Земли с применением БЛА и одновременных натурных исследований позволяет организовать оперативный мониторинг динамично развивающихся оползневых склонов абразионных берегов в пределах г. Севастополя.

Ключевые слова: абразионный берег; оползневой склон; глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС); беспилотный летательный аппарат (БЛА); геоинформационная система (ГИС).

Введение

Участок оползневого склона «террасы» исследовался в течение 2019–2021 гг. коллективом сотрудников, аспирантов и студентов географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Исследования проводились в ходе научных программ кафедр картографии и геоинформатики, геоморфологии и палеогеографии, криолитологии и гляциологии, геоэкологии и природопользования Севастопольского филиала МГУ имени М.В. Ломоносова в рамках государственного задания «Развитие методов и технологий картографии, геоинформатики и аэрокосмического зондирования в исследованиях природы и общества». В настоящее время в связи с антропогенным освоением территорий возрастает актуальность разработки методики применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) для мониторинга оползневых склонов [9], в т.ч. абразионных берегов п-ова Крым (рис. 1).

Юго-западное побережье п-ова Крым, в состав которого входят абразионные берега, обладает высоким потенциалом их трансформации [3] в связи с развитием оползней [1, 4, 7]. Оползневые склоны абразионного берега в районе г. Севастополя имеют характерные формы рельефа: террасовидные

поверхности оползневых тел, их уступы, эрозионные ложбины и денудационные останцы [1, 2, 4]. Оползневые склоны, образованы «активными» и «временно стабилизированными» оползнями «блокового», «потокового» и «смешанного типов» [5, 8]. Морфология оползневых склонов абразионного берега зависит от литологии пород и семиаридного климата, что приводит к образованию уступов и денудационных останцов [6]. Цель представленной работы – разработка методики исследования морфологии оползневых склонов абразионных берегов побережья п-ова Крым с применением БЛА и ГНСС.

Рис. 1. Фрагмент перспективного снимка абразионно-оползневого берега западного побережья п-ова Крым

Задачи: а) воздушное зондирование оползневого склона; б) выделение и анализ пространственного распространения «элементарных поверхностей» в пределах оползневого склона.

Материалы и методы исследования

1) Разбивка локальной геодезической сети на участке исследований. В ходе полевых работ 2019–2020 гг. на участке исследований заложена локальная долговременная опорная геодезическая сеть (рис. 2). Общее число точек опорной сети – более 30 знаков, включая знаки государственной геодезической сети (ГГС), часть из них располагаются на оползневой террасе. Назначение локальной геодезической сети – картографирование и мониторинг динамики оползневых процессов на долговременный период. Измерения проводились высокоточным мобильным комплексом ГНСС «Leica Viva» и уравнивались в постобработке относительно трех референц-станций ГНСС («EVPT»-Евпатория, «SIMF»-

Симферополь, «SEVS»-Севастополь), что позволило получить сантиметровую точность для координат точек опорной сети.

Рис. 2. Мобильный комплекс ГНСС Leica Viva на точке локальной геодезической сети на фоне «денудационного останца»

2) Зондирование проводилось с помощью БЛА DJI Mavic Air и DJI Mavic Mini в автоматическом / ручном режиме, при средней высоте съемки около 20 м относительно бровки «террасы» уступа (рис. 3), т.е. максимальная высота зондирования составила около 70 м от береговой линии моря. Было получено более 1500 снимков (86 галсов, с перекрытием между снимками 60–70%), которые затем были обработаны фотограмметрическим методом с геопространственной привязкой к точкам опорной локальной сети. По результатам обработки мозаики снимков сформирован ортофотоплан и цифровая модель местности (ЦММ), а после фильтрации на ЦММ (кустарник, отдельные деревья) построена цифровая модель рельефа (ЦМР) участка исследований.

Рис. 3. Фрагмент одного из галсов зондирования с БЛА

Выделение и анализ пространственного распространения «элементарных поверхностей» в пределах оползневого склона состоял из следующих разделов.

1) Составление топографического плана (масштаб 1:1 000 и мельче) участка исследований проводилось на основании полевых измерений и по материалам зондирования с БЛА (ЦМР, ортофотоплан) (рис. 4), и сформировано на платформе геоинформационной системы (ГИС MapInfo), включая все исходные картографические источники и данные дистанционного зондирования (ДДЗ), на строгой математической основе и в заданной системе координат. В среде ГИС составлен топографический план участка исследований с сечением рельефа 0,5 м и 1,0 м, отражающий ситуацию в виде горизонталей и условных знаков.

Рис. 4. Ортофотоплан участка исследований, составленный по результатам зондирования с БЛА

2) Построение топографических профилей проводилось по составленной ЦМР в среде ГИС QGIS. Профили пересекали склон от бровки «террасы» до береговой линии (рис. 5). Местоположение профилей определялось исходя из пересечения «элементарных поверхностей простых форм рельефа» на различных участках береговой зоны. Примеры двух из восьми построенных профилей приведены на рис. 5.

3) На морфологических профилях выделялись («элементарные поверхности простых формы рельефа» (по А.И. Спиридонову террасовидные поверхности и уступы между ними). Критерий выделения «элементарной поверхности» принят равным 2 м, что соответствует четырем интервалам сечения на топографической карте.

4) Составление таблицы распределения морфометрического показателя (абсолютной высоты) «элементарной поверхности».

Рис. 5. Поперечные морфологические профили 1 (а) и 8 (б) оползневого склона

Результаты и их обсуждение

«Элементарные поверхности» (ЭП) абразионно-оползневого склона распространены на всем протяжении изученного участка (табл.). В верхней части склона образовался отвесный уступ (см. рис 1). В основании уступа установлены выходы грунтовых вод по кровле галечников с прослоями глин. Таким образом, верхняя часть склона – это «зона оползневых уступов» оползней скольжения или сдвига. Ниже к урезу моря располагается зона аккумуляции оползневых тел. Они, как правило, разрушены до глыб или аморфных скоплений блоков

галечников, суглинков и супесей. Аккумулятивная толща содержит обломки бытовых сооружений.

Таблица

Морфометрия «элементарных поверхностей» (по А.И. Спиридонову) участка абразионно-оползневого берега между поперечными профилями 1–8

№ профиля	Террасовидные поверхности, абс. высота в м							Наклонные поверхности – склоны террасовидных поверхностей, абс. высота в м					
1	44	38	34	18	14	8	–	44–38	38–34	34–18	18–14	14–8	8–2к
2	46	24	10	8	6	6	–	46–24	24–10	10–8	8–6	–	6–2к
3	47	32о	26о	22	8	8	4	48–30	30–26	26–22	22–8	8–4	4–2к
4	48	36о	42о	22	12	6	–	48–32	36–26	26–22	22–12	12–6	6–2к
5	46	26	22	14	6	–	–	46–26	26–22	22–6	–	–	6–2к
6	36	16	12	6	–	–	–	36–26	26–16	16–12	12–6	–	6–2к
7	28	20	16	8	6	–	–	28–20	20–16	16–8	8–6	–	6–0к
8	38	18	16	10	–	–	–	38–18	18–16	16–10	–	–	10–0к

Примечание. Например, «26о» – абсолютная высота вершины денудационного «останца» на террасовидной поверхности; 10–0к – абсолютная высота бровки клифа (берегового уступа) и его подножья (уреза моря на профилях 7–8 или верхней части пляжа на профилях 1–6).

Элементарные поверхности распространены на всем протяжении оползневого склона. Количество террасовидных поверхностей и уступов между ними, а также абсолютные высоты и относительная высота уступов между ними существенно различаются по простирацию склона от профиля 1 к профилю 8. Это связано с активностью оползания, вызываемого абразией. Например, на участке профилей 7 и 8 в настоящее время протекает активная абразия основания склона, а на участке профилей 1–5 у подножья склона формируется аккумулятивный пляж.

Выводы

Методика исследования морфологии оползневого склона абразионного берега в районе г. Севастополь включает формирование локальной геодезической сети с применением ГНСС, зондирование участка исследований с БЛА и морфологический анализ элементарных поверхностей. Методика содержит особенности организации съемки исследуемых оползневых участков с последующей послойной интеграцией на платформу ГИС.

Совокупность применения БЛА и ГНСС позволяет оперативно выявлять новые образования, дистанционно получить их детальные количественные характеристики и на основании этих данных проводить натурные исследования и их оперативный мониторинг. Использование в географических исследованиях общедоступных БЛА для оперативной аэросъемки локальных и труднодоступных территорий, а также для получения материалов заданной картографической точности, доказало свою эффективность. Точность высот ЦМР при высоте съемки 50 м, составляет 10–12 см. Среднеквадратическая погрешность при уравнивании и измерении на опорных точках, подтверждает данную точность, что удовлетворяют требованиям, предъявляемым к инженерно-топографическим планам масштаба 1:500 с сечением рельефа 0,5 м.

Авторы выражают большую признательность коллективу компании Hexagon SmartNet Russia (<https://smartnet.geosystems.ru/>) за поддержку в реализации проекта.

Список литературы

1. Игнатов Е.И. Береговые морфосистемы. Москва – Смоленск: Маджента, 2004. 352 с.
2. Игнатов Е.И. Современное состояние береговой зоны Черного моря вдоль юго-западного Крыма // Причерноморский экологический бюллетень. 2010. № 1(35). С. 102–120.
3. Игнатов Е.И., Лукьянова С.А., Соловьева Г.Д. Морские берега Крыма // Геоморфология. 2016. № 1. С. 55–63.
4. Игнатов Е.И., Орлова М.С., Санин А.Ю. Береговые морфосистемы Крыма. Севастополь: ЭКОСИ-Геофизика, 2014. 265 с.
5. Игнатов Е.И., Санин А.Ю. Оползневой рельеф береговых морфосистем Южного берега Крыма // Материалы 2-й Международной конференции «Создание и использование земельных участков на берегах морей и искусственных водоемов». Новосибирск: ИВП СО РАН, 2011. С. 17.
6. К геоморфологии берегов Севастополя / В.И. Мысливец, В.Н. Коротаев, А.С. Зверев, М.В. Федин, М.М. Федин // Материалы XXIV береговой конференции «Морские берега – эволюция, экология, экономика». Краснодар: РГГМУ, 2012. Т. 1. С. 265–268.
7. Махаева Т.В. К геоморфологии и динамике берегов Западного Крыма // Геология побережья и дна Черного и Азовского морей в пределах УССР. Киев: Изд-во Киевского университета, 1968. Вып. 2. С. 160–166.
8. Опасные экзогенные процессы / В.И. Осипов, В.М. Кутепов, В.П. Зверев, Ю.Н. Авсюк, Н.И. Алексеевский, А.С. Алешин, А.В. Аникеев, А.А. Варга, В.И. Гридин, К.А. Гулакян, В.В. Каякин, В.С. Круподеров, В.В. Кюнтцель, В.И. Макаров, А.А. Махорин, В.А. Мироненко, Г.П. Постоев, А.Н. Родионов,

С.М. Семенов, А.И. Сергеев, Д.А. Тимофеев, Р.С. Чалов, А.И. Шеко // Под ред. В.И. Осипова. М.: ГЕОС, 1999. 290 с.

9. Применение БЛА для мониторинга оползневых и эрозионных процессов (на примере центра Русской равнины) / И.С. Воскресенский, А.А. Сучилин, Л.А. Ушакова, В.М. Шафоростов, А.Л. Энтин // Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2018. С. 42–47.

**V.V. Zorina, I.S. Voskresensky, S.N. Mikheeva, S.A. Sokratov, A.A. Suchilin,
L.A. Ushakova, V.M. Shaforostov**

Lomonosov Moscow State University, Moscow, victoria.zorina10@gmail.com,
isvoskresensky@rambler.ru, arshinchik@mail.ru, sokratov@geogr.msu.ru, asuhov308@gmail.com,
la.ushakova@mail.ru, gislabinfo@mail.ru

APPLICATION OF GNSS AND UAVS FOR RESEARCHING LANDSLIDES OF THE ABRASION COAST OF THE SEA COAST IN THE AREA OF SEVASTOPOL

Abstract. Remote sensing of the landslide slope of the abrasion coast of the Crimean coast within the city of Sevastopol includes the localization of points of the reference geodetic network using the global navigation satellite system (GNSS) and sounding using unmanned aerial vehicles (UAVs) aimed at studying the morphology of the landslide slope of the abrasion coast. Sounding with the use of UAVs consists of aerial photography of the research area at heights of 50–100 m, with further compilation of a large-scale orthomosaic from a mosaic of aerial photographs and the formation of a digital elevation model for analyzing the morphometry of the relief and modeling. The developed method of remote sensing of the Earth with the use of UAVs and simultaneous field studies makes it possible to organize operational monitoring of dynamically developing landslide slopes of abrasion shores within Sevastopol.

Key words: abrasion coast; landslide slope; global navigation satellite system (GNSS); unmanned aerial vehicles (UAV); geographic information system (GIS).

**Воскресенский И.С., Сократов С.А., Сучилин А.А., Шныпарков А.Л.,
Ушакова Л.А.**

МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, г. Москва, isvoskresensky@rambler.ru,
sokratov@geogr.msu.ru, asuhov308@gmail.com, malyn2006@yandex.ru, la.ushakova@mail.ru

ПОЛЕВОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕВЫХ И СЕЛЕВЫХ СКЛОНОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГНСС И БЛА ХРЕБТА АИГБА В РАЙОНЕ КРАСНОЙ ПОЛЯНЫ

Аннотация. Обвальные, осыпные и оползневые склоны широко распространены в горах Западного Кавказа. Опасные склоновые процессы на склонах хр. Аибга и в долине р. Мзымты определяют геоморфологические условия при строительстве и эксплуатации, прежде всего, линейных сооружений. Рассматриваются характеристики современных гравитационных склонов и процессов: оползней и селей, обвалов и осыпей, «крипа». По результатам исследований проводится геоморфологическое районирование, на основании морфометрических показателей – относительных превышений (м) между сопряженными формами рельефа и крутизны склона. Рассматривается методика мониторинга для фиксации «подвижек» опасных склонов, на основе применения современных аппаратных средств, анализа материалов космического зондирования, выделения участков, представляющих потенциальную опасность, натурных наблюдений и использования беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: оползни и сели; геоинформационное картографирование; глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС); беспилотный летательный аппарат (БЛА).

Введение

Исследования опасных природных процессов проводились в долине р. Мзымты на нескольких ключевых участках, подверженных внезапному оползанию склонов хр. Аибга (рис. 1). В настоящее время изменение горного рельефа Западного Кавказа происходит в значительной степени в результате действия процессов обваливания, осыпания и оползания [5, 7]. На склонах с углами наклона, близкими к 15–25°, оползни и сели перемещают значительные массы горных пород [3, 4, 6].

Цель исследования: картографирование и разработка приемов дистанционного наблюдения (мониторинга) за обвальными, оползновыми осыпными склонами и селевыми долинами для прогноза их развития.

Задачи:

– определение пространственного распространения проявлений современных склоновых и селевых процессов относительно древних стабилизированных оползневых, обвально-осыпных, селевых и других форм горного рельефа с учетом антропогенного воздействия на основании локальных геодезических сетей, сформированных методами глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и крупномасштабного дистанционного зондирования с применением беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в целях геоинформационного картографирования;

– выявление признаков селевых, обвальных, оползневых и осыпных процессов, морфологии селевых долин, оползневых, обвальных и осыпных склонов и их строения, включая петрографо-минералогический состав селевых и оползневых отложений;

– составление базы данных (БД) очагов оползневой и селевой опасности, аккумуляция результатов исследований на платформе ГИС.

Материалы и методы исследований

Проявления экзогенных гравитационных рельефообразующих процессов: обваливание, осыпание, оползание, сели, «крип» на склонах хр. Аибга и в долине р. Мзымта были ранее выявлены при геологических исследованиях территории. Они отражены на геологических, структурно-тектонических и инженерно-геологических картах и схемах, использованных в исследовании. В работе использовались крупномасштабные карты и материалы космического зондирования. Также использовались материалы, предоставленные «Экоцентром» (АНО МТЭА, г. Москва).

Рис. 1. Адресная схема района исследований

Анализ проявления пространственной изменчивости современных склоновых процессов производился на основании геоморфологического районирования с выделением геоморфологических районов. Основанием для их обособления служат морфометрические показатели – относительные

поперечным перекрытием около 70%, которые были автоматически распределены над подстилающей поверхностью исследований с учетом местоположения знаков ПВО. Из мозаики аэроснимков зондирования, фотограмметрическим методом был построен ортофотоплан и составлена цифровая модель рельефа (ЦМР), что позволило построить изогипсы (горизонтали) на «открытых» от густой лесной растительности участков местности, сечением 1 м (рис. 3, а) и морфометрическую схему склона (рис. 3, б). По ЦМР были рассчитаны производные модели участка исследований и сформированы дополнительные слои в среде ГИС для последующего геоморфолого-морфодинамического анализа территории в комбинации с натурными наблюдениями (рис. 4).

Рис. 3. Восстановленный рельеф по ЦМР (а) и морфологическая схема склона (б) сектора «А» второго участка исследований

На морфологической схеме склона сектора «А» представлены:

«а» – участок склона ложбинно-бугристый с ложбинами относительной глубиной до 2 м и «ступенями» шириной до 10 м и относительной высотой до 2–8 м;

ФОРМЫ РЕЛЬЕФА

ФЛЮВИАЛЬНЫЕ

- Пд** Поверхности конусов выноса селей и временных водотоков (древних)
- Пс** Поверхности конусов выноса временных водотоков (современных)

СКЛОНОВЫЕ

- Ск** Склоны крутые (25° и более) массового смещения (крип) и оползания поверхностного чехла отложений
- Дэ** Днища ложбин и их конусов выноса временных эрозионных водотоков
- Дс** Днища ложбин и их конусов выноса селей и временных селевых водотоков

АНТРОПОГЕННЫЕ

- Нс** Валообразные насыпи с сооружениями противолавинной защиты
- Тз** Террасовидные площадки со зданиями и инженерными сооружениями
- Тд** Террасовидные площадки с опорами канатных и временных грунтовых дорог
- Со** Склоны крутые (25° и более) обвально-оползневые поверхностного чехла отложений
- Скэ** Склоны крутые (25° и более) массового смещения (крип), оползания поверхностного чехла отложений и плоскостного смыва (делювиальные), горно-лыжных трасс и трасс подъемников
- ▲▲▲** Уступ склона крутого (25° и более) обвально-осыпного

Рис. 4. Карта-схема геоморфолого-морфодинамических форм рельефа второго участка исследований

«b» – фрагмент ложбины с плоским дном и крутым склоном до 5 м;

«с» – фрагмент ложбины длиной по тальвегу и по падению склона до 100 м.

Этот участок ложбины имеет в вершине фрагмент крутого склона относительной высотой до 5–10 м. В плане фрагмент крутого склона в вершине ложбины

образует полуокружность. Вдоль левой части ложбины протягивается крутой склон относительной высотой до 5–6 м. Он «продолжает» крутой склон в вершине ложбины на всем протяжении изученного участка. На своем протяжении в приборочной части склона выделены четыре фрагмента ступеней относительной высотой до 10 м и шириной до 15 м. В днище ложбины на всем протяжении прослеживаются мелкие ложбины-борозды шириной до 2–10 м и относительной глубиной 1–2 м;

«d» – фрагмент склона с выпуклым профилем по его падению. В верхней части склона выражена одна узкая ложбина шириной до 1–2 м и относительной глубиной до 1 м. В нижней части склона – вниз по падению протягиваются до 5–8 субпараллельных ложбин шириной до 1 м и относительной глубиной до 1 м;

«е» – фрагмент склона с ложбинами, ориентированными под углом 45° относительно генерального направления падения склона. Ложбины имеют ширину до 2–3 м и относительную глубину до 1 м. В верхней части данного фрагмента склона две верхние ложбины разделены «валом» шириной до 10 м и относительной высотой до 3–4 м.

Заключение

1. Исследуемый участок склона подвергается активному преобразованию оползневым процессом, который относится к блоково-консистентному типу. К настоящему времени, в течение восьми лет после строительства, сформировались два участка активного оползания: западный и восточный.

2. Эрозия моделирует поверхность склонов в пределах освобожденных от древесной растительности участков горнолыжных трасс.

3. Морфология оползневых участков позволяет предполагать, что основной причинной оползания являются выходы грунтовых вод в основании крутых участков склонов в верховьях эрозионно-оползневых ложбин «а» и «с».

Морфология изученного склона позволяет полагать, что два участка активного оползания «а» и «с» в течение 1–3 лет сомкнутся, а узкий (15–17 м) участок («перемычка») между ними будет разрушен. При «смыкания» образуется новый консистентный оползень-поток. В связи с тем, что базис денудации эрозионно-оползневой ложбине «а» располагается на меньшей абсолютной высоте, движение оползневого потока будет направленно из вершины эрозионно-оползневой ложбины «с» в эрозионно-оползневую ложбину «а». В результате весьма вероятно возникновение опасности разрушения сооружений «узловой» станции (см. сектор «В») канатной дороги «Горная карусель» на отметке 1000 м.

Кроме того, по результатам многолетних исследований в долине р. Мзымты, сформирована и зарегистрирована база данных «очаги опасных природных процессов в горных районах» (на примере района Красная Поляна) [1], которая содержит материалы селевых и оползневых очагов

(опасные природные процессы) в долине р. Мзымта, представляющих угрозу жизнедеятельности человека.

Авторы выражают признательность сотрудникам и аспирантам географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова: П.Б. Гребенникову, В.А. Толманову, А.Ю. Комарову и Т.И. Хисматуллину за оказанную поддержку при проведении исследовательских работ. Благодарим компанию HxGN SmartNet Russia (<https://smartnet.geosystems.ru/>) за поддержку в реализации проекта.

Список литературы

1. Воскресенский И.С., Сократов С.А., Сучилин А.А., Шныпарков А.Л. База данных «Очаги опасных природных процессов в горных районах» (на примере района Красная поляна): свидетельство о регистрации RU 2021620290, 17.02.2021.
2. Воскресенский И.С., Сучилин А.А. Опыт применения ГИС для регионального геоморфологического районирования при оценке воздействия на окружающую среду // ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2016. Т. 22. Ч. 1. С. 173–183. <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2016-1-22-173-183>.
3. Воскресенский С.С. Динамическая геоморфология. Формирование склонов. М.: Изд-во Московского университета, 1971. 230 с.
4. Капчеля А.М., Осюк В.А. Рельеф и экзогенные процессы Кодр Молдавии. Кишинев: Штиинца, 1989. 228 с.
5. Кружалин В.И. Экологическая геоморфология суши. М.: Научный мир, 2001. 176 с.
6. Опасные экзогенные процессы / В.И. Осипов, В.М. Кутепов, В.П. Зверев, Ю.Н. Авсюк, Н.И. Алексеевский, А.С. Алешин, А.В. Аникеев, А.А. Варга, В.И. Гридин, К.А. Гулакян, В.В. Каякин, В.С. Круподеров, В.В. Кюнтцель, В.И. Макаров, А.А. Махорин, В.А. Мироненко, Г.П. Постоев, А.Н. Родионов, С.М. Семенов, А.И. Сергеев, Д.А. Тимофеев, Р.С. Чалов, А.И. Шеко; под ред. В.И. Осипова. М.: ГЕОС, 1999. 290 с.
7. Хмелева Н.В., Виноградова Н.Н., Самойлова А.А., Шевченко Б.Ф. Бассейн горной реки и экзогенные процессы в его пределах. М.: Изд-во Московского университета, 2000. 186 с.

**I.S. Voskresensky, S.A. Sokratov, A.A. Suchilin, A.L. Shnyparkov,
L.A. Ushakova**

Lomonosov Moscow State University, Moscow, isvoskresensky@rambler.ru, sokratov@geogr.msu.ru,
asuhov308@gmail.com, malyn2006@yandex.ru, la.ushakova@mail.ru

FIELD MAPPING OF LANDSLIDE AND DEBRIS FLOW SLOPES OF THE AIBGA RIDGE IN THE KRASNAYA POLYANA REGION USING THE GNSS AND UAVs

Abstract. Rockfall, talus, and landslide slopes are widespread in the mountains of the Western Caucasus. Dangerous slope processes on the slopes of the Aibga ridge and in the valley of the Mzymta River determine the geomorphological conditions during the construction and operation primarily of the linear structures. The characteristics of modern gravitational slopes and processes are considered: landslides, debris flows, rockfalls, taluses, and “creep”. The geomorphological zoning was provided as the output of the study, made based on the morphometric indicators – the relative excess (m) between the conjugate landforms and the steepness of the slope. A monitoring technique was considered for fixing the “movements” of dangerous slopes based on the use of modern techniques, analysis of space sensing materials, identification of areas that are exposed to a potential danger, field observations and the use of unmanned aerial vehicles.

Key words: landslides and debris flows; geoinformation mapping; global navigation satellite system (GNSS); unmanned aerial vehicle (UAV).

Курков В.М.¹, Киселева А.С.¹, Клестов В.А.², Курков М.В.², Брусило В.А.³

¹МИИГАиК, г. Москва, vkurkov@inbox.ru, ennot@yandex.ru

²ГК «ГЕОСКАН», г. Москва, d.klestov@geoscan.aero, m.kurkov@geoscan.aero

³ООО «АГМ Системы», г. Краснодар, brusilo.va@agmsys.ru

ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «БЕСПИЛОТНАЯ АЭРОФОТОСЪЕМКА, ВОЗДУШНОЕ ЛАЗЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ И ФОТОГРАММЕТРИЯ»

Аннотация. Подготовка и переподготовка кадров являются неотъемлемой частью внедрения новых технологий в топографо-геодезическую отрасль. Одно из перспективных направлений – аэрофотосъемка (АФС) и воздушное лазерное сканирование (ВЛС), выполняемое с беспилотных воздушных судов (БВС). Результаты фотограмметрической обработки АФС и обработки данных ВЛС позволяют получить документы о местности, необходимые для инженерно-геодезических изысканий, картографирования, кадастра, маркшейдерии. Для того чтобы получить кондиционные документы, используя БВС с цифровой съемочной камерой и лазером сканером, специалист должен обладать комплексом знаний и навыков, отвечающим требованиям современной технологии. В публикации изложен опыт работы и перспективы по повышению квалификации специалистов в данном направлении.

Ключевые слова: беспилотная аэрофотосъемка (АФС); воздушное лазерное сканирование (ВЛС); беспилотное воздушное судно (БВС); документы о местности; повышение квалификации; фотограмметрическая обработка.

Подготовка и переподготовка кадров является неотъемлемой частью внедрения новых технологий в топографо-геодезическую отрасль. Одним из перспективных направлений является аэрофотосъемка (АФС) и воздушное лазерное сканирование (ВЛС), выполняемое с беспилотных воздушных судов (БВС). Результаты фотограмметрической обработки АФС и обработки данных ВЛС позволяют получить документы о местности (ортофотопланы, цифровые модели местности и рельефа, текстурированные трехмерные модели местности и объектов и др.), которые отвечают требованиям нормативных технических документов (НТД) при проведении инженерно-геодезических изысканий, картографировании, ведения кадастра недвижимости, маркшейдерских работах, в строительстве и других отраслях, где востребованы подобные НТД. Но для того, чтобы получить кондиционные документы, роботизированная техника в виде БВС с полезной нагрузкой в виде цифровой топографической съемочной камеры и/или лазерного сканера должна оказаться в надежных руках, т.е. у специалистов с комплексом знаний и навыков, отвечающим требованиям современных технологий.

С 2011 г. кафедра фотограмметрии Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК) проводит на Заокском геополигоне учебно-производственную практику с использованием аэрокосмических данных для получения документов о местности [1–3]. Существенное место на практике занимает использование БВС. При проведении летно-съемочных работ активно

участвуют компании-партнеры: «Птеро», «ГЕОСКАН», «СТЦ», «ФИНКО», «Люфтера», «Газпром Комические системы», «Йена Инструмент», «Небесная механика», «Аэрогеоматика» (рис. 1, 2). За время проведения практик было выполнено около ста контрольно-испытательных полетов различными БВС.

Рис. 1. Подготовка БВС «Орлан 10» к полету

Рис. 2. Знакомство с БВС «Геоскан 101»

При выполнении фотограмметрической обработки штатно используются цифровые фотограмметрические станции Photomod UAS и Agisoft Metashape отечественного производства. При необходимости доступно и зарубежное программное обеспечение: PIX4D, Context Capture, DJI Terra, INPHO UAS Master и др., на которое можно получить временные лицензии.

За 10 лет работы подготовлено 113 студентов по специальному курсу «Беспилотная АФС и фотограмметрия». Полученные знания и навыки позволили

многим из них найти себя в компаниях, которые используют новые технологии. В настоящее время запросы топографо-геодезической отрасли по данному направлению возрастают.

В 2020 г. на основе опыта работы со студентами в Центре дополнительного образования МИИГАиК была представлена программа повышения квалификации для специалистов, рассчитанная на двухнедельную подготовку по направлению «Беспилотная аэрофотосъемка и фотограмметрия». За 2020–2021 гг. проведено четыре набора и курсы прошли 33 слушателя (рис. 3–5) [1].

Рис. 3. Слушатели курсов 10–17 октября 2020 г.

Рис. 4. Слушатели курсов 21–30 апреля 2021 г.

Рис. 5. Слушатели курсов 1–10 октября 2021 г.

В период проведения курсов по направлению «Беспилотная аэрофотосъемка и фотограмметрия» ГК «ГЕОСКАН» и ООО «АГМ Системы» провели демонстрационные полеты с БВС Геоскан 401 с лазерным сканером АГМ-МС1, познакомили с техническими характеристиками комплекса, а также показали основные технологические этапы выполнения съемки и постобработки данных (рис. 6). Представленная технология и ее возможности вызвали живой интерес у слушателей. В настоящее время готовится программа модуля по ВЛС, которая будет включать: 1) подготовку БВС и сканирующей системы к съемке, 2) выполнение летно-съемочных работ; 3) обработку материалов лазерного сканирования (определение траектории полета БВС, вывод точек лазерного отражения (ТЛО), классификация ТЛО), построение цифровых моделей рельефа (ЦМР), ортофотопланов и других документов о местности. Со следующего года организаторы намерены включить модуль по ВЛС в курсы повышения квалификации для специалистов.

Рис. 6. Слушатели курсов знакомятся с комплексом воздушного лазерного сканирования

Список литературы

1. Киселева А.С., Курков В.М. Подготовка и переподготовка кадров по направлению «Беспилотная аэрофотосъемка и фотограмметрия» в МИИГАиК // Геопрофи. 2021. № 4. С. 37–41.
2. Курков В.М., Капустина А.В. Комплексная учебная практика по созданию крупномасштабных карт и других документов о местности // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. 2013. № 2. С. 62–62.
3. Курков В.М., Смирнов А.В., Иноземцев Д.П. Опыт использования БЛА при проведении практики студентов на «Заокском геополигоне» МИИГАиК // Геопрофи. 2014. № 4. С. 55–61.

V.M. Kurkov¹, A.S. Kiseleva¹, V.A. Klestov², M.V. Kurkov², V.A. Brusilo³

¹Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, vkurkov@inbox.ru, ennot@yandex.ru

²GEOSCAN Group of Companies, Moscow, d.klestov@geoscan.aero, m.kurkov@geoscan.aero

³AGM Systems LLC, Krasnodar, brusilo.va@agmsys.ru

EXPERIENCE IN ADVANCED TRAINING OF SPECIALISTS IN THE FIELD OF “UNMANNED AERIAL PHOTOGRAPHY, AERIAL LASER SCANNING AND PHOTOGRAMMETRY”

Abstract. Training and retraining of specialists is an essential part of implementation of new technologies in the topographic and geodesic industry. One of the perspective areas is aerial survey (AS) and airborne laser scanning (ALS) performed from unmanned aerial vehicles (UAVs). The results of aerial survey data and airborne LIDAR data processing allow to obtain documents about terrain for mapping, cadastre, surveying, and engineering surveys. In order to obtain conditioned documents using the UAVs with a digital camera and laser scanner, a specialist must have a set of knowledge and skills that meet the requirements of modern technology. The publication outlines the experience and prospects for improving the skills of specialists in this area.

Key words: unmanned aerial survey (AS); aerial laser scanning (ALS); unmanned aerial vehicles (UAV); documents about the area; advanced training; photogrammetric processing.

СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ»

Стурман В.И.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
факультет радиотехнологий связи, кафедра экологической безопасности телекоммуникаций,
г. Санкт-Петербург, st@izh.com

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

Аннотация. Рассмотрены возможные пути развития нормативной базы инженерно-экологических изысканий в период после утверждения СП 502.1328500.2021 «Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ». Предложены категории объектов, специфика которых требует учета при разработке сводов правил 3-го и 4-го уровней – объекты размещения отходов и особо охраняемые природные территории.

Ключевые слова: инженерно-экологические изыскания; нормативная база изыскательских работ; своды правил; методы изыскательских работ; природные и техногенные условия.

Состоявшееся в текущем 2021 г. утверждение свода правил по инженерно-экологическим изысканиям для строительства СП 502.1328500.2021 [5] подвело итог под длившимся с появления в 1997 г. СП 11-102-97 [3] крупным этапом в истории данного вида работ, и одновременно дало старт новому этапу. Новый СП 502.1328500.2021 [5] обобщает почти четвертьвековой опыт применения свода предыдущего и позволяет снять некоторые из выявившихся за этот период недостатков нормативной базы изыскательских работ:

- впервые оговорены цели, задачи и, что особенно существенно, условия, при которых является обязательным выполнение тех или иных видов работ;
- конкретизированы состав и объем ожидаемых результатов по каждому из видов работ;
- введены критерии для определения пространственных рамок инженерно-экологических изысканий, включая внешние границы и глубину по разрезу.

Вместе с тем, новый свод СП 502.1328500.2021 [5] не решил некоторых важных задач развития нормативной базы инженерно-экологических изысканий:

- не приблизил решение главной проблемы инженерно-экологических изысканий – обоюдной незаинтересованности как заказчика, так и исполнителя в качественном выполнении данного вида работ, поскольку в СП 502.1328500.2021 [5] не нашли достаточного отражения наиболее важные для заказчика цели, такие как фиксация стартового состояния окружающей среды в районе намечаемой деятельности, включая выявление объектов накопленного экологического ущерба (под ними в настоящее время фактически понимаются только места размещения отходов, что чрезмерно узко), а также

выявление общественных настроений, прогнозирование возможных социально экологических конфликтов и подготовка мер по их предотвращению;

– не снял проблему дублирования при проведении инженерно-экологических изысканий видов работ, свойственных изысканиям инженерно-геологическим и инженерно-гидрометеорологическим;

– оставил в силе нерациональные требования о выполнении в ходе инженерно-экологических изысканий прогнозов последствий намечаемой деятельности и предложений по мониторингу, что должно выполняться в проектной документации, т.е. после принятия основных проектных решений, но не на стадии проведения изысканий.

В конце 2010-х гг. начался переход от отдельных, недостаточно связанных между собой сводов правил к выстраиванию их системы, включающей четыре иерархических уровня [8]. Первый уровень образует свод правил, единый для всех видов изысканий и регламентирующий их общие положения. В настоящее время им является СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96*» [4]. Свод второго уровня – основные рабочие документы по видам изысканий (инженерно-геодезическим, инженерно-геологическим и т.д.). Для инженерно-экологических в качестве документа второго уровня утвержден СП 502.1328500.2021 [5].

Свод 3-го уровня должны регламентировать выполнение работ в особых условиях (сейсмичность, многолетняя мерзлота, карст, оползневые процессы, континентальный шельф и т.п.), своды 4-го уровня – особенности изысканий под объекты определенных категорий (трубопроводы, автодороги, гидротехнические сооружения и т.п.). Следует отметить, что выбор тематики сводов правил 3-го и 4-го уровней отражает учет специфики прежде всего геологических (геолого-геоморфологических, гидрогеологических, инженерно-геологических) особенностей территорий, что вполне отражает как уровень практической значимости, так и степень методической проработки данного вида изысканий. Свод 3-го и 4-го уровней разрабатываются как единые для всех видов изысканий и должны учитывать специфику условий и объектов. Вопрос о том, каким образом в сводах 3-го и 4-го уровней будет находить отражение специфика инженерно-экологических изысканий в определенных условиях (3-й уровень) и по категориям объектов (4-й уровень) пока не только не решен, но и не поставлен.

Среди категорий природных и техногенных условий, определяющих разработку сводов 3-го уровня, наибольшей экологической спецификой очевидным образом характеризуются континентальный шельф и застроенные территории. Для континентального шельфа наиболее актуальны методы, отработанные при проведении исследований различной направленности на морских акваториях, в первую очередь гидробиологических. Для застроенных территорий (как селитебных, так и промышленных) биологические и биофизические (электромагнитные, акустические) исследования в целом

малоактуальны, но потребуются расширение перечня контролируемых показателей химического загрязнения, с учетом действующего и прошлого функционального назначения земель, согласно СанПиН 2.1.3684-21 [2]. Для всех категорий земель, не нарушенных или слабо нарушенных прошлой хозяйственной деятельностью существенное значение имеет заблаговременное выявление фоновых концентраций химических элементов и соединений, превышающих гигиенические или рыбохозяйственные нормативы, что довольно широко распространено в природной среде [6], но практически не рассматривается в объеме действующей нормативной базы.

Что касается сводов правил 4-го уровня, то есть, как минимум, две категории объектов, экологические особенности которых настолько существенны, что могут и должны найти отражение при проведении не только в инженерно-экологических, но и других видов изысканий. Это особо охраняемые природные территории (ООПТ) и объекты размещения отходов, и по ним вполне могут быть разработаны своды 4-го уровня. Связано это с тем, что на ООПТ действуют ограничения на применение технических средств, и инженерно-геологические изыскания должны будут выполняться с учетом этого обстоятельства. В то же время, статус ООПТ сводит к минимуму возможности возведения в их пределах сооружений высокого уровня ответственности. Содержание инженерно-экологических изысканий в пределах ООПТ должно учитывать результаты исследований, выполняемых научными подразделениями ООПТ.

Изыскания по объектам размещения отходов также обладают существенной спецификой:

- инженерно-геологические изыскания, и прежде всего буровые работы, должны быть направлены на выявление гидрогеологических характеристик, определяющих возможность размещения отходов на данной территории (для проектируемых полигонов и т.п. объектов), либо мощностей и состава ранее размещенных отходов, количества и состава фильтрата, условий его формирования и разгрузки (для существующих объектов, подлежащих рекультивации);

- инженерно-экологические изыскания должны в полной мере учитывать специфику объекта, включая для проектируемых объектов наличие особо уязвимых биологических и иных реципиентов ожидаемых воздействий, а также возможность социально-экологических конфликтов, а для подлежащих рекультивации существующих объектов – контроль загрязнения почв, грунтов, поверхностных и подземных вод по расширенному перечню показателей, с учетом имеющегося опыта [1, 7];

- инженерно-гидрометеорологические изыскания по объектам размещения отходов должны, помимо всего прочего, давать исходные параметры для расчета объемов образования фильтрата;

- оценка пожароопасности существующих объектов размещения отходов требует разработки специфических методов (определение количества и состава

разлагающихся органических остатков, измерение температурных градиентов, фиксация мест дымовыделения), что далеко не тождественно оценке газогеохимической опасности и в объеме действующей нормативной базы не регламентируется.

Территория инженерно-экологических изысканий по проектируемым и существующим объектам размещения отходов должны быть расширена с учетом фактических радиусов зон воздействия подобных объектов – порядка нескольких километров.

Список литературы

1. Левкин Н.Д., Мухина Н.Е. Загрязнение территорий стоками полигонов твердых бытовых отходов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2012. № 1. С. 19–25.
2. СанПиН 2.1.3684-21 Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий.
3. СП 11-102-97 Инженерно-экологические изыскания для строительства.
4. СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96*».
5. СП 502.1328500.2021 Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.
6. Стурман В.И. Геоэкология: учебное пособие. СПб.: Лань, 2016. 228 с.
7. Трофимова Ю.В., Расторгуев А.В. Оценка полигона твердых промышленных и бытовых отходов как источника загрязнения подземных вод // Инженерные изыскания. 2019. Т. 13. № 3. С. 28–39.
8. Цымбал М.Н., Трофимов В.Т. Позиции, требующие совершенствования научно-методического обеспечения инженерно-экологических изысканий // Материалы XIII Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». М.: Геомаркетинг, 2017. С. 172–175.

V.I. Sturman

Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, st@izh.com

SOME ISSUES OF FURTHER IMPROVEMENT OF THE REGULATORY FRAMEWORK FOR ENGINEERING-ECOLOGICAL SURVEYS

Abstract. Possible ways of developing the regulatory framework for engineering-ecological surveys in the period after the approval of SP 502.1328500.2021 “Engineering environmental survey for construction. General regulations for execution of work” are discussed. The categories of objects are proposed, the specificity of which requires to be taken into account the development of code of practice of the 3rd and 4th levels – waste disposal facilities and specially protected natural sites.

Key words: engineering-ecological surveys; regulatory framework for surveys; codes of practice; methods of surveys; natural and technogenic conditions.

Степанов А.И., Швечкова Н.А.

ООО «Фертоинг», г. Санкт-Петербург, fertoing@fertoing.ru

ПРОБЛЕМАТИКА ПОЛУЧЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЙ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ИЗЫСКАТЕЛЬСКИХ РАБОТ НА АКВАТОРИИ МОРЕЙ

Аннотация. Рассматривается текущее состояние дел и описан регламент мероприятий при получении разрешений на выполнение инженерных изысканий на акватории морей Российской Федерации. Описаны проблемы существующей практики, предложен вариант решения проблемы. Изложены видимые преимущества предлагаемого решения проблемы.

Ключевые слова: федеральные законы; изыскательские работы на акватории; регламентные мероприятия; описание проблем; предложение к диалогу.

Обозначение проблемы

В настоящий момент десятки изыскательских организаций выполняют работы на акваториях различных морей Российской Федерации.

Выполнение инженерных изысканий на море (равно как и любая хозяйственная деятельность) регламентируются Федеральным законом № 155 от 31.07.1998 «О внутренних морских водах, территориальном море и прилежащей зоне Российской Федерации» [5] и Федеральным законом № 187 от 30.11.1995 «О континентальном шельфе Российской Федерации» [7].

Согласно п. 2 ст. 34 [5] и ст. 31 [7], все виды хозяйственной деятельности во внутренних морских водах / территориальном море / континентальном шельфе могут осуществляться только при наличии положительного заключения государственной экологической экспертизы (ГЭЭ), проводимой за счет пользователя природными ресурсами внутренних морских вод и территориального моря. Иными словами, запрещены все виды хозяйственной деятельности на акватории морей Российской Федерации без наличия положительного заключения ГЭЭ.

Согласно ст. 25 [5] и 23, 24 [7], российские заявители, заинтересованные в проведении морских научных исследований, должны подать соответствующий запрос в федеральный орган исполнительной власти не менее чем за шесть месяцев до начала года проведения работ. Срок рассмотрения заявления – до четырех месяцев.

Регламентные мероприятия

В связи с требованиями [5] и [7], любые изыскательские работы на морской акватории подлежат предварительному согласованию с ГЭЭ.

По требованию действующих нормативных технических документов (НТД), до начала изыскательских работ на акватории морей необходимо выполнить следующие мероприятия:

– разработка ОВОС, проведение общественных обсуждений [3]. Срок проведения процедуры – 60 календарных дней.

– согласование намечаемой деятельности в Федеральном агентстве по рыболовству (п. 8 [1]). Срок проведения процедуры – 30 календарных дней.

– согласование намечаемой деятельности с ГЭЭ (ст. 14 [6]). Срок проведения процедуры – 60 календарных дней.

– получение права пользования поверхностными водными объектами на основании решения о предоставлении водных объектов в пользование [4]. Срок проведения процедуры – 30 календарных дней.

– получение разрешения на проведение буровых работ (пп. 22–23 [2]). Срок проведения процедуры – 120 календарных дней.

В результате, по подсчетам авторов необходимость согласования изыскательских работ от 180 (без бурения) до 300 (с буровыми работами) календарных дней.

Текущее состояние дел

Принимая во внимание современную практику проведения конкурсов на изыскательские работы на акватории морей, обычно заказчик не готов проводить конкурс на инженерные изыскания за, как минимум, полгода до их выполнения. По опыту, конкурсы проводятся, в лучшем случае, за несколько месяцев до начала выполнения работ.

В такой ситуации вся ответственность за соблюдение природоохранного законодательства перекладывается на исполнителя работ, который по имеющимся фактическим законодательным срокам не может получить необходимые разрешения. У проектно-изыскательских организаций остается два варианта действий: либо не участвовать в конкурсах и объявить о своем закрытии, либо параллельно выполнять инженерные изыскания и работы по получению разрешения на их выполнение, которые заканчиваются гораздо позже завершения полевых работ по инженерным изысканиям, что формально является нарушением природоохранного законодательства.

При этом необходимо отметить ничтожно малый вред для водной среды вследствие проведения изыскательских работ по сравнению с последующими строительно-монтажными работами.

«Минусы» текущей практики

Последствия вышеизложенной проблемы.

1. Из авторского опыта, большинство изыскательских работ на морской акватории проводится либо без соответствующих разрешений от природоохранных органов, либо такие разрешения выдаются формально (после фактического завершения работ).

2. Снижается конкуренция в сфере изыскательских работ, т.к. некоторые изыскательские организации отказываются от участия в конкурсах, по условиям которых они вынуждены будут нарушать природоохранное законодательство.

3. Ущерб окружающей среде не возмещается.

4. Процедура получения разрешений изыскательские работы на акватории морей излишне усложнена и бюрократизирована, что создает благоприятную «почву» для потенциальных коррупционных нарушений.

5. Законопослушные заказчики, которые все же заблаговременно получают необходимые разрешения, тратят значительные ресурсы на комплекс работ по получению необходимых согласований для проведения инженерных изысканий на акватории морей.

Предлагаемый вариант решения проблемы

Значительное количество отрицательных сторон существующей практики при отсутствии видимых положительных заставляет задуматься о предложениях для модернизации (улучшения, корректировке) действующих НТД.

Предлагается внести следующие изменения.

1. Отнести инженерные изыскания на континентальном шельфе к морским научным исследованиям (ст. 25 [5]), т.к. оба вида деятельности имеют в целом одну и ту же цель – изучение природных условий исследуемой акватории. При этом необходимо сократить срок рассмотрения заявлений на проведение морских научных исследований (инженерных изысканий на акватории морей), т.к. в настоящее время с точки зрения изыскательской организации он является слишком продолжительным (до четырех месяцев).

2. Внести уточнение в ст. 27 [5] и ст. 31 [7], а именно – добавить однозначное определение буровых работ. На взгляд авторов, к буровым работам, для которых необходимо получать отдельное согласование ГЭЭ, можно отнести только работы, связанные непосредственно с добычей нефти/газа, строительством. Буровые работы, выполняемые при проведении инженерных изысканий, наносят пренебрежительно малый ущерб по сравнению с последующими строительно-монтажными работами (ущерб от которых компенсируется после их завершения).

3. Внести разъяснения в ст. 27 [5] и ст. 31 [7], а именно – утвердить перечень видов хозяйственной деятельности, подлежащих согласованию в ГЭЭ. В настоящий момент, формулировка в законе имеет широкое толкование: «Государственной экспертизе подлежат все виды документов, обосновывающих иную деятельность на континентальном шельфе». По аналогии с п. 2 изыскательские работы не включать в список хозяйственной деятельности, подлежащей согласованию в ГЭЭ.

Видимые преимущества предлагаемого варианта

Видимые преимущества описанной схемы:

1. Повышение конкурентной среды в сфере инженерных изысканий на акватории морей.
2. Экономия людских и материальных ресурсов, т.к. не потребуется тратить время на прохождение длительных процедур согласования.
3. Доработка «слабых» мест в действующем нормативном законодательстве.

Предложение к дальнейшему диалогу

В связи с длительностью и сложностью обозначенной проблемы не предлагается быстрых и готовых решений.

Авторы надеются на отклик со стороны профессионального сообщества и представителей государственных структур.

Список литературы

1. Постановления Правительства РФ № 384 от 30.04.2013 «О согласовании Федеральным агентством по рыболовству строительства и реконструкции объектов капитального строительства, внедрения новых технологических процессов и осуществления иной деятельности, оказывающей воздействие на водные биологические ресурсы и среду их обитания».
2. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 202 от 29.06.2012 «Об утверждении административных регламентов Федеральной службы по надзору в сфере природопользования по предоставлению государственной услуги по выдаче разрешений на создание, эксплуатацию и использование искусственных островов, сооружений и установок, проведение буровых работ во внутренних морских водах, в территориальном море Российской Федерации и на континентальном шельфе Российской Федерации, по предоставлению государственной услуги по выдаче разрешений на строительство, реконструкцию, проведение изыскательских работ для проектирования и ликвидацию подводных линий связи во внутренних морских водах и в территориальном море Российской Федерации, по предоставлению государственной услуги по выдаче разрешений на прокладку подводных кабелей и трубопроводов во внутренних морских водах, в территориальном море Российской Федерации и на континентальном шельфе Российской Федерации».
3. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 999 01.12.2020 «Об утверждении требований к материалам оценки воздействия на окружающую среду».

4. Федеральный закон № 74-ФЗ от 03.06.2006 «Водный кодекс Российской Федерации».
5. Федеральный закон № 155 от 31.07.1998 «О внутренних морских водах, территориальном море и прилежащей зоне Российской Федерации».
6. Федеральный закон № 174-ФЗ от 23.11.1995 «Об экологической экспертизе».
7. Федеральный закон № 187 от 30.11.1995 «О континентальном шельфе Российской Федерации».

A.I. Stepanov, N.A. Svechkova

Fertoing LLC, Saint Petersburg, fertoing@fertoing.ru

PROBLEMS OF OBTAINING PERMISSIONS TO PERFORM OFFSHORE ENGINEERING SURVEYS

Abstract. Current state of affairs and rules of procedure for obtaining permissions are described to carry out engineering surveys in the water areas of the seas of Russian Federation. The problems of existing practice are described, a solution to the problem is proposed. The apparent advantages of the proposed solution to the problem are stated.

Key words: federal laws; offshore engineering surveys; scheduled maintenance; description of problems; proposal for dialogue.

Жигалин А.Д.^{1,2}, Архипова Е.В.³, Лавров В.С.¹

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, zhigalin.alek@yandex.ru

²МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии,
г. Москва

³Государственный университет «Дубна», г. Дубна, Московская область, olenageo@mail.ru

ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ГОРОДСКИХ ПОСЕЛЕНИЙ

Аннотация. Геофизическая среда городских поселений разных рангов, от моногородов до крупных промышленно-городских агломераций, представляет собой область аномального проявления геофизических полей, выходящую за пределы административных границ городов. В ее пределах наблюдается изменение всех характеристик природных физических полей с наложением эффекта воздействия техногенных аналогов. Результирующие геофизические поля рассматриваются как один из факторов, формирующих экологическую обстановку, что должно учитываться при проведении инженерно-экологических изысканий под новые городские поселения и расширение существующих, а также при проектировании и создании инженерных сооружений и дальнейшей эксплуатации. Инженерно-экологический контроль геофизической среды городских территорий должен стать обязательным атрибутом перманентного мониторинга, начиная с инженерных изысканий, и осуществляться в разных формах на постоянной основе.

Ключевые слова: геофизическая среда; городские поселения; геофизическая урбоэкология; экологические факторы; геофизический инженерно-экологический мониторинг.

При проведении инженерно-геологических изысканий обязательным является учет сейсмической активности территории, а также фонового радиационного поля и (последнее «достижение») экологического компонента. Это добавление обязало изыскателей учитывать целый ряд новых факторов, которые могут оказывать воздействие на биотические объекты, условия жизнедеятельности населения на урбанизированных территориях разного ранга, которые относятся к территориям интенсивного освоения. Разработаны и разрабатываются новые нормативные технические документы, унаследовавшие во многом регламенты нормативов, разработанных ранее (СП 11-102-97 [5], СанПиН 2.1.7.1287-03 [3] и др.). Попали в поле зрения изыскателей, помимо указанных выше, иные виды геофизических полей: магнитное, тепловое, электрические.

С добавлением новых экологических позиций в инженерных изысканиях изменилась и роль геофизических методов. Так, геофизические методы, широко используемые как инструмент при оценке инженерного качества территории будущего строительства, становятся еще и способом анализа пригодности территории для комфортного проживания и безопасной трудовой деятельности населения. Совершается, таким образом, переход от экологической геофизики (опробованный инженерно-геофизический инструментарий) к геофизической экологии (оценка роли факторов геофизического экологического воздействия).

Создание новых и/или модернизация уже существующих инженерных объектов: промышленных комплексов, промышленных районов, а также городской инфраструктуры и др. – практически всегда приводит к формированию природно-технических эколого-геологических систем, для которых характерна трансформация всех природных компонентов, вплоть до возникновения техногенных ландшафтов. Параллельно создается новая антропогенная геологическая среда, далекая по своим характеристикам (геологическим, геохимическим и геофизическим) от природных эколого-геологических систем. Рассматривая преобразующую роль человека в активном взаимодействии с объектами окружающего мира, следует иметь в виду, что со временем значительная часть этого привычного «окружающего мира» становится продуктом деятельности самого человека. Это выражается в том, что территории городских поселений, являющиеся эколого-геологическими системами, предстают перед людьми как обширные аномалии, геофизические и геохимические, далеко выходящие за административные границы городов. Создавшаяся ситуация подтолкнула к формированию нового научно-практического направления в строительном деле и архитектуре, получившего название «урбоэкология».

Техногенная трансформация экологических функций сфер Земли в зонах интенсивного промышленного освоения и городского строительства касается, в первую очередь, двух видов из них: химическую, связанную с веществом, его миграцией, накоплением или, наоборот, рассеянием с попаданием в трофические цепи, а также геофизическую, «ответственную» за энергетическое жизнеобеспечение биоты. Экологические функции этих видов изменяются в пространственно-временном измерении на всех «этажах», от геологического субстрата (до глубины в несколько километров) до высоких (несколько сотен метров) слоев атмосферы, затрагивая в то же время поверхностную (воды суши) и подземную гидросферу. Подобного рода изменения характерны и для других двух видов экологических функций – ресурсной и динамической. Техногенная их трансформация столь же существенная, хотя иногда менее заметна вследствие специфики функций и ограниченности возможности проводить оценочные наблюдения на территории «захвата» [6].

Основной целью представленной работы является представление результатов оценки интегрального физического экологического воздействия, приводящего в итоге к формированию на территории большинства городских агломераций физического (электрического) загрязнения, действенного фактора в ряду других, которые определяют все вместе общую экологическую обстановку в пределах городских поселений. Следует заметить, что время от времени осуществляемые эпизодические попытки изучения последствий техногенного физического воздействия на население и биоту городов, а также крупных промышленных агломераций, где обращаются большие потоки энергии, в первую очередь, электрической, не позволяли создать полную картину техногенного энергетического загрязнения территорий интенсивного освоения.

Такой подход в принципе не мог дать информативного эффекта именно из-за случайной постановки задач, выбора времени и места проведения экспериментальных исследований. В силу этого возникла необходимость упорядочить изучение урбоэкологической роли геофизических полей, предложив для этой цели новое научно-практическое направление в геофизике (теперь это называется «создание платформы») – геофизическую урбоэкологию [7, 8].

Концептуально геофизическая урбоэкология реализуется уже более полутора десятка лет совместными усилиями энтузиастов: преподавателей и научных работников ряда учебных заведений, а также научных учреждений с привлечением к этой работе студентов, магистрантов и аспирантов. Полученные результаты показывают, что эта концепция постепенно и разными путями завоевывает популярность среди специалистов, работающих на стыке (и в симбиозе) экологии и других направлений наук о Земле и человеке. Так, например, было установлено, что городские поселения разного ранга и хозяйственной ориентации представляют собой геофизические (геохимические, инженерно-геологические и др.) аномалии, которые различаются только амплитудами в зависимости от городского оборота электрической и тепловой энергии, а также промышленных мощностей и развития транспортной сети. В табл. 1 показаны виды и энергетические уровни аномалий природно-техногенных геофизических полей, наблюдаемых в границах городских территорий [8].

Таблица 1
Аномалии геофизических полей, формирующиеся при различных видах хозяйственной деятельности

Виды деятельности	Аномалии геофизического поля				
	Температурная, °С	Акустическая (шум), дБ	Магнитная, нТл	Электрическая, В/км	Радиационная, м ³ /год
Горнодобывающая	от 2–15 до 100–200	30–150	$2 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^3$	$20 - 2 \cdot 10^3$	от 3–10 до 30–50
Энергетика	5–25	10–60	от 10–50 до 200–300	$20 - 3 \cdot 10^3$	от 1–3 до 5–20
Промышленная	от 5–25 до 100–250	20–120	от 10–50 до $5 \cdot 10^3$	$20 - 2 \cdot 10^3$	от 1–5 до 3–50
Сельскохозяйственная	2–10	30–50	от 20–50 до $2 \cdot 10^3$	$20 - 5 \cdot 10^2$	1–3
Градостроительная	5–20	50–120	20–50	$20 - 2 \cdot 10^3$	от 3–5 до 15–20
Транспортная	от 5–20 до 300–500	10–120	50–200	$20 - 2 \cdot 10^3$	1–10

На первых порах внимание геофизиков-экологов было сосредоточено на изучении электромагнитного и радиационного полей, а также акустического (шума) поля и концентрации и соотношения аэроионов обеих полярностей в приземном «дыхательном» слое атмосферы. Полученные результаты показали, что основное внимание следует обращать на электрические поля (магнитную индукцию и показатели ионосодержания), а также на акустический фон, создаваемый транспортными потоками [2]. В качестве иллюстрации на рис. 1 и 2 приведены схематические карты суммарного содержания аэроионов обеих полярностей в приземном слое атмосферы, ион/см³ (рис. 1) [1] и величины магнитной индукции электромагнитного поля в диапазоне 5 Гц – 2 кГц (нТл) (рис. 2) [1]. Полевые измерения были проведены на одном из участков территории ландшафтного заказника «Теплый стан» в г. Москве. Выбранный полигон размером 600×600 м интересен тем, что половина его занята сбереженным при застройке микрорайона лесным массивом (правая сторона), а другая половина, левая, представляет собой современную застройку со всем «набором» инфраструктуры.

Представленная иллюстрация позволяет сделать следующие выводы: электростатическое поле (содержание аэроионов) в приземном слое атмосферы, превышающее 960–1200 ион/см³, создает благоприятные условия на территории лесного массива и лишь в ограниченной части территории городской застройки; электромагнитный фон 100–50 нТл представляется благоприятным практически на всей территории полигона; обнаруживается заметное пониженное влияния электромагнитного поля на жилой массив со стороны лесного участка и, наоборот, влияние электростатического поля на «лесную» часть полигона.

Рис. 1. Суммарное содержание аэроионов обеих полярностей в приземном слое атмосферы, (ион/см³). Обозначения: зеленым цветом выделена комфортная территория, красным – дискомфортная, желтым – переходная зона [1]

Рис. 2. Величина магнитной индукции электромагнитного поля в диапазоне 5 Гц – 2 кГц, (нТл). Обозначения: зеленым цветом выделена экологически безопасная территория, красным – условно безопасная, желтым – переходная зона [1]

Исследования ионного состава атмосферы в середине двадцатых годов проводил биофизик А.Л. Чижевский (1897–1964 гг.). Свои эксперименты он проводил с лабораторными животными, которые помогли ему установить, что при недостаточности аэроионов организм животного начинает страдать, а при полном их отсутствии возможна гибель живых организмов. В то же время, если воздух насыщен аэроионами, он обладает оздоровительным эффектом. Правда, только в том случае, если в нем преобладают отрицательно заряженные ионы. Отрицательные аэроионы А.Л. Чижевский назвал «витаминами воздуха», без наличия которых живые организмы не могут нормально функционировать. Что касается нормативной базы, то известно, что в наши дни «работает» СанПиН 2.2.4.1294-03 [4]. Документ нормирует уровень концентрации и величину коэффициента униполярности q – отношения числа положительных ионов к отрицательным – для помещений (табл. 2).

Табличные данные касаются специфических производственных технологий. Фактически результаты многолетних исследований показывают значительный дефицит аэроионов в атмосфере многих городов [2]. Так, например, в Московском мегаполисе были определены территории, где число аэроионов обеих полярностей составляло $650\text{--}930 \pm n/\text{см}^3$ или $450\text{--}570 \pm n/\text{см}^3$. В г. Дмитрове эти цифры также показали дефицит аэроионов при значениях $830\text{--}450$ и $570\text{--}750 \pm n/\text{см}^3$. Есть данные и по другим городам. Проведенные измерения концентрации аэроионов и соотношения разнополярных ионов в приземном слое атмосферы в городах показали их стабильный дефицит. Это служит достаточным основанием рекомендовать включение в регламент инженерно-экологических изысканий специальные работы по определению

электрических аэроионных характеристик, считая нахождение аэроионов в атмосфере важным экологическим фактором, играющим важную роль в формировании благоприятных (или, наоборот, дискомфортных) условий существования живых организмов на осваиваемой территории.

Таблица 2

Допустимые показатели концентрации аэроионов и величины коэффициента униполярности

Нормируемые показатели	Концентрация аэроионов, $\pm n / \text{см}^3$		Коэффициент униполярности, $q = +n/-n$
	положительной полярности	отрицательной полярности	
Минимально допустимые	$+n$ более или равно 400	$-n$ более 500	$0,45 \leq q < 1,0$
Максимально допустимые	$+n$ менее 50000	$-n$ менее или равно 50000	

В настоящее время исследования на «урбогеофизической платформе» продолжаются. Результаты дополнились интересными акустическими данными в двух диапазонах, слышимом и инфразвуковом, детальными геомагнитными измерениями и др. Авторы стараются не пропустить, не оставить без внимания, различные новации: столбы, увешанные гроздьями электромагнитных индикаторов, «это электробусы», сменившие выхлопные газы на почти бесшумно (?) работающие мощные источники электрического поля, торгово-развлекательные монстры внутри спальных кварталов и др.

В заключение следует остановиться на некоторых целесообразных разработках в градостроительстве в рамках геофизической урбоэкологической концепции.

Речь идет о создании городской инфраструктуры, способствующей формированию оптимального для поселения динамического равновесия всех компонентов геофизического воздействия на экологическую обстановку городских территорий. Такая инфраструктура должна базироваться на объектах, параметры влияния которых должны «вписываться» в нормативные границы гомеостаза для всех представителей городской биоты.

Речь должна идти также об организации инженерно-экологического контроля качества геофизической среды городских поселений, в данном случае представляющую собой локальную городскую эколого-геологическую систему.

Критериями оценки качества городской геофизической среды следует считать амплитудные характеристики всех наблюдаемых геофизических аномалий с учетом соотношения природных и техногенных геофизических полей.

Список литературы

1. Жигалин А.Д., Архипова Е.В., Федорук Н.А., Сазонова В.В. Геофизическая урбоэкология. Электричество в городах // Материалы VII Международной научно-практической конференции «Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы». Воронеж: Воронежская областная типография, 2021. С. 163-168.
2. Контроль аэроионного состава атмосферы урбанизированных территорий / Е.В. Архипова, А.Д. Жигалин, Н.А. Федорук, Е.Э. Тормышева, В.В. Сазонова // Геоэкология. 2020. № 1. С. 28–31. <https://doi.org/10.31857/S0869780920010020>.
3. СанПиН 2.1.7.1287-03 Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы.
4. СанПиН 2.2.4.1294-03 Гигиенические требования к аэроионному составу воздуха производственных и общественных помещений.
5. СП 11-102-97 Инженерно-экологические изыскания для строительства.
6. Трансформация экологических функций литосферы в эпоху техногенеза / В.Т. Трофимов, Д.Г. Зилинг, Т.А. Барабошкина, А.Д. Жигалин, М.А. Харькина. М.: Ноосфера, 2006. 720 с.
7. Трофимов В.Т., Жигалин А.Д., Богословский В.А., Архипова Е.В. Место эколого-геофизических исследований в системе урбоэкологии // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2016. № 4. С. 3–9.
8. Трофимов В.Т., Харькина М.А., Барабошкина Т.А. Жигалин А.Д. Экологические функции абиотических сфер Земли. М.: КДУ, Университетская книга, 2018. 608 с.

A.D. Zhigalin^{1,2}, E.V. Arkhipova³, V.S. Lavrov¹

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, zhigalin.alek@yandex.ru

²Lomonosov Moscow State University, Moscow

³Dubna State University, Dubna, Moscow Region, olenageo@mail.ru

ENGINEERING-ECOLOGICAL QUALITY CONTROL OF THE GEOPHYSICAL ENVIRONMENT OF URBAN SETTLEMENTS

Abstract. Geophysical environment of urban settlements of different ranks, from single-industry towns to large industrial-urban agglomerations, is an area of anomalous manifestation of geophysical fields that goes beyond the administrative boundaries of cities. Within its limits, there is a change in all characteristics of natural physical fields with the imposition of the effect of the impact of technogenic analogs. The resulting geophysical fields are considered as one of the factors that form the ecological situation, which should be taken into account when conducting engineering-ecological surveys for new urban settlements and expanding existing ones, as well as when designing and creating engineering structures and further operation. Engineering-ecological control of the geophysical environment of urban areas should become a mandatory attribute of permanent monitoring, starting with engineering surveys, and be carried out in various forms on an ongoing basis.

Key words: geophysical environment; urban settlements; geophysical urban ecology; environmental factors; geophysical engineering-ecological monitoring.

Колесникова М.В.

Веб-приложение Ecolog assistant, г. Москва, ecolog.mvk@gmail.com

СОЗДАНИЕ ЕДИНОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПРОЕКТА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ «ЭКОЛОГ – ИЗЫСКАТЕЛЬ – ПРОЕКТИРОВЩИК – ЗАКАЗЧИК» НА БАЗЕ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ECOLOG ASSISTANT

Аннотация. Рассмотрены ожидаемые результаты внедрения в проектно-изыскательской организации единой платформы для ведения отчета по инженерно-экологическим изысканиям, создания раздела проекта охрана окружающей среды (мероприятия по охране окружающей среды / перечень мероприятий по охране окружающей среды) и получения сведений об экологических ограничениях (зоны с особыми условиями использования территорий).

Ключевые слова: автоматизация; веб-приложение; инженерно-экологические изыскания; xml-схема; базы данных; раздел проекта; охрана окружающей среды; Ecolog assistant; повышение эффективности; взаимодействие; единая платформа.

В практической работе инженера автоматизация рутинных процессов всегда играла значимую роль. Сейчас использование типовых графических и текстовых редакторов стало не просто нормой, а введено в стандарты документации. Однако именно специализированные программные продукты зачастую лучше отвечают требованиям конкретных профессиональных сообществ, решая специфические задачи.

Кроме того, внедрение технологий информационного моделирования и необходимость предоставлять документы в формате xml-схем требуют обновление инструментов создания технической документации.

Вдохновившись опытом коллег-геологов, много лет использующих в своей практике специализированное программное обеспечение (Инжгео, GEOsimple), автор с коллегами создали веб-приложение для камеральной обработки результатов инженерно-экологических изысканий (ИЭИ).

Изначально, веб-приложение Ecolog assistant было создано для решения локальных задач конкретного эколога-изыскателя и позволяло повышать его личную эффективность за счет снижения времени на камеральную обработку.

Ecolog assistant позволяет полностью вести проект по ИЭИ от рассылки запросов до автоматического создания технического отчета в соответствии требованиями законодательства.

Ecolog assistant заменяет функционал Word, Excel, Яндекс.Карты, Adobe Acrobat. Для ведения проекта по ИЭИ достаточно использовать только Ecolog assistant и AutoCAD. В Ecolog assistant реализован функционал всех вышеназванных программ в той мере, в которой они нужны для создания отчета.

В техническом плане Ecolog assistant состоит из перечисленных пунктов.

1. Базы данных.

Для ведения проекта по ИЭИ используется несколько источников данных:

- организации и сотрудники;
- ведомства;
- лаборатории;
- характеристики природных и антропогенных условий по районам изысканий.

Базы данных пополняются авторами Ecolog assistant и пользователями веб-приложения, причем информация в общий доступ добавляется после модерации.

2. Система управления проектом:

- возможность одновременной работы нескольких сотрудников с одним проектом;
- возможность для руководителя контролировать все этапы выполнения работ;
- выгрузка для заказчика полученных ответов ведомств и промежуточного отчета;
- ведение списка задач для сотрудников;
- контроль сроков проверок полевого оборудования и выписок саморегулируемой организации исполнителя;
- «гостевой доступ» к проекту позволяет заказчикам контролировать этапы выполнения проекта, без возможности редактирования.

3. Облачная система:

- хранение готовых отчетов;
- быстрый доступ к любой составляющей отчета онлайн;
- доступ к запросам в ведомства и ответам.

4. Шаблонизатор отчета и набор методик:

- анализ результатов полевых исследований и экологические расчеты;
- формирования пояснительной записки в форматах .doc и .pdf.

В результате применения современных методов хранения и обработки информации в сочетании с удобным пользовательским веб-интерфейсом Ecolog assistant (рис. 1) позволяет существенно ускорить процесс написания отчета по ИЭИ, при этом повысив качество выпускаемой продукции.

С сентября по декабрь 2021 г. веб-приложение Ecolog assistant участвует в проекте ФАУ «Главгосэкспертиза» «Экспертиза будущего 4.0», в ходе которого проводится опрос среди изыскателей и экспертов.

Проведя анализ, авторы выяснили, что основными проблемами, с которыми сталкивается эколог-изыскатель, является сложность взаимодействия между участниками проектно-изыскательской работы, рассылка запросов и недостаток полевых материалов. Оценка со стороны органов экспертизы также показывает, что несоответствие другим видам инженерных изысканий, проекту и неполнота сведений об ограничениях лидируют в замечаниях.

В связи с этим авторы пришли к выводу о необходимости расширения функционала веб-приложения, в т.ч. внедрения возможности автоматизированной разработки раздела «Перечень мероприятий по охране

окружающей среды» / «Мероприятия по охране окружающей среды» (ПМООС/МООС) и организация обмена данными с отчетом по ИЭИ. В понятие экологическая составляющая проекта» авторы включают отчет по итогам проведения ИЭИ, раздел проекта охраны окружающей среды (МООС/ПМООС) и получение сведений об экологических ограничениях (зонах с особыми условиями использования территорий).

Рис. 1. Главное окно приложения

Веб-приложение будет представлять собой целую экосистему, где эколог-изыскатель и эколог-проектировщик решают все вопросы создания и ведения отчета по итогам проведения ИЭИ и раздела проекта МООС/ПМООС.

Далее представлена схема работы на единой платформе для эколог-изыскателя и эколога-проектировщика.

1. Создание проекта. Он является общим для отчетов по итогам проведения ИЭИ, раздела по охране окружающей среды (ООС) и запросов сведений об экологических ограничениях, тем самым автоматически устраняются возможные несоответствия между этими разделами.

2. Рассылка запросов из базы в более чем 400 инстанций в 47 регионах РФ и получение ответов, которые автоматически появляются в проекте.

3. Создание отчета и заполнение его по блокам, что дает возможность в будущем формировать отчет в форме информационной модели.

4. Наполнение его на основе полевых материалов и внутренней базы данных. База данных описаний природной среды формируется пользователями веб-приложения, каждое добавление проходит модерацию экспертом.

5. Обработка протоколов – внесение данных, а веб-приложение выдает готовый анализ.

6. Выгрузка отчета (рис. 2), готового к отправке и к загрузке в экспертизу в форматах .doc и .pdf.

Рис. 2. Выгрузка отчета

7. Создание раздела ООС. Принцип работы такой же, как с отчетом по итогам проведения ИЭИ. В ООС уже есть вся необходимая для проектировщика данного раздела информация.

8. На любом этапе работы эколог-изыскатель и проектировщик ООС могут направить сведения для проекта с подробными инструкциями напрямую из приложения заинтересованным сторонам.

Идея веб-приложения не только в скорости обработки информации, но и в ее систематизации и внедрении механизмов управления проектом. Иными словами, эколог-изыскатель и эколог-проектировщик находятся внутри одной цифровой среды – получают запросы, обмениваются информацией, пользуются библиотекой, ставят задачи внутри команды и своевременно направляют нужные для дальнейшей разработки проекта данные.

Уже сейчас, по результатам опроса среди пользователей веб-приложения, видно, что скорость выполнения технического отчета по итогам проведения ИЭИ выросла в среднем в 6 раз, без потери качества.

Планируется дальнейшее развитие продукта путем создания инструмента контроля полевых работ, модуля «Смета», инструментов для организации взаимодействия между участниками проектно-изыскательской работ.

Ожидаемые результаты внедрения в организации единой платформы для разработки экологической составляющей проекта:

- сокращение потерь трудового времени;
- исключение на 100% несоответствия в текстовой части ИЭИ и ООС;
- значительное сокращение количества замечаний органов экспертизы;
- повышение качества отчетных материалов;
- увеличение доходности за счет возможности реализации новых объектов теми же ресурсами;
- высвобожденные временные ресурсы. Они могут быть потрачены на более детальную проработку вопросов, на которые зачастую у исполнителя «нет времени»: подготовительный этап работ, повышение квалификации и т.д.
- рост удовлетворенности клиента;
- оптимизация численности персонала;
- прозрачность работ – легкий контроль подрядных организаций на всех этапах написания отчета.

Повышение эффективности работы связано с автоматизацией рутинных процессов, прозрачностью всех процессов, возможностью контроля полевых и камеральных работ.

Главная цель, которую авторы приложения ставят перед собой при разработке данной системы, – повысить качество и эффективность работы эколога-изыскателя и эколога-проектировщика путем цифровизации, а также унификации, сохраняя при этом уникальность в научно-исследовательской части работы.

M.V. Kolesnikova

Ecolog assistant web application, Moscow, ecolog.mvk@gmail.com

CREATION OF A UNIFIED PLATFORM FOR DEVELOPING THE ENVIRONMENTAL COMPONENT OF THE PROJECT AND INTERACTION IN THE SYSTEM “ECOLOGIST – RESEARCHER – DESIGNER – CUSTOMER” BASED ON THE ECOLOG ASSISTANT WEB-APPLICATION

Abstract. The expected results of the introduction in the design and survey organization of a unified platform for maintaining a report on engineering-ecological surveys, creating a section of the environmental protection project (environmental protection measures / list of environmental protection measures) and obtaining information on environmental restrictions (zones with special conditions for the use of territories).

Key words: automation; web-application; engineering-ecological surveys; xml layout; databases; section of the project on list of environmental protection measures / environmental protection measures; Ecolog assistant; increased efficiency; interaction; single platform.

Ермолов А.А.¹, Кизяков А.И.¹, Илюшин Д.Г.^{2,3}, Исаченко А.И.⁴

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, alexandr.ermolov@gmail.com

²ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова», г. Москва

³Фонд поддержки научно-проектной деятельности студентов, аспирантов и молодых ученых «Национальное интеллектуальное развитие», г. Москва

⁴ООО «Арктический научный центр», г. Москва

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ БЕРЕГОВ ЗАПАДНЫХ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ К НЕФТЯНЫМ РАЗЛИВАМ

Аннотация. Проведена оценка экологической чувствительности берегов российского сектора Баренцева и Карского морей к разливам нефти и нефтепродуктов на основе геоморфологического анализа и районирования береговой зоны в соответствии с международной системой индексов ESI (Environmental Sensitivity Index). Результаты, представлены в виде карт экологической чувствительности морских берегов, которые являются основой для разработки планов и проведения мероприятий по ликвидации разливов нефти в случае их возникновения.

Ключевые слова: морские берега; геоморфологический анализ; разливы нефти; экологическая чувствительность; карты экологической чувствительности; Баренцево море; Карское море.

Одним из важнейших направлений обеспечения экологической безопасности при разработке месторождений углеводородного сырья и освоении арктических побережий является предотвращение и устранение последствий потенциально возможных разливов нефти и нефтепродуктов. Оценки воздействия на окружающую среду морских систем добычи и транспорта на арктическом континентальном шельфе показывают, что наиболее тяжелые в экологическом отношении последствия будут возникать при аварийных нефтяных разливах, достигающих береговой зоны. С момента аварии и контакта нефти и нефтепродуктов с морской водой и отложениями береговой зоны развивается сложная картина их взаимодействия, сценарии и результаты которой определяются как природными условиями, так и свойствами самого сырья. В морской среде нефть подвергается воздействию различных химических, физических и биологических процессов и постепенно теряет свои первоначальные свойства, разделяется на группы углеводородов и фракции, вплоть до исчезновения. Это и есть так называемое естественное самоочищение природной среды, которое происходит в морской экосистеме и не несет катастрофических последствий, если, конечно, токсическая нагрузка не превысила допустимые пределы.

На арктических берегах загрязнение дисперсных грунтов нефтью и нефтепродуктами имеет гораздо большую опасность с эколого-геологической точки зрения. Здесь период естественного самоочищения может быть заметно увеличен вследствие суровых гидрометеорологических условий, длительной консервации прибрежного мелководья и акватории морскими льдами, продолжительного отсутствия солнечной радиации и пр. Нефть может проникать

в крупнообломочные отложения, перекрываться рыхлыми осадками в областях интенсивного разрушения берегов, а также осаждаться на участках с низкой гидродинамической активностью среды, на лайдах и пр.

Это обуславливает целесообразность разработки комплексных мероприятий по охране окружающей среды, предупреждению и устранению последствий потенциально возможных разливов нефти и нефтепродуктов. Одним из направлений этой деятельности является оценка экологической чувствительности морских берегов к нефтяным разливам и разработка соответствующих карт, определяющих приоритеты защиты береговых экосистем в случае возникновения чрезвычайных ситуаций. Учитывая приоритеты российских нефтедобывающих компаний авторами проведена типизации, оценка и сравнительный анализ экологической чувствительности берегов российского сектора Баренцева и Карского морей, как одних их наиболее активно осваиваемых регионов.

В развитие многолетних исследований авторов [1–4] в данной публикации представлены отдельные новые результаты типизации, оценки и сравнительного анализа экологической чувствительности берегов российского сектора Баренцева и Карского морей к разливам нефти и нефтепродуктов. Оценка выполнена в соответствии с международной системой индексов чувствительности ESI (Environmental Sensitivity Index) [5] на основе комплексного геоморфологического анализа и районирования береговой зоны по дистанционным спутниковым, картографическим данным и материалам полевых исследований авторов. Чувствительность берегов к нефтяным разливам определялась на основе экспертной оценки и включала анализ геологических, геоморфологических, геоэкологических и гидродинамических условий отдельных береговых районов. В качестве основы использовалось геоморфологическое районирование береговой зоны, разработанное на основе традиционных методических подходов геоморфологии морских берегов. Анализ выполнялся при рассмотрении отдельных литодинамических систем или участков берега, обладающих схожими показателями морфологии и литологии. Используя сочетание рассмотренных факторов, каждому участку присваивался индекс чувствительности к нефтяному загрязнению в соответствии с системой индексов ESI.

Всего на побережье Баренцева и Карского морей выделено 12 типов берегов с различным уровнем экологической чувствительности (табл.). На созданных картах каждый уровень имеет цветную кодировку в соответствии с увеличением индекса экологической чувствительности от холодного цвета к теплему, согласно принятой цветовой шкале. Это обеспечивает наглядную идентификацию экологической чувствительности берега при картографировании и работе с геоинформационными системами, упрощает оперативную работу при планировании ликвидации разливов.

В целях адаптации оригинальных названий международной системы индексов к региональным условиям при разработке легенды в названия были

внесены изменения, которые можно считать минимальными. Крупность пляжевых отложений принята в соответствии с системой индексов ESI.

Таблица

Экологическая типизация берегов Баренцева и Карского морей

№	Тип берега	Индекс ESI
1	Открытые скалистые уступы	1A
2	Открытые скалистые уступы с валунно-глыбовой отмосткой	1C
3	Защищенные скалистые уступы и берега, сложенные крупнообломочным материалом	8D
4	Открытые ледяные уступы	1D
5	Открытые уступы в песчано-глинистых отложениях	3B
6	Защищенные уступы в песчано-глинистых отложениях	8A
7	Пляжи, сложенные разнотернистым песком	4
8	Пляжи, сложенные смешанными песчано-галечными отложениями	5
9	Галечные и валунно-глыбовые пляжи	6B
10	Защищенные песчано-илистые приливные и ветровые осушки (отмели, мелководья)	9A
11	Соленые и солоноватые марши (лайды)	10A
12	Затапливаемые низменные тундры	10E

Наибольшую протяженность на исследованных побережьях имеют защищенные абразионно-денудационные берега заливов и проливов, выработанные в дочетвертичных толщах и характеризующиеся наличием скалистых уступов и крупнообломочных отложений в волноприбойной зоне (индекс – 8D). Немногим меньшую протяженность имеют защищенные термоденудационные и абразионно-термоденудационные берега с уступами, выработанными в песчано-глинистых отложениях (индекс – 8A), а также открытые абразионные и термоабразионные берега, сложенные рыхлыми (нелитифицированными) отложениями (индекс – 3B). Аккумулятивные выровненные берега (индексы – 4, 5 и 6B) имеют протяженность сопоставимую с протяженностью абразионных рыхлых берегов.

Наиболее чувствительными к загрязнению нефтью и нефтепродуктами являются аккумулятивные лагунно-бухтовые и дельтовые берега с обширными осушками, мелководьями и лайдами (индекс 9A, 10A и 10E). Наименее чувствительные – открытые морскому волнению абразионные и абразионно-денудационные берега с клифами, бенчами и валунно-глыбовыми отмостками (индексы 1A и 1C), выработанные в дочетвертичных отложениях.

Специфические термоденудационные ледяные берега, образованные ледниковыми куполами и выводными ледниками арктических архипелагов, также имеют весьма широкое распространение. Это обусловлено высокой изрезанностью берегового контура островов, являющихся областью современного оледенения. Берега этого типа имеют низкую экологическую чувствительность – индекс 1D.

Материалы подготовлены в ходе выполнения работ по анализу и обобщению результатов экологических исследований морей Российской Федерации, разработке экологических атласов в рамках серии «Экологические атласы морей России» по заказу ПАО «НК «Роснефть»» и работ по публикации результатов экологических исследований, проведенных ООО «Арктический научный центр» в 2012–2017 гг. в рамках серии «Атласы морей Российской Арктики» по заказу ООО «Арктический научный центр», научного института ПАО «НК «Роснефть»»; по темам ГЗ № 121051100167-1; № 121051100164-0.

Список литературы

1. Экологический атлас. Баренцево море / В.О. Мокиевский, Н.А. Дианский, А.В. Долгов, Ю.В. Краснов, А.Е. Рыбалко, Л.А. Сергиенко, А.Б. Цетлин, Н.А. Ярагина, К.В. Артамонова, С.В. Бадина, С.Е. Беликов, Р.В. Гончаров, Н.А. Долгова, А.А. Ермолов, Е.Ю. Жданова, Д.Г. Илюшин, А.И. Исаченко, А.И. Кизяков, О.П. Коновалова, Т.А. Михайлова, П.Г. Михайлюкова, Н.А. Стрелкова, Е.С. Чертопруд, А.С. Валиева, И.А. Гангнус, Т.М. Гизатулин, Д.М. Глазов, М.А. Глебова, Ю.В. Ермилова, Д.Р. Загретдинова, Р.Е. Лазарева, М.В. Мардашова, Н.В. Мокиевская, И.И. Панасенкова, Н.В. Петров, Т.А. Прохорова, М.И. Семенова, Д.А. Удовик, В.В. Фомин, А.А. Эрендженева. М.: Фонд НИР, 2020. 450 с.
2. Экологический Атлас. Карское море / В.О. Мокиевский, А.Б. Цетлин, Л.А. Сергиенко, А.В. Евсеев, М.В. Гаврило, М.Г. Деев, А.А. Ермолов, Д.Г. Илюшин, А.И. Исаченко, Д.М. Глазов, Я.О. Ефимов, Д.Р. Загретдинова, К.А. Корнишин, К.В. Кочи, О.В. Максимова, А.А. Полухин, Д.А. Удовик. М.: Арктический научный центр, 2016. 272 с.
3. Экологический Атлас. Море Лаптевых / В.О. Мокиевский, А.Б. Цетлин, Л.А. Сергиенко, А.В. Евсеев, К.Н. Кособокова, В.А. Спиридонов, С.Е. Беликов, М.В. Гаврило, А.А. Ермолов, Д.Г. Илюшин, А.И. Исаченко, А.И. Кизяков, С.А. Покрашенко, Д.М. Глазов, М.Б. Данилов, Д.В. Добрынин, Я.О. Ефимов, Д.Р. Загретдинова, К.А. Корнишин, К.В. Кочи, О.В. Максимова, Д.Ю. Назаров, А.Б. Никишина, О.Б. Покровская, А.А. Полухин, Е.А. Смирнова, Д.А. Удовик. М.: Арктический научный центр, 2017. 303 с.
4. Экологический атлас. Черное и Азовское моря / В.О. Мокиевский, А.Б. Цетлин, Е.И. Игнатов, В.Н. Белокопытов, А.Г. Зацепин, А.С. Зернов, С.А. Литвинская, И.А. Репина, А.И. Исаченко, Д.Г. Илюшин, Р.В. Гончаров, П.Г. Михайлюкова, А.А. Ермолов, А.И. Кизяков, Е.Г. Арашкевич, Л.М. Сафронова, Д.Ф. Афанасьев, Г.А. Колючкина, У.В. Симакова, В.Л. Семин, В.А. Лужняк, С.А. Букреев, Т.О. Барабашин, В.В. Краснова, Р.А. Беликов, В.В. Миненкова, М.Б. Астапов, С.М. Фазлуллин, П.А. Тильба, Д.Р. Загретдинова, М.И. Семенова, М.А. Глебова, Т.М. Гизатулин, М.А. Жукова, Т.А. Матвеева, О.В. Максимова, Д.Ю. Назаров,

А.М. Амелина, Р.Е. Лазарева, Л.А. Живоглядова, Н.Б. Ескин, А.С. Валиева.
М.: Фонд НИР, 2019. 464 с.

5. Environmental Sensitivity Index Guidelines Version 4.0 / J. Petersen, D. Nelson, T. Marcella, J. Michel, M. Atkinson, M. White, C. Boring, L. Szathmary, J. Weaver. Washington, DC: NOAA, 2019. 228 p.

A.A. Ermolov¹, A.I. Kizyakov¹, D.G. Ilyushin^{2,3}, A.I. Isachenko⁴

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, alexandr.ermolov@gmail.com

²Lomonosov Moscow State University Marine Research Center LLC, Moscow

³Foundation “National Intellectual Resource”, Moscow

⁴Arctic Research Center LLC, Moscow

ECOLOGICAL SENSITIVITY OF THE RUSSIAN WESTERN ARCTIC SEA SHORES TO OIL SPILLS

Annotation. An assessment of the ecological sensitivity of the shores of the Russian sector of the Barents and Kara seas to oil and petroleum product spills was carried out on the basis of geomorphological analysis and zoning of the coastal zone in accordance with the international system of indices ESI (Environmental Sensitivity Index). The results presented in the form of maps of the ecological sensitivity of the seashores, which are the main one in the development of plans and implementation of measures to eliminate oil spills in case of their occurrence.

Keywords: seashores; geomorphological analysis; oil spills; environmental sensitivity; ecological sensitivity maps; Barents Sea; Kara Sea.

Комова Н.Н., Зотова Л.И.

МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии,
г. Москва, nnkomova@gmail.com

ЛИТОКРИОГЕННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЛАНДШАФТОВ ПРИМОРСКИХ РАВНИН ВОСТОЧНОЙ ЧУКОТКИ

Аннотация. Рассматривается методический прием оценки и картографирования мерзлотной (литокриогенной) устойчивости ландшафтов к проявлению опасных криогенных процессов в случае потенциального антропогенного нарушения поверхности. Синтез шестилетних полевых мониторинговых исследований в пределах тестового полигона Восточной Чукотки с использованием данных дистанционного зондирования позволил изучить дифференциацию ландшафтов, выявить факторы, определяющие их устойчивость, а также классифицировать их по уязвимости к внешним воздействиям с использованием интегрального индекса. Составлены карты масштаба 1:200 000: ландшафтно-типологическая, серия тематических мерзлотных и карта литокриогенной устойчивости. Результаты геоинформационного анализа этих карт следует использовать на предпроектных стадиях хозяйственного освоения, инженерных изысканий и экологического мониторинга, что актуально для отдаленных труднодоступных регионов криолитозоны.

Ключевые слова: мерзлота; криолитозона; криогенные процессы; устойчивость ландшафтов; Чукотка; геоинформационное картографирование.

Литокриогенная устойчивость – способность северных геосистем противостоять техногенной активизации криогенных процессов, которые не только изменяют облик коренных ландшафтов, но и представляют угрозу функционированию инженерных сооружений [2]. Понятие «литокриогенная устойчивость» рассматривается авторами как синоним мерзлотной «чувствительности», «уязвимости» (vulnerability) ландшафтов [3, 4].

Рис. 1. Ландшафтная карта полигона

Исследования литокриогенной устойчивости ландшафтов проводились в пределах ключевого полигона приморских равнин Восточной Чукотки в природной зоне типичных тундр.

В качестве основного материала для составления ландшафтной карты масштаба 1:200 000 (рис. 1) был использован многозональный спутниковый снимок Landsat-8. В программном пакете ArcGIS 10.6.1 изображение декодировалось с использованием контролируемой классификации максимального правдоподобия (maximum likelihood classification). Итоговая карта создавалась методом графического оверлея, путем наложения слоев гидрографической сети, геоморфологических уровней, растительности, а также участков антропогенной нагрузки.

Итого на территории полигона выделено 33 типа природно-территориальных комплекса ранга урочище, сгруппированных по трем типам увлажнения, 11 типам местности и 12 типам почвенно-растительных покровов (рис. 2).

Природные ландшафты (Дренаж)	Тип рельефа	Генезис	ДЕНУДАЦИОННО-ЭРОЗИОННЫЙ			
		Морфология	Горы глыбовые на докамбрийских и нижнедевонских сланцах и нижнемеловых гранитных интрузиях			
		Формы и характер рельефа	Вершины	Склоны		
		Тип местности	абс.отм. (250-450м)	Крутые (>15°)	Средние (5-15°)	Подножья (<5°)
		Состав грунтов	глыбы	Глыбы щебень	Глыбы щебень	Глыбы с суглинистым заполнителем
		Индекс	A1	A2	A3	A4
		Геоморфологические поверхности
Горнотундровые	Почвенно-растительные комплексы					
	Гольцы, каменистые пустыни	1	>2 м 0-50%	>2 м 0-50%		
	Куртинные разнотравные каменистые тундры на горных примитивных почвах	2			>2 м 0-50%	1,6-2 м 0-50%
	Тундры травянисто-лишайниково - дриадовые на горных примитивных почвах	3			>2 м 0-50%	>2 м 0-50%
Горнотундровые	Альпийские луга осоково-разнотравные на перегнойно-глеевых почвах тундровых луговин	4	>2 м 0-50%	>2 м 0-50%		

Рис. 2. Фрагмент легенды к ландшафтной карте

Для оценки литокриогенного состояния ландшафтов было выбрано четыре фактора, влияющих на потенциальную активизацию нежелательных криогенных процессов, связанных с фазовыми переходами воды.

1) *Содержание льда в переходном слое, W*. Переходный слой – горизонт, подстилающий сезонноталый слой, который может перейти в состояние оттаивания из-за экстремальных климатических колебаний [2]. Потенциальное нарушение и оттаивание этого слоя активизирует процессы термокарста, термоэрозии, солифлюкции и др. Гравиметрические значения содержания льда (воды) были получены в ходе колонкового бурения в полевые сезоны 2019 и 2020 гг. наряду с использованием данных инженерно-геологических изысканий.

2) *Литологический состав, L*. Состав пород также определяет интенсивность развития криогенных процессов. Наименее устойчивыми к изменению температурных и влажностных условий являются сильнольдистые торфа и тонкодисперсные толщи (глины, тяжелые суглинки), а самыми устойчивыми считаются крупнозернистые пески и валунные отложения. Данные по составу пород сезонноталого слоя были получены в ходе полевых исследований 2015–2020 гг. и по карте четвертичных отложений.

3) *Защитные, или теплоизоляционные, свойства растительности, P*. Теплоизоляционные свойства напочвенного покрова (включая травы, кустарники, мохово-лишайниковый слой, органический почвенный горизонт) обуславливают сохранность температурных условий мерзлых пород. Чем больше проективное покрытие, высота растительных сообществ и более мощный торфяной горизонт, тем опаснее уничтожение (сведение) почвенно-растительного покрова. Этот параметр был описан и откалиброван в ходе полевых ландшафтных исследований.

4) *Скорость самовосстановления растительности после нарушения, S*. Этот фактор определяет, насколько быстро ландшафт вернется в фоновое состояние. Чем меньше потенциал восстановления, тем выше риск активации экзогенных процессов. Показатели самовосстановления для различных растительных покровов были взяты из работы Н.Г. Москаленко [1].

Используемые в оценке природные факторы по-разному реагируют на один и тот же вид воздействия, следовательно, изменение их значений по-разному влияет на активизацию экзогенных процессов. В целях учета значимости (вклада) каждого фактора в общей оценке им присваивались весовые коэффициенты методом экспертного оценивания (табл.). По формуле (1) был рассчитан КМУ – коэффициент мерзлотной устойчивости территории к внешним воздействиям:

$$\text{КМУ} = \frac{(Wk_1 + Lk_2 + Pk_3 + Sk_4)}{4}. \quad (1)$$

После определения значений факторов (влажность переходного слоя, литология сезонноталого слоя, защитные свойства покровов и скорость восстановления растительности) по формуле (1) для каждого из 33 ландшафтов было рассчитано, что КМУ варьирует от 0,30 (самый устойчивый) до 0,95 (самый неустойчивый). Шкала устойчивости разделяется на четыре категории:

1) устойчивые ($KМУ < 0,35$); 2) слабоустойчивые ($KМУ = 0,35–0,50$); 3) относительно неустойчивые ($KМУ = 0,51–0,75$) и 4) неустойчивые ($KМУ > 0,75$).

Таблица
Градация факторов, определяющих литокриогенную устойчивость ландшафтов с
присвоением им весовых коэффициентов

Оценочные факторы	Оценка влияния (балл)				Весовые коэффициенты
	1 слабо влияет	2 влияет	3 заметно влияет	4 сильно влияет	
Влажность (льדיстость) подстилающих пород W , %	0–50	50–100	100–200	> 200, наличие залежеобразующих льдов	0,45
Литологический состав сезонноталого слоя L	глыбы, галька, щебень	пески с галькой и гравием	глины, суглинки и супеси	торф	0,15
Снижение защитных свойств почвенно-растительного покрова P	минимальное (разреженный травяно-кустарниковый покров)	среднее (травяно-моховый покров, $h_{\text{торфа}} < 0,1$ м)	сильное (пушицево-осоковые кочкарники ($h_{\text{торфа}} = 0,1–0,2$ м))	максимальное (осоково-моховые влажные луговины и болота ($h_{\text{торфа}} > 0,2$ м))	0,30
Скорость самовосстановления растительного покрова S , годы	быстрая, 1–3	средняя, 4–6	медленная, 7–9	медленная и неполная, > 10	0,10

В результате все ландшафты полигона были ранжированы на основе указанных рассчитанных факторов с использованием индекса устойчивости КМУ, который определяет уязвимость ландшафта к потеплению климата или антропогенным нарушениям поверхности. Чем меньше значение этого показателя, тем более устойчив ландшафт. Результаты ранжирования всех ландшафтов по трем группам устойчивости представлены на рис. 3.

Пространственный ГИС-анализ итоговой оценочной карты показал, что устойчивые ландшафты занимают 31,7% площади полигона, или 54,4 км². Это склоны и вершины гор, покрытые каменисто-лишайниковой тундрой, альпийские луга и выровненные участки вершин четвертой ледниково-морской террасы. Для этих участков характерны скальные основания и грубообломочные

толщи слоя сезонного протаивания, определяющие устойчивость этих территорий. Среди экзогенных процессов здесь преобладают комплекс склоновых (мерзлотный крип, осыпание склонов, реже солифлюкция) процессов, морозное растрескивание скальных обломков и криогенная сортировка пород. В случае осуществления хозяйственной деятельности (строительство, добыча полезных ископаемых и т.д.) на этих участках развитие экзогенных процессов минимально.

Рис. 3. Карта устойчивости ландшафтов

Относительно неустойчивые ландшафты занимают треть (34,5%, или 59,3 км²) полигона и представлены равнинными участками. Самые неустойчивые ландшафты (дренажные впадины, заболоченные участки и места проезда гусеничного транспорта) в пределах морских террас и водно-ледниковой равнины занимают 19,2% территории, или 33 км² [4]. Эта группа ландшафтов характеризуется крайне высокой восприимчивостью к нарушениям, обусловленной как высокой льдистостью подстилающих пород, суглинистым составом отложений, так и слабыми протекторными свойствами и низкой восстанавливаемостью растительных покровов. Как правило, это пушицево-кочкарные тундры, луговины и болота, а также ложбины стока и места проезда гусеничной техники. В случае каких-либо нарушений, на этих участках будут активно развиваться процессы термокарста, термоэрозии, заболачивания территории и образование криогенных оползней.

Участками, для которых не проводилась классификация (3,7%, или 6,4 км²), стали озера, русла рек, а также морские галечниковые косы и пляжи.

Таким образом, в результате проведенных исследований были выявлены региональные особенности мерзлотно-ландшафтной дифференциации ландшафтов приморских равнин Восточной Чукотки, а также установлена степень потенциальной устойчивости доминирующих ландшафтов к активизации опасных криогенных процессов, что особенно востребовано на предпроектных стадиях хозяйственного освоения, инженерных изысканий и экологического мониторинга.

Список литературы

1. Москаленко Н.Г. Изменения растительности севера Западной Сибири в условиях меняющегося климата и техногенных нарушений // Известия Русского географического общества. 2012. Т. 144. № 1. С. 63–72.
2. Shur Y., Hinkel K.M., Nelson F.E. The transient layer: implications for geocryology and climate-change science // Permafrost and Periglacial Processes. 2005. Vol. 16. No. 1. P. 5–17. <https://doi.org/10.1002/ppp.518>.
3. Tumel N., Zotova L. Diagnostics and mapping of geoecological situations in the permafrost zone of Russia // Geosciences. 2019. Vol. 9. Issue 8. ID 353. <https://doi.org/10.3390/geosciences9080353>.
4. Vulnerability of the permafrost landscapes in the Eastern Chukotka coastal plains to human impact and climate change / A. Maslakov, L. Zotova, N. Komova, M. Grishchenko, D. Zamolodchikov, G. Zelensky // Land. 2021. Vol. 10. Issue 5. ID 445. <https://doi.org/10.3390/land10050445>.

N.N. Komova, L.I. Zotova

Lomonosov Moscow State University, Moscow, nnkomova@gmail.com

LITHOCRYOGENIC STABILITY OF THE COASTAL PLAINS OF EASTERN CHUKOTKA

Abstract. A methodological technique for assessing and mapping the permafrost (lithocryogenic) stability of landscapes to manifestation of dangerous cryogenic processes in case of potential anthropogenic disturbance of the surface is considered. The synthesis of six-year field monitoring studies within the test site of Eastern Chukotka using remote sensing data made it possible to study the differentiation of landscapes, identify the factors that determine their stability, and classify them according to their vulnerability to external influences using an integral index. Maps of scale 1:200 000 were compiled: landscape-typological, a series of thematic permafrost maps and a map of lithocryogenic stability. The results of analysis of these maps using geoinformation systems should be used at the pre-design stages of economic development, engineering surveys, and environmental monitoring, which is important for remote, hard-to-reach regions of the permafrost zone.

Key words: permafrost; cryolithozone; cryogenic processes; landscapes' stability; Chukotka; geoinformation mapping.

Калинка О.П., Карнатов А.Н.

Мурманский морской биологический институт РАН, Мурманск, olg-kalinka@yandex.ru

КАРТЫ УЯЗВИМОСТИ КАК АКТУАЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ

Аннотация. В составе проектной документации по итогам проведения инженерно-экологических изысканий присутствует ряд разделов, касающихся экологического состояния окружающей среды, оценки негативного воздействия на нее и экологического мониторинга, а также учета социально-экономических интересов. Комплексным решением этих вопросов могут служить карты уязвимости природных экосистем, составленные на основе метрического подхода. Настоящее исследование посвящено оценке коэффициентов приоритетной защиты абиотических ресурсов. На современном этапе при расчетах уязвимости в основном применяются порядковые величины в качестве коэффициентов, что неприемлемо, если с ними проводятся арифметические действия.

Ключевые слова: карты уязвимости; абиотические ресурсы; коэффициенты приоритетности защиты; инженерно-экологические изыскания.

В соответствии с нововведенными сводами правил [11–13] инженерно-экологические изыскания, в т.ч. и на континентальном шельфе, должны обеспечивать получение необходимых и достаточных данных для:

- оценки экологического состояния территории/акватории;
- оценки воздействия на окружающую среду планируемой деятельности;
- обоснования в проектной документации мероприятий по охране окружающей среды, предотвращения, снижения или ликвидации неблагоприятных воздействий, а также сохранения, восстановления и улучшения экологической обстановки для создания благоприятных условий жизнедеятельности человека, среды обитания растений и животных;
- принятия мер по сохранению социально-экономических, исторических, культурных, этнических и других интересов местного населения;
- принятия мер по организации и проведению экологического мониторинга.

Комплексным решением этих вопросов могут служить карты уязвимости природных комплексов (экосистем) к основным ожидаемым видам антропогенного воздействия. Такие карты наглядно показывают границы наиболее уязвимых к загрязнению участков прибрежно-морских зон (рис.). Результат инженерно-экологических изысканий, отображаемый на картах (схемах), прописан в [12] (прил. А, п. 9 «Карта прогнозируемого экологического состояния»).

При создании карт уязвимости учитываются сведения о характере пространственного распределения важных компонент биоты по сезонам (в единицах измерения, принятых для каждой из групп биоты) на основе многолетних рядов данных. Подготавливаются карты потенциально уязвимых

абиотических компонентов, где показаны границы особо значимых эколого-экономических и социокультурных объектов.

Рис. Карты «относительной» интегральной уязвимости Белого моря по сезонам: а – зима; б – весна; в – лето; г – осень

Для определения, насколько один объект более важен для защиты, чем другой, используют коэффициенты уязвимости биоты и коэффициенты приоритетной защиты особо значимых объектов. Однако их оценка – достаточно сложная и актуальная научная проблема, т.к. нет единого мнения, как рассчитывать и каким образом представлять математически различия в удельной уязвимости широкого спектра значимых природных и техногенных ресурсов. В большинстве случаев, для упрощения задачи, подобные коэффициенты задаются одним или несколькими параметрами на порядковой шкале. В качестве обоснования приводятся лишь критерии, с учетом которых определяется, что один объект более важен для защиты, чем другой, а конкретные значения основаны, главным образом, на субъективном мнении экспертов и поэтому неоднозначны. Но используемые для вычислений коэффициенты должны быть строго метрическими. Иначе проводить с ними арифметические действия недопустимо [9, 14], т.к. итоговые карты будут представлять недостаточно корректный результат [6].

Далее рассматриваются вопросы, связанные с коэффициентами приоритетной защиты абиотических ресурсов, которые должным образом не проработаны на современном этапе. Для важных компонентов биоты варианты решения проблем по коэффициентам уязвимости без использования порядковых величин уже освещались в публикациях [5, 6, 16, 29].

В различных источниках выделяются следующие основные особо значимые эколого-экономические и социокультурные объекты, требующие приоритетной защиты:

- экологически значимые районы (ключевые места обитания птиц, морских млекопитающих; места нереста и нагула рыб, концентраций выводков птиц, скоплений промысловых беспозвоночных; районы размножения крабов и развития их личинок);

- районы производственной (хозяйственной) деятельности (районы промышленного рыболовства, добычи донных беспозвоночных, морских водорослей; участки разведения марикультуры; инфраструктура, относящаяся к разведке, добыче и транспортировке нефти; гидротехнические и портовые сооружения);

- рекреационные территории (акватории пляжей, зоны любительского рыболовства, санаторно-курортные зоны, места погружения с аквалангом, плавучие гостиницы, рестораны и кафе, гавани для яхт);

- исторически значимые и культурные районы (объекты культурного наследия, плавучие музеи).

Проведенное исследование литературных источников и анализ существующих оценок важности различных эколого-экономических, социокультурных ресурсов показали, что выделяются три основных подхода определения их приоритетности защиты.

Простое ранжирование. Степень ценности или значимости учитываемых объектов/ресурсов определяется путем присваивания им баллов на качественном уровне (т.е. не на метрической шкале, а на порядковой, когда за условные единицы принимается номер в возрастающей последовательности величин). Подобный подход применяется во многих методиках [2, 7, 8, 10, 15, 22–24, 26, 31], где на основе знаний экспертов коэффициенты ранжируются. В большинстве случаев алгоритм допускает отсутствие детальных исходных данных и сложных преобразований для получения конечного значения коэффициентов приоритетной защиты. Главная проблема и трудность в данном случае – это прийти к консенсусу мнений разнопрофильных специалистов.

Оценка на основе количественных характеристик и параметров. Во многих случаях оценка приоритетности защиты представляется в денежном выражении через ущерб, неполученную прибыль, стоимость восстановления и пр. [4, 20, 25, 30]. Зачастую не всегда возможно дать такую оценку. Особенно это относится к некоммерческим ресурсам, например, объектам культурного наследия. Приблизительная количественная оценка экологической уязвимости

не через денежное выражение ущерба была предложена и применена на практике Южно-Тихоокеанской комиссией по прикладным наукам о Земле [19, 33].

Полуколичественная оценка коэффициентов приоритетной защиты. Сочетание перечисленных выше двух подходов. В ряде работ рекомендуется использовать матрицу на основе двух и более параметров для определения уязвимости или чувствительности (фактически приоритетности защиты различных ресурсов), когда одна из осей может считаться количественной, а другая – порядковой [21, 27, 28]. Или по каждому виду ресурсов проводится «ранжирование» части параметров, характеризующих учитываемые ресурсы, в зависимости от численных значений этих параметров, но перевод численных значений в безразмерные баллы часто ведется без сохранения исходных соотношений между величинами [17, 18, 32].

В целом можно сказать, что наиболее оптимальные и корректные унифицированные оценки могут быть даны на основе обобщения многолетних данных, например, по затратам различного характера от ликвидации нефтеразливов, выраженные в денежном эквиваленте для применения их в конкретных случаях [19, 20, 25, 33]. Так, например, D.S. Etkin разработала универсальную модель основ оценки затрат на ликвидацию разливов нефти (basic oil spill cost estimation model – BOSCEM), которая учитывает затраты на реагирование, экологический и социально-экономический ущерб для фактических или гипотетических разливов [20]. Каждый разлив был классифицирован по входным критериям – тип и объем нефти, общие характеристики для определения соответствующих модификаторов затрат. Для расчета социально-экономического ущерба базовая социально-экономическая стоимость одного галлона конкретного вида/объема нефти умножается на соответствующий модификатор стоимости социально-экономического и природного ущерба, а также на объем разлива.

Однако не во всех странах имеются подобные базы данных по разливам нефти, поэтому для расчета коэффициентов приоритетной защиты так же можно применить оценки экономического ущерба различным природным ресурсам, видам деятельности, и неполученный доход из-за загрязнения, например, ущерб транспортным ресурсам и порту, воспроизводству биоресурсов, туризму [1, 3, 25] и др.

Таким образом, корректно составленные карты уязвимости (на основе метрического подхода к определению коэффициентов уязвимости и приоритетной защиты) в составе проектной документации по итогам проведения инженерно-экологических изысканий могут дать обоснованные количественные оценки по принятию предложений к программе производственного экологического мониторинга. Карты наглядно показывают границы районов повышенной уязвимости, дают информацию, какие ресурсы требуют приоритетной защиты, и могут способствовать минимизации ущерба окружающей среде. Создание карт интегральной уязвимости – важный этап в

деле предотвращения чрезвычайных ситуаций, готовности к ним и реагирования на них.

Список литературы

1. Авдотьин В.П., Дзыбов М.М., Самсонов К.П. Оценка ущерба от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. М.: ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2012. 468 с.
2. Блиновская Я.Ю. Методы комплексной оценки экологической чувствительности прибрежно-морских зон к нефтяному загрязнению (на примере юга Дальнего Востока): дис. ... докт. техн. наук. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2011. 382 с.
3. Егорова Е.Н. Методические основы оценки экономического ущерба, возникающего в результате аварийных разливов нефти на морских акваториях // Исследовано в России. 2004. Т. 7. С. 955–971.
4. Егорова Е.Н. Экономические инструменты защиты окружающей среды от разливов нефти при морских транспортировках. Владивосток: Морской государственный университет адмирала Г.И. Невельского, 2013. 197 с.
5. Калинин О.П., Карнатов А.Н. Оценка коэффициентов уязвимости биоты Кольского залива от воздействия нефти // Тезисы XXXIV конференции молодых ученых Мурманского морского биологического института. Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 2016. С. 70–72.
6. Кольский залив и нефть: биота, карты уязвимости, загрязнение / Под ред. А.А. Шавыкина. СПб.: Реноме, 2018. 520 с.
7. Методические подходы к созданию карт экологически уязвимых зон и районов приоритетной защиты акваторий и берегов Российской Федерации от разливов нефти и нефтепродуктов. Владивосток – Москва – Мурманск – Санкт-Петербург: WWF, 2012. 60 с.
8. Новиков М.А. Интегрированная оценка эколого-рыбохозяйственной уязвимости морских акваторий: от теории к практике. Мурманск: ПИНРО, 2013. 124 с.
9. Орлов А.И. Организационно-экономическое моделирование: в 3 ч. Ч. 2. Экспертные оценки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 486 с.
10. Погребов В.Б. Интегральная оценка экологической чувствительности биоресурсов береговой зоны к антропогенным воздействиям // Основные концепции современного берегопользования / Под ред. Л.Н. Карлина, В.В. Денисова, М.Б. Шилина. СПб.: РГГМУ, 2010. Т. II. С. 43–85.
11. СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96*».
12. СП 502.1325800.2021 Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.
13. СП 504.1325800.2021 Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования.

14. Хованов Н.В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. СПб.: Санкт-Петербургский университет, 1996. 196 с.
15. Шавыкин А.А., Ильин Г.В. Оценка интегральной уязвимости Баренцева моря от нефтяного загрязнения. Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 2010. 110 с.
16. Шавыкин А.А., Карнатов А.Н. Способ построения карт уязвимости прибрежно-морских зон от нефти, нефтепродуктов и других химических веществ на основе расчетов с метрическими величинами: патент на изобретение РФ № 2648005. Заявка № 2016150007. Приоритет от 21.03.2018.
17. Bermingham G. Marine oil spill risk assessment. Parnell: Navigatus Consulting, 2015. 397 p.
18. Depellegrin D., Blažauskas N., de Groot R. Mapping of sensitivity to oil spills in the Lithuanian Baltic Sea coast // *Baltica*. 2010. Vol. 23. No. 2. P. 91–100.
19. Environmental vulnerability index (EVI) to summarize national environmental vulnerability profiles: SOPAC Technical Report 275 / U. Kaly, L. Briguglio, H. McLeod, S. Schmall, C. Pratt, R. Pal. Suva: SOPAC, 1999. 66 p.
20. Etkin S.D. Modeling oil spill response and damage costs. Washington, DC: U.S. EPA, 2004. 15 p.
21. Hiscock K., Tyler-Walters H. Assessing the sensitivity of seabed species and biotopes – the Marine Life Information Network (MarLIN) // *Hydrobiologia*. 2006. Vol. 555. P. 309–320. <https://doi.org/10.1007/s10750-005-1127-z>.
22. Model for the prioritizing of natural resources to oil pollution in the coastal zone: report No. 1765/2000. Oslo: State pollution control (SFT), 2004. 16 p.
23. Model report. Part 3. Sub-regional risk of oil and hazardous substances in the Baltic Sea (BRISK). Environmental Vulnerability: COWI report written on behalf of Admiral Danish Fleet HQ, National Operations, Maritime Environment, in the framework of BRISK, Baltic Sea Region Programme 2009–2013. Copenhagen: COWI, 2012. 77 p.
24. Offringa H.R., Låhr J. An integrated approach to map ecologically vulnerable areas in marine waters in the Netherlands (V-maps): report No. A09. Revision No. 4. The Hague: RIKZ, 2007. 93 p.
25. Oil spill vulnerability assessment integrating physical, biological and socio-economical aspects: application to the Cantabrian coast (Bay of Biscay, Spain) / S. Castanedo, J.A. Juanes, R. Medina, A. Puente, F. Fernandez, M. Olabarrieta, C. Pombo // *Journal of Environmental Management*. 2009. Vol. 91. Issue 1. P. 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.07.013>.
26. Povlsen E., Hjorth M. Environmental and socioeconomic vulnerability. London: Bonn Agreement, 2015. 140 p.
27. Sensitivity mapping for oil spill response. London: IMO, IPIECA, OGP, 2012. 39 p.
28. Sensitivity mapping of inshore marine biotopes in the Southern Irish Sea (SensMap). Final report / A. McMath, A. Cooke, M. Jones, C.S. Emblow, G. Wyn, S. Roberts, M.J. Costello, B. Cook, E.M. Sides. Countryside Council for Wales, Maritime Ireland-Wales INTERREG, 2000. 300 p.

29. Shavykin A., Karnatov A. Main development problems of vulnerability mapping of sea-coastal zones to oil spills // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2018. Vol. 6. No. 4. ID 115. <http://doi.org/10.3390/jmse6040115>.
30. Spouge J. Assessment of the risk of pollution from marine oil spills in Australian ports and waters: report No. PP002916. London: Det Norske Veritas, 2011. 44 p.
31. Stevens L., Roberts J., Hume D. Incorporating consequence analysis into oil spill risk assessment in New Zealand // *Proceedings of the International oil spill Conference*. Washington, DC: API, 2005. P. 265–270. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-2005-1-265>.
32. Thébault H., Scheurle C., Duffa C., Boissery P. Valuation and sensitivity of socio-economic activities along the French Mediterranean coast // *International Journal of Sustainable Development and Planning*. 2014. Vol. 9. No. 6. P. 754–768. <https://doi.org/10.2495/SDP-V9-N6-754-768>.
33. Villa F., McLeod H. Environmental vulnerability indicators for environmental planning and decision-making: guidelines and applications // *Environmental Management*. 2002. Vol. 29. No. 3. P. 335–348. <https://doi.org/10.1007/s00267-001-0030-2>.

O.P. Kalinka, A.N. Karnatov

Murmansk Marine Biological Institute, Russian Academy of Sciences, Murmansk, olg-kalinka@yandex.ru

VULNERABILITY MAPS AS A COMPREHENSIVE TOOL FOR ENGINEERING-ECOLOGICAL SURVEYS

Abstract. As part of the project documentation for engineering-ecological surveys, there is a number of sections related to the ecological state of the environment, assessment of the negative impact on it, and environmental monitoring, as well as the preservation of socio-economic interests. Vulnerability maps of natural ecosystems compiled correctly on the basis of a metric approach, can serve as a comprehensive solution to these issues. This research is devoted to the evaluation of the priority protection coefficients of abiotic resources in absolute units. At the present stage, scores and ranks are mainly used as coefficients when calculating vulnerability, and this is unacceptable if arithmetic operations are carried out with them.

Key words: vulnerability maps; abiotic resources; protection priority coefficients; engineering-ecological surveys.

Трофимов В.Т., Харькина М.А.

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии,
г. Москва, trofimov@rector.msu.ru, kharkina@mail.ru

СОСТАВЛЕНИЕ КАРТ СОВРЕМЕННОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ – ТРЕБОВАНИЕ СП 502.1325800.2021 «ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ОБЩИЕ ПРАВИЛА ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ». КАКОВО ИХ СОДЕРЖАНИЕ?

Аннотация. Раскрыто содержание оценочных карт современного экологического состояния, предназначенных для пространственного обособления территорий с определенным классом состояния геоэкологических условий. Обязательным требованием при разработке легенды этих карт является увязка состояния абиотической и биотической частей экосистем с использованием традиционных геологических (ресурсных, геохимических, геодинамических и геофизических) и антропоцентрических и биотических параметров.

Ключевые слова: экосистема; ресурсные параметры; геохимические параметры; геофизические параметры; геодинамические параметры; антропоцентрические параметры; биоцентрические параметры.

1. В СП 502.1325800.2021 [9] на инженерно-экологические изыскания предлагается составление карт современного и прогнозируемого экологического состояния без раскрытия их содержания. Вероятно, имеется в виду картографическая оценка состояния экосистем, что возможно при составлении геоэкологических карт. *Геоэкологическая карта* – графоматематическая модель геоэкологической обстановки, дающая обобщенное изображение на топографической основе состояния абиотических и биотической компонент экосистем. По сути, речь идет о графическом отображении системы «абиотические сферы Земли – биота» или «абиотические сферы Земли – источники техногенного воздействия – биота». Назначение геоэкологических карт – увязать состояние абиотической и биотической части экосистем и предоставить информацию о состоянии живого при различной обеспеченности территорий пространственными ресурсами, ресурсами биофильных элементов и соединений, экстенсивности и интенсивности современных процессов, плотности геофизических и геохимических полей в атмосфере, гидросфере и литосфере [11].

2. Наиболее информативными являются оценочные карты – *карты геоэкологического районирования*, на которых в тех или иных категориях дается оценка современного состояния геоэкологических условий и связанных с ним зон состояния экосистем. Пространственное обособление территорий с определенным классом состояния геоэкологических условий является сущностью этих карт. Отличительной особенностью последних – использование абиотических и биотических критериев (рис. 1) с ранжированием на четыре разряда и выделением классов состояния геоэкологических условий (удовлетворительного, условно удовлетворительного, неудовлетворительного и катастрофического).

Рис. Систематика показателей, используемых при оценке состояния геоэкологических условий

3. Абиотические параметры оценивают состояние литосферы и педосферы, поверхностной гидросферы и атмосферы, которые могут оказывать воздействие на живые организмы. Их можно разделить на четыре типа: ресурсные, геохимические, геофизические и геодинамические. Далее они разбираются на примере литосферы и педосферы.

Ресурсные абиотические параметры литосферы и педосферы

Оценивая **минеральные ресурсы** с экологических позиций, следует говорить об исчерпаемости их запасов. В качестве критериев оценки исчерпаемости предлагается использовать показатели обеспеченности по отдельным видам сырья. Наиболее разработанными являются показатели **качества и обеспеченности подземными водами**. В качестве параметров ресурсов подземных вод используются следующие показатели: минерализация подземных вод, водозабор от наличных запасов, сработка восполнимых запасов, обеспеченность территорий по возможной производительности водозаборов, модуль эксплуатационных запасов (табл. 1).

Таблица 1

Качество и обеспеченность подземными водами [6]

Параметры	Классы состояния геоэкологических условий			
	удовлетвори- тельный	условно удовлетвори- тельный	неудовлетвори- тельный	катастрофи- ческий
Минерализация, г/дм ³	меньше 1,0	1,0–1,5	1,5–3,0	больше 3,0
Водозабор от наличных запасов, %	меньше 10,0	10,0–20,0	20,0–40,0	больше 40,0
Сработка восполнимых запасов, м	0–2,0	2,0–5,0	5,0–10,0 пересыхание ручьев	больше 10,0
Скорость сработки запасов подземных вод, м/год	0,2–0,3	0,3–0,4	больше 0,4	–
Обеспеченность терри- торий по возможной производительности водозаборов, тыс. м ³ /сут	больше 10,0 организация водозаборов	10,0–1,0	меньше 1,0	–

Среди нормативных критериев, относящихся к этой группе в СП 502.1325800.2021 [9] упоминаются следующие критерии: мощность плодородного и потенциально плодородного слоя, норма снятия плодородного слоя, степень деградации почв.

Геохимические абиотические параметры литосферы и педосферы

Они определяют степень загрязнения *почв, грунтов и донных отложений, снежного покрова*, а также *подземных вод*. Основными нормированными показателями являются предельно допустимые (ПДК) и ориентировочные допустимые (ОДК) концентрации. Они разработаны для отдельных химических элементов в основном для валовых содержаний, хотя имеются разработки для подвижных и растворимых форм. В ряде случаев имеются нормативные параметры для суммарной оценки концентраций нескольких химических элементов.

Для интегральной оценки площадей загрязнения по нескольким химическим элементам используется суммарный показатель химического загрязнения Z_c , который характеризует степень химического загрязнения тяжелыми металлами и металлоидами различных классов опасности. В зависимости от величины Z_c выделяются категория загрязнения почв по четырех ранговой шкале, которые соответствуют классам геоэкологических условий (табл. 2).

Таблица 2

Классы состояния геоэкологических условий в соответствии с категорией загрязнения почв (или грунтов) по суммарному показателю загрязнения

Категория загрязнения почв (или грунтов)	Величина суммарного показателя загрязнения Z_c (п. 5.11.14 СП 502.1325800.2021 [9])	Классы состояния геоэкологических условий на карте
Допустимая	менее 16	удовлетворительный
Умеренно опасная	16–32	условно удовлетворительный
Опасная	32–128	неудовлетворительный
Чрезвычайно опасная	более 128	катастрофический

Отдельно следует отметить, что существует ранжирование величины суммарного показателя загрязнения Z_c для донных отложений и снегового покрова. Эти показатели используются при составлении карт в работах Н.А. Титаевой [10], Н.С. Касимова [5]. Нормативное ранжирование Z_c для этих компонент литосферы – задача на будущее.

В современных нормативных технических документах (НТД) предлагается оценка и газогеохимической опасности грунтов с использованием четырехразрядной шкалы (п. 5.18.9 СП 502.1325800.2021) [9], которые также могут использоваться при построении геоэкологических карт.

Геодинамические показатели абиотические параметры литосферы и педосферы

Они используются для оценки геологических процессов и подразделяются на линейные, площадные, динамические и энергетические. Линейные показатели описывают линейные размеры проявлений геологических процессов.

Линейные показатели используются достаточно редко, но в некоторых случаях имеют принципиальное значение. Так, для карстовых провалов важен средний диаметр провала (м), для речной эрозии – протяженность берега (км), в пределах которой относительно одновременно происходит развитие эрозии, а для оползней – максимальная глубина захвата отложений оползнем (м).

Самая распространенная – группа *площадных* показателей. Наиболее часто используется показатель пораженности (%) определенным геологическим процессом исследуемой территории. Критерии оценки по этому показателю с ранжированием на четыре разряда разработаны в НТД (СП 115.13330.2016 [8]) для оползней, селей, лавин, карста, суффозии, просадочности лессовых толщ, подтопления территории, эрозии площадной и овражной, солифлюкции, наледиобразования, наводнений, цунами, а для криогенных процессов (термоэрозии, термокарста, пучения) разработан показатель потенциальной площадной пораженности.

К *энергетическим* показателям оценки геологических процессов относят характеристики выделенной энергии. Это универсальный прямой показатель, по которому возможно прямое сопоставление геологических процессов. Однако этот показатель разработан достаточно слабо в связи с отсутствием необходимого оборудования. К прямым энергетическим показателям с определенной натяжкой можно отнести магнитуду по шкале Рихтера при оценке землетрясений. Остальные энергетические показатели являются косвенными, определяющими выполненную работу – объемы перемещенных отложений для селей, лавин и оползней, а также скорость развития процессов при оценке оползней, селей, абразии и термоабразии, переработке берегов водохранилищ, суффозии, просадочности лессовых толщ, подтоплении, эрозии, термоэрозии, пучении, солифлюкции, наледиобразовании, цунами и др.

К *динамическим* показателям относят характеристики темпов нарастания процессов (увеличение площади нарушения в год), а также показатели частоты проявления процессов (повторяемость).

В НТД СНиП 22-01-95 [7] и его актуализированной версии СП 115.13330.2016 [8] определены четыре категории опасности природных процессов с использованием нескольких параметров для каждого процесса. Например, при определении категории опасности оползней и цунами используется шесть показателей, селей – пять, карста, просадочности лессов и термокарста – четыре, наледиобразования – три. Категории опасности процессов при разработке легенды геоэкологической карты практически

соответствуют классам состояния геоэкологических условий, что проиллюстрировано на примере оползней в табл. 3.

Таблица 3

Классы состояния геоэкологических условий в соответствии с категорией опасности оползней (СП 115.13330.2016 [8])

Показатели, используемые при оценке степени опасности природного процесса (ОПП)	Категории опасности			
	чрезвычайно опасная (катастрофическая)	весьма опасная	опасная	умеренно опасная
Площадная пораженность территории, %	более 30,0	11,0–30,0	1,0–10,0	0,1–1,0
Площадь разового проявления на одном участке, км ²	1,00–2,00	1,00–0,50	0,01–0,50	менее 0,01
Максимальный объем оползня, тыс. м ³	более 1000	более 100–1000	более 10–100	более 1–10
Максимальная глубина захвата пород оползнем, м	более 30	более 20–30	более 15–20	более 7–15
Скорость смещения	менее 5 м/с	менее 2 м/с	1–2 м/с (1–10 м/сут)	1–5 м/сут (5–10 м/мес)
Повторяемость, ед./год	0,04–0,01		0,05–0,10	
Классы состояния геоэкологических условий на карте	катастрофический	неудовлетворительный	условно удовлетворительный	удовлетворительный

Геофизические показатели абиотические параметры литосферы и недосферы

Они используются для оценки геофизических полей, экологически значимыми из которых являются радиационное, шумовое, вибрационное, электрическое, электромагнитное. К нормативным показателям геофизических полей (СП 502.1325800.2021 [9]) относятся: мощность эквивалентной дозы (МЭД) внешнего гамма-излучения, плотность потока радона – эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА радона), удельная эффективная активность естественных радионуклидов (радий (²²⁶Ra), торий (²³²Th), калий (⁴⁰K) и цезий (¹³⁷Cs)), уровень звукового давления, уровень общей вибрации, напряженность электрического поля, уровень электромагнитного поля, предельно допустимые уровни магнитных полей, допустимые уровни звукового давления, допустимые уровни ультразвука. Примером построения

геоэкологических карт с использованием геофизических показателей является карта радиоактивного загрязнения местности ^{137}Cs масштаба 1:200 000 ряда областей Европейской части России [4]. Критерием оценки на этой карте является условия проживания людей с учетом уровня радиоактивного загрязнения (табл. 4).

Таблица 4

Параметры радиоактивного загрязнения местности и экологические последствия для населения на карте радиоактивного загрязнения местности ^{137}Cs масштаба 1:200 000
(составлено на основе легенды [4])

Зоны	Параметры радиоактивного загрязнения				Экологические последствия для жителей
	плотность загрязнения, Ку/км ²			среднегодовая эффективная эквивалентная доза облучения, мЗв	
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	²³⁹ Pu		
Зона отчуждения	> 40	–	–	–	проживание запрещено
Зона отселения	40–5	>3	> 0,1	> 5	обязательное отселение и медицинский контроль
Зона проживания с правом отселения	5–1	–	–	5–1	выплата компенсаций жителям
Зона нерегламентированного проживания	< 1	–	–	1	медицинские мероприятия по радиационной защите населения

4. Биотические параметры оценивают экологические последствия состояния литосферы и педосферы, поверхностной гидросферы и атмосферы. Их использование необходимо при составлении геоэкологических карт. Биотические критерии подразделяются на антропоцентрические, оценивающие состояние человека, и биоцентрические, оценивающие состояние фито- и зооценозов.

Среди **антропоцентрических параметров** выделяют медико-статистические (число заболевших или погибших при катастрофе), биосубстратные и санитарно-гигиенические. Медико-статистические критерии определяют здоровье населения, которое по данным Всемирной организации здравоохранения только на 20% зависит от загрязнения абиотических сфер Земли, на 50% определяется образом жизни, на 10–20% – уровнем медицинского обслуживания и наследственностью.

Среди **биоцентрических параметров** выделяют ботанические, зоологические, биохимические и микробиологические. Они широко освещены в работах Б.В. Виноградова [1–3]. При использовании биоцентрических критериев необходим набор тест-организмов разных уровней чувствительности. Например, шампиньоны наиболее чувствительны к загрязнению почв тяжелыми металлами (ТМ); грибы кератинофилы – к урбанизации почв в местах длительного проживания человека, хвойные и лишайники – к загрязнению атмосферного воздуха; дафнии чувствительны к загрязнению антигололедной смесью.

Ботанические используются для оценки экологических последствий геосферных изменений у растительности. Они особенно чувствительны к нарушениям окружающей среды, они наилучшим образом прослеживают изменения в пространстве, но имеют неодинаковую устойчивость к техногенным воздействиям, учитывают негативные изменения на разных уровнях (организменном, популяционном и экосистемном).

Зоологические применяются при оценке экологических последствий геосферных изменений у животных. Они оценивают видовое разнообразие, структуру популяции (численность, поведение, биомассу, продуктивность, стадию нарушенности экосистем), но их применение требует статистических данных на 5–10-летний период.

Биохимические критерии основаны на изменении содержания химических веществ в растениях, проникающих в клеточные структуры с почвенным раствором, они разработаны отдельно для травянистых растений и древостоев (отдельно для листьев и хвои).

Микробиологические критерии используются для оценки степени эпидемиологической опасности почвы (или грунта) и донных отложений. Они регламентированы НТД и определяется через индекс БГКП – индекс бактерий группы кишечной палочки, индекс энтерококков, содержание патогенных бактерий, в т.ч. сальмонеллы, содержание яиц геогельминтов, содержание личинок (куколок) мух. Классы состояния геоэкологических условий в соответствие со степенью эпидемической опасности почвы представлены в табл. 5.

5. В ходе совершенствования НТД необходимо четко определить содержание карт современного экологического состояния. С точки зрения авторов, они близки по составу легенды к геоэкологическим картам (табл. 5). Требуется «узаконить» объект, отображаемый на картах экологического состояния, которым, по мнению авторов, является экосистема и ввести обязательное требование при их составлении – использование не только традиционных гидрометеорологических и геологических, но и биотических и социально-экономических критериев.

Таблица 5

Классы состояния геоэкологических условий в соответствии со степенью эпидемической
опасности почвы (СП 502.1325800.2021 [9])

Категория загрязнения почв	Индекс БГКП	Индекс энтерококков	Патогенные бактерии, в т.ч. сальмо- неллы (в 25 г почвы)	Яйца геогель- минтов, экз./кг	Личинки (Л), куколки мух (К), экз. в почве на пробной площадке размерами 20×20 см	Классы состояния геоэкологических условий на карте
Чистая	1–9	1–9	0	0	0	удовлетворитель- ный
Умеренно опасная	10–99	10–99	0	1–10	Л: 1–10 К: отсут- ствуют	условно удовлетворитель- ный
Опасная	100– 999	100– 999	1–99	11–100	Л: 11–100 К: 1–10	неудовлетвори- тельный
Чрезвычайно опасная	1000 и выше	1000 и выше	100 и более	более 100	Л: более 100 К: более 10	катастрофический

Список литературы

1. Виноградов Б.В. Основы ландшафтной экологии. М.: ГЕОС, 1998. 418 с.
2. Виноградов Б.В., Орлов В.А., Снакин В.А. Биотические критерии выделения зон экологического бедствия России // Известия РАН. Серия географическая. 1993. № 5. С. 77–79.
3. Виноградов Б.В., Фролов Д.Е., Кулик К.Н. Оценка нестабильности экосистем Черных земель Калмыкии по длинному ряду аэрокосмических измерений // Доклады АН СССР. 1991 Т. 316. № 6. С. 1494–1497.
4. Карта радиационного загрязнения местности (цезий-137). Масштаб 1:200 000. СПб.: ТЕСНКО. 1992.
5. Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М. Геохимия ландшафтов Восточной Москвы. М.: АПР, 2016. 276 с.
6. Логика и содержание карты современного состояния верхних горизонтов земной коры как фактологическая основа для составления эколого-геологических карт / В.Т. Трофимов, Д.Г. Зилинг, Т.А. Барабошкина, В.А. Богословский, А.Д. Жигалин, Н.С. Красилова, М.А. Харькина. М.: МГУ, 2004. 66 с.
7. СНиП 22-01-95 Геофизика опасных природных воздействий.
8. СП 115.13330.2016 «Геофизика опасных природных воздействий. Актуализированная редакция СНиП 22-01-95*».

9. СП 502.1325800.2021 Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.
10. Титаева Н.А., Гришанцева Е.С., Сафронова Н.С. Закономерности распределения ряда химических элементов в донных отложениях и почвах района Иваньковского водохранилища р. Волги // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2007. № 3. С. 50–58.
11. Трофимов В.Т., Харькина М.А. О содержании и назначении геоэкологических карт // Инженерные изыскания. 2017. № 1. С. 12–18.

V.T. Trofimov, M.A. Kharkina

Lomonosov Moscow State University, Moscow, trofimov@rector.msu.ru, kharkina@mail.ru

**DEVELOPING THE MAPS OF THE CURRENT ENVIRONMENTAL
STATE – A REQUIREMENT OF SP 502.1325800.2021 “ENGINEERING
ENVIRONMENTAL SURVEY FOR CONSTRUCTION. GENERAL
REGULATIONS FOR EXECUTION OF WORK”.
WHAT IS THEIR CONTENT?**

Abstract. The content of assessment maps of the current environmental state, intended for the spatial isolation of territories with a certain class of state of geoecological conditions, is discussed. A mandatory requirement in the development of the legend of these maps is to link the state of the abiotic and biotic parts of ecosystems using traditional geological (resource, geochemical, geodynamic, and geophysical), anthropocentric and biotic parameters.

Key words: ecosystem; resource parameters; geochemical parameters; geophysical parameters; geodynamic parameters; anthropocentric parameters; biocentric parameters.

Коровина А.Б., Седойкина А.С.

ООО «СамараНИПИнефть», г. Самара, KorovinaAB@samnipi.rosneft.ru, SedoykinaAS@samnipi.rosneft.ru

ПЛОЩАДНАЯ РАЗНИЦА ТЕРРИТОРИИ ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ И ТЕРРИТОРИЙ ОТДЕЛЬНЫХ ВИДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аннотация. Рассмотрена территория воздействия проектируемого объекта. Обозначены площади для различных видов исследования при определении негативного воздействия на окружающую среду и выявления объектов историко-культурного наследия.

Ключевые слова: инженерно-экологические изыскания; радиационное обследование; археологическое обследование.

Инженерно-экологические изыскания выполняются для экологического обоснования намечаемой деятельности в целях предотвращения, минимизации или ликвидации негативных экологических и связанных с ними социальных, экономических и других последствий [1]. Под экологическим обоснованием понимается совокупность доводов (доказательств) и научных прогнозов, позволяющих оценить экологическую опасность намечаемой хозяйственной и иной деятельности для экосистем (природных территориальных комплексов) и человека [3]. Неблагоприятные экологические последствия планируемой деятельности будут происходить в зоне воздействия сооружения. Нормативные технические документы (НТД) по инженерно-экологическим изысканиям не определяют территорию, в пределах которой должны проводиться изыскания, не дает рекомендаций, как определять границу зоны воздействия и по каким критериям и компонентам природной среды следует выполнить прогноз возможных изменений.

В зависимости от компонента природной среды и специфики воздействия, зона влияния производственного объекта может существенно различаться. Размеры зоны в основном определяются лабильными [4] компонентами, такими как воздушные массы и водные потоки, являющимися переносчиками загрязняющих веществ. Дальность переноса зависит от концентрации загрязнений, скорости и разбавляющей способности переносящего агента. За небольшой промежуток времени, в течение которого производится инженерно-экологические изыскания, инертные (минеральный субстрат и рельеф) и активные (биота) компоненты природно-территориальных комплексов [4] не имеют решающего значения в установлении зоны влияния.

Далее рассмотрен конкретный пример (рис. 1). В данном случае предполагаемые воздействия проектируемого объекта на основные компоненты природной среды будут локализованы в пределах водосборного бассейна реки.

Воздействие проектируемого объекта на почвенный и растительный покров может происходить через атмосферный воздух вследствие плоскостного

смыва загрязнений со склона и в результате подтопления, и будет локализовано в пределах части водосборного бассейна. Грунтовые воды первого от поверхности водоносного горизонта на участке предполагаемого строительства могут разгружаться в виде родников или подрусловым стоком в основную реку бассейна и двигаться по уклону рельефа в сторону реки. Граница водораздела подземных вод часто совпадает с границей водораздела поверхностных, и потенциально загрязненные проектируемым объектом грунтовые воды не пересекут границу водосборной площади реки.

Рис. 1. Территория инженерно-экологических изысканий

Таким образом, природный комплекс в виде водосборного бассейна реки, в пределах которого планируется строительство объекта, следует считать территорией проведения инженерно-экологических изысканий.

Граница территории инженерно-экологических изысканий в целом может значительно отличаться от границ отдельных видов исследований. Так, например, помимо исследований отдельных компонентов природной среды (почва, воздух, вода), инженерно-экологические изыскания должны также включать исследования и оценку радиационной обстановки [7].

Зачастую общая площадь радиационного обследования складывается из площадей отвода (временных и постоянных) земель для проектируемых сооружений согласно действующим СН 459-74 [5]. Практика разработки и выдачи технических заданий на выполнение радиационного обследования предусматривает обследование всех проектируемых сооружений в пределах их землеотводов.

При проектировании эксплуатационной скважины во временное краткосрочное пользование на период бурения отводится земельный участок площадью 18 тыс. м² [5]¹. Поскольку работы по бурению и обустройству будут производиться в пределах отводимой площадки, радиационное обследование целесообразно также производить в пределах отводимого участка (рис. 2).

Рис. 2. Схема: а – площадки обустройства скважины, б – территории радиационного обследования

Помимо радиационного инженерно-экологические изыскания также должны включать в себя обследование и оценку состояния памятников архитектуры, истории, культуры [6]. Для этого необходимо проведение полевого археологического обследования. Нормативным документом, регламентирующим данный вид работ, предусматривается полевое археологическое обследование участков землеотводов [2]. Исходя из практики разработки и выдачи технических заданий на выполнение археологических исследований, помимо обследования площадей землеотводов в них также предусматривается осуществление дополнительного визуального осмотра для выявления объектов культурного наследия (одиночных курганов, курганных могильников и т.д.) на расстоянии 50 м от границ отводимой площадки по периметру. Таким образом, имея площадку под обустройство 18 тыс. м², к площади археологического обследования дополнительно добавляется

¹ При бурении буровыми установками с электрическим приводом грузоподъемностью от 125 до 200 т с вышкой высотой 41 м.

38 тыс. м² для визуального осмотра, т.е. общая площадь обследования будет составлять 56 тыс. м² (рис. 3).

Рис. 3. Границы археологического обследования

Отдельные виды исследований, производимые в ходе инженерно-экологических изысканий, могут быть реализованы на различных площадях, составляющих лишь часть общей территории изысканий.

По опыту прохождения экспертизы проектов следует отметить, что локальные исследования, такие как радиационное или археологическое, должны производиться с учетом всех проектируемых сооружений. Обследованная площадь не должна быть меньше площади постоянных и временных отводов земель, если иное не предусмотрено НТД.

Список литературы

1. Караваева Т.И., Тихонов В.П. Обоснование территории для проведения инженерно-экологических изысканий // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. С. 629.
2. Положение о порядке проведения археологических полевых работ и составления научной отчетной документации. М.: ИА РАН, 2018. 63 с.
3. Приказ Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ № 539 от 29.12.1995 «Об утверждении “Инструкции по экологическому обоснованию хозяйственной и иной деятельности”».

4. Пшеничников Б.Ф., Пшеничникова Н.Ф. Ландшафтоведение: учеб. пособие. Владивосток: ГУЭС, 2012. 244 с.
5. СН 459-74 Нормы отвода земель для нефтяных и газовых скважин.
6. СП 11-102-97 Инженерно-экологические изыскания для строительства.
7. СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96*».

A.B. Korovina, A.S. Sedoikina

Samara Design and Research Institute on Crude Oil Production LLC, Samara, KorovinaAB@samnipi.rosneft.ru,
SedoykinaAS@samnipi.rosneft.ru

AREAL DIFFERENCE BETWEEN THE TERRITORY OF ENGINEERING- ECOLOGICAL SURVEYS AND THE TERRITORIES OF CERTAIN TYPES OF RESEARCH

Abstract. The area of influence of the designed object is discussed. It is defined the area for various types of research to analyze the unprepared impact on the environment and identify objects of historical and cultural heritage.

Key words: engineering-ecological surveys; radiation survey; archaeological survey.

Сидоренко С.А.

ООО «СамараНИПИнефть», г. Самара, SidorenkoSA@samnpi.rosneft.ru

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВЫ В УСЛОВИЯХ ИСКУССТВЕННЫХ БАРЬЕРОВ

Аннотация. Приведены результаты химического анализа почвы и слоя насыпных грунтов действующей производственной площадки по результатам отбора проб на содержание нитратов, бенз(а)пирена, тяжелых металлов и нефтепродуктов. Проведен расчет суммарного коэффициента химического загрязнения почвы (Z_c), слоя насыпных грунтов при сравнении с фоновой концентрацией, обозначена проблема изученной территории.

Ключевые слова: нефтяное загрязнение; почва; грунт; гумус; тяжелые металлы.

Реализация международных экологических стандартов на территории РФ является приоритетной задачей предприятий нефтегазодобывающей отрасли, т.к. соответствие стандартам дает основание для заключения договоров на поставку готовой продукции и первичного сырья потребителям Европы. Приведение к соответствию экологическим стандартам связано с уменьшением и в дальнейшем исключением в текущей и долгосрочной перспективе техногенных факторов, вызывающих деградацию почв, особенно после окончания работ на отведенной территории региона нефтегазодобычи.

Искусственные барьеры – это такие границы, которые созданы не естественным путем, а построены человеком и несут антропогенный характер, например, дороги, мосты, населенные пункты и т.д.

В региональном отношении территория исследования приурочена к восточной окраине Русской платформы. В орографическом отношении район находится в центре крупной геоморфологической структуры Общий Сырт. По схеме физико-географического районирования Оренбургской области территория находится в степной зоне Общесыртовско-Предуральской возвышенной провинции, Ток-Присакмарском сыртово-холмистом районе.

Абсолютные отметки поверхности составляют от 151,1 до 223,0 м. Максимальные высоты приурочены к центральным частям водоразделов юго-западной части месторождения, минимальные – к долинам рек Ильмени и Чесноковки. В целом дневная поверхность слабо наклонена на север и северо-восток в сторону русла р. Ток.

Современный рельеф района сформировался в результате длительного размыва предуральских сыртовых равнин, а также под воздействием новейших тектонических движений. Местность представляет собой пологоволнистую равнину, рассеченную современной овражно-балочной сетью. По генетическому типу относится к денудационным равнинам плиоценового возраста. По генезису и формам рельефа, морфологическим характеристикам и особенностям литогенной основы здесь выделяется два морфогенетических

комплекса: денудационно-эрозионный и аккумулятивный. Первый представлен водоразделами и склонами, второй – поверхностью террас.

Водоразделы плоские, плосковыпуклые, вытянуты в субмеридиональном направлении и осложнены денудационными останцами различной формы и размеров. Их протяженность в районе работ от 2–3 до 5 км, при ширине от 0,5 до 1,0 км. Склоны большей частью асимметричные, прямые, в южной части короткие и крутые ($40\text{--}60^\circ$), здесь наиболее интенсивно протекают процессы глубинной эрозии. Из эрозионных форм развиты овраги, балки, ложбины стока. Склоны северной экспозиции мягко увалистые, протяженные, пологие, крутизна их колеблется в пределах $20\text{--}30^\circ$.

Гидрографическая сеть района исследования принадлежит бассейну р. Ток и представлена его небольшими левыми притоками – реками Ильмень и Чесноковка. Их долины асимметричные, в строении выделяется пойма (низкая и высокая) и узкая надпойменная терраса, которая встречается фрагментарно, начиная со среднего течения. Ширина поймы колеблется от 10–15 м в верховьях до 40–50 м в среднем течении, высота ее над урезом воды составляет 0,5–0,8 м. Надпойменная терраса имеет ширину площадки 50–60 м, высоту – 1,2–1,8 м.

Территории, окружающие промышленную площадку, охватывают в т.ч. и санитарно-защитную зону предприятия. Непосредственный участок исследования расположен на спланированных территориях. Коренной почвенный покров на данной территории преобразован. Верхний слой представлен слоем насыпного грунта.

Согласно геоботаническому районированию, территория исследования относится к Евгенинско-Заволжской степной подпровинции Заволжско-Казахстанской степной провинции Причерноморско-Казахстанской подобласти Евразийской степной области, к Иргизско-Самарскому флористическому району. Территория характеризуется недостаточным увлажнением. Растительность представлена главным образом разнотравно-дерновиннозлаковыми степями, сохранившимися отдельными фрагментами в виде разнотравно-типчаково-ковыльных сообществ.

В районе расположения преобладающими почвами являются черноземы обыкновенные. Они характерны для территории, окружающей промышленные площадки предприятия, и для его санитарно-защитной зоны. Почвообразующей основой являются делювиальные карбонатные глинистые и тяжелосуглинистые отложения [4].

В августе 2019 и 2021 гг. на территории исследуемого участка проведено экологическое исследование слоя насыпного грунта. Пробы отбирались из верхнего пахотного (0–30 см) горизонта методом «конверта» в соответствии с требованиями [1, 2]. Также на исследуемой территории в августе 2021 г. проводился отбор проб почвы. Отобранные образцы упаковывались в химически инертную тару (целлофановые пакеты).

Расчет суммарного коэффициента загрязнения почвы (Z_c) проводился согласно формуле

$$Z_c = \sum(K_{ci} + \dots + K_{cn}) - (n - 1) \quad (1)$$

и приведен в табл. 1, где n – число определяемых компонентов, K_{ci} – коэффициент концентрации i -го загрязняющего компонента, равный кратности превышения содержания данного компонента над фоновым значением.

Пример расчета:

$$Z_c = \sum(K_{ci} + \dots + K_{cn}) - (n - 1) = 2,14/1 = 2,14. \quad (2)$$

Таблица 1

Суммарный коэффициент химического загрязнения почвы (Z_c) при сравнении с фоновой концентрацией

№ пробы	Коэффициент концентрации загрязнителя								Суммарный коэффициент загрязнения
	кадмий	свинец	цинк	медь	никель	мышьяк	ртуть	нефте-продукты	
1	0,33	2,20*	2,09*	1,69*	1,97*	1,07*	0,10	5,08*	7,13
2	0,33	1,60*	1,22*	1,13*	2,00*	1,25*	0,10	6,20*	8,40
3	0,33	2,10*	1,68*	1,47*	1,95*	1,07*	0,10	4,72*	7,92
Фон области	0,30	10,00	61,00	23,00	42,00	–	–	50,00	–
Фон РФ	–	–	–	–	–	5,60	0,20	–	–

Расчет суммарного коэффициента загрязнения слоя насыпного грунта проводился согласно формуле (1). Для этого использовались коэффициенты концентраций, превышающие 1, а, следовательно, фон. Фоновые значения для области были взяты из ежегодника [5].

Параллельно с отбором проб из шурфов проводилось бурение пяти скважин, обследовались интервалы залегания ликвидированного шламового амбара. Бурение сопровождалось отбором проб неразрушенной структуры. Техногенный (насыпной) слой (tQ_{IV}) имеет мощность 1,2–3,2 м, представлен отвалами и свалками глинистого грунта с включением строительного мусора, местами с примесью чернозема, пропитан нефтепродуктами.

Физико-химические характеристики черноземов обыкновенных обычных представлены в табл. 2.

Мощность гумусового горизонта ($A + AB$) у маломощных разновидностей черноземов обыкновенных не превышает 38 см, у слабоэродированных – 33 см. По мере нарастания смытости в обыкновенных черноземах уменьшаются содержание и запасы гумуса, азота и поглощенных оснований. Содержание гумуса колеблется от 3,04% у среднесмытых до 8,1% у черноземов незэродированных среднемощных. Распределение гумуса по профилю характеризуется постепенным убыванием с глубиной в пределах

верхних горизонтов А и АВ, а затем более быстрым спадом в зависимости от гранулометрического состава (чем последний тяжелее, тем быстрее идет спад), степени перерытости и других местных особенностей формирования профиля. Суммарные запасы гумуса в верхнем полуметровом слое составляют 265–282 т/га, в метровом – 320–397 т/га. В эродированных вариантах запасы гумуса меньше на 15–35% в зависимости от степени эродированности. Запасам гумуса соответствуют валовые количества азота и фосфора. Отношение С:N преобладает в интервале 10–11, а иногда расширяется до 11–13, что более свойственно разновидностям облегченного гранулометрического состава.

Таблица 2

Физико-химические свойства почвы на территории исследования

Название подтипа	Название рода	Гумус, %	Мощность гумусового горизонта, см	Физическая глина, %	рН, ед.
Чернозем обыкновенный	обычные	6–9	30–40	40–80	6,9–7,1

Реакция почв в верхних горизонтах черноземов обыкновенных близка к нейтральной (рН = 6,9–7,1). Обыкновенные черноземы характеризуются достаточно высокой обменно-поглотительной способностью, что тесно связано с аккумуляцией гумуса. Сумма поглощенных оснований в пахотном горизонте колеблется от 27,6 среднесмытых черноземов до 48,7 мг-экв на 100 г почвы у неэродированных среднегумусных среднемощных черноземов. Среди обменных оснований преобладает кальций – 22,4–35,4 мг-экв на 100 г почвы, что способствует устойчивости поглощающего комплекса и прочности структурных агрегатов.

Результаты агрохимического исследования верхнего слоя насыпного грунта на участке исследования представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты химического анализа верхнего слоя насыпного грунта по результатам отбора проб

Место отбора	рН, ед.	Гумус, %	Обменный Na, %	Сумма токсичных солей, %	Сухой остаток, %	Физическая глина, %
Участок производственной площадки	8,00	0,37	менее 0,1	менее 0,05	0,124	41,2

По содержанию гумуса данный слой насыпного грунт не соответствует требованиям [3], предъявляемым к плодородному слою. Поскольку плодородный слой почвы отсутствует, насыпной грунт не пригоден для

рекультивации. По результатам лабораторных исследований реакция среды почвенного раствора в образцах щелочная ($pH = 8,0$). Количественные показатели содержания бенз(а)пирена, нитратов и сернистых соединений в грунте находятся в пределах предельно допустимых концентраций (ПДК) (табл. 4).

Таблица 4
Количественные характеристики химических показателей слоя насыпного грунта

№ проб	Место отбора	Нефтепродукты, мг/кг	Бенз(а)пирен, мг/кг	Нитраты, мг/кг
ПДК, мг/кг		фон области 50	0,020	130,00
1	Участок производственной площадки	< 50	< 0,005	6,40

Содержание нефтепродуктов в слое насыпного грунта для горизонта 0–30 см во всех пробах не превышает фоновые значения для почв области (50 мг/кг), концентрация тяжелых металлов и мышьяка – нормативно установленные значения ПДК/ ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) (табл. 5).

Таблица 5
Содержание тяжелых металлов в верхнем слое насыпного грунта

№ пробы	Местоположение точки отбора пробы	pH	Валовое содержание						
			кадмий, мг/кг	свинец, мг/кг	цинк, мг/кг	медь, мг/кг	никель, мг/кг	мышьяк, мг/кг	ртуть, мг/кг
	ОДК								
	pH < 5,50	–	1,00	65,00	110,00	66,00	40,00	5,00	–
	pH > 5,50		2,00	130,00	220,00	132,00	80,00	10,00	
	ПДК, мг/кг	–	–	32,00	–	–	–	2,00	2,1000
1	Участок производственной площадки	7,25	0,197	8,89	53,98	13,54	43,67	1,10	0,0161

Значение Z_c грунта приведено в табл. 6 и на рис. 1. Суммарный коэффициент химического загрязнения зависит, в первую очередь, от уровня фоновых значений для региона, а также фактически полученных концентраций. Z_c во всех пробах менее 16, что соответствует допустимой степени химического загрязнения.

Таблица 6
Суммарный коэффициент химического загрязнения насыпного грунта (Z_c) при сравнении с фоновой концентрацией почв

№ пробы	Коэффициент концентрации загрязнителя								Суммарный коэффициент загрязнения
	кадмий	свинец	цинк	медь	никель	мышьяк	ртуть	нефте-продукты	
1	0,66	0,89	0,88	0,59	1,04*	0,20	0,08	1,00	1,04
Фон области	0,30	10,00	61,00	23,00	42,00	–	–	50,00	–
Фон РФ	–	–	–	–	–	5,60	0,20	–	–

Рис. 1. Суммарный коэффициент химического загрязнения насыпного грунта (Z_c)

По результатам лабораторных исследований, проведенных в 2021 г. по трем участкам, реакция среды почвенного раствора в образцах щелочная ($pH = 8,1–8,2$). Количественные показатели содержания бенз(а)пирена, нитратов и сернистых соединений в образцах находятся в пределах ПДК (табл. 7).

Таблица 7
Количественные характеристики химических показателей в насыпном грунте

№ пробы	Место отбора	Нефтепродукты, мг/кг	Бенз(а)пирен, мг/кг	Нитраты, мг/кг
ПДК, мг/кг		фон области – 50	0,020	130,0
1	Вблизи ликвидированной нефтяной ловушки	254	< 0,005	10,5
2	Около геологической скважины № 3	310	< 0,005	12,3
3	Геологическая скважина № 3	236	< 0,005	12,5

Содержание нефтепродуктов для горизонта 0–30 см во всех пробах превышает фоновые значения для почв области (50 мг/кг): в первой пробе – 5,08 ПДК, во второй – 6,2 ПДК, в третьей наблюдается наименьшее превышение из представленных (4,72 ПДК). Наблюдается превышение нормативно установленных значений по свинцу и мышьяку, остальные показатели не превышают ПДК (табл. 8).

Таблица 8

Содержание тяжелых металлов в насыпном грунте

№ пробы	Местоположение точки отбора пробы	pH	Валовое содержание						
			кадмий, мг/кг	свинец, мг/кг	цинк, мг/кг	медь, мг/кг	никель, мг/кг	мышьяк, мг/кг	ртуть, мг/кг
	ОДК	–	1,0	65	110	66	40	5,0	–
	pH < 5,5		2,0	130	220	132	80	10	
	pH > 5,5	–	–	32	–	–	–	2,0	2,10
1	Вблизи технического амбара	8,1	< 0,1	22	128	39	83	6,0	< 0,02
2	Около скважины № 3	8,1	< 0,1	6	75	26	84	7,0	< 0,02
3	Скважина № 3	8,2	< 0,1	21	103	34	82	6,0	< 0,02

Значение суммарного коэффициента загрязнения почв приведено в табл. 1.

Суммарный коэффициент химического загрязнения во всех пробах менее 16, что соответствует допустимой степени химического загрязнения. Согласно [6] использование почв с допустимой степенью загрязнения возможно без ограничений, исключая объекты повышенного риска.

Рис. 2. Суммарный коэффициент химического загрязнения почв и слоя насыпных грунтов (Z_c) по сравнению с фоновой концентрацией в 2021 г.

Проведенные исследования в 2019–2021 гг. показали, что происходит рост загрязнения почв кадмием, медью, цинком, а также превышение по нефтепродуктам. Рекогносцировочное обследование не показало загрязнений на поверхности почвы, следовательно, загрязнение после ликвидации нефтяной ловушки верхнего горизонта продолжается. Производственной защиты от атмосферных осадков нет, превышение свинца и никеля связано с ближайшей автодорогой, цинк, медь и никель – с ближайшей пашней. Нефтепродукты превышены в связи с тем, что отбор производился на промышленной площадке. Также превышение вышеперечисленных показателей обусловлено промышленными выбросами самого предприятия. По полученным данным, искусственные барьеры являются причиной накопления загрязнений и препятствуют естественному восстановлению территории.

Список литературы

1. ГОСТ 17.4.3.01-2017 Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб.
2. ГОСТ 17.4.4.02-2017 Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.
3. ГОСТ 17.5.3.06-85 Охрана природы. Земли. Требования к определению норм снятия плодородного слоя почвы при производстве земляных работ.
4. Глинка К.Д. Почвоведение. М.: Юрайт, 2019. 722 с.
5. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2018 году. Ежегодник. Обнинск: НПО «Тайфун», 2019. 120 с.
6. СанПиН 2.1.7.1287-03 Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы.

S.A. Sidorenko

Samara Design and Research Institute on Crude Oil Production LLC, Samara, SidorenkoSA@samnpi.rosneft.ru

ECOLOGICAL STATE OF SOILS UNDER ARTIFICIAL BARRIERS

Abstract. The results of a chemical analysis of soils of an operating production site based on the results of sampling for the content of nitrates, benzo(a)pyrene, heavy metals, and oil products are presented. The calculation of the total coefficient of chemical contamination of soil (Z_c) is carried out when compared with the background concentration, the problem of the studied area is indicated.

Key words: oil pollution; soil; humus; heavy metals.

Царев М.А., Сергеев В.И., Сергеев Р.В.

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, лаборатория охраны геологической среды
и взаимосвязи поверхностных и подземных вод, г. Москва, domikes@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОГО ОБЪЕМА БУРОВЫХ РАБОТ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ, ВБЛИЗИ ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Аннотация. Инженерно-геологические изыскания на территориях проектируемых и подлежащих рекультивации полигонов захоронения отходов включают разведочное бурение. В подавляющем большинстве случаев данные разведочного бурения оказываются недостаточными для проектирования защиты от загрязнения, часто есть и скважины, данными по которым не используются. Цель представленной публикации – показать методический подход к объемам разведочного бурения для исследования пути миграции от источника загрязнения в подземные воды, что позволит получить оптимальное количество разведочных скважин для принятия решения о целесообразности локализации сформировавшегося очага загрязнения. Также ставилась цель обосновать минимальное количество разведочных скважин для принятия решений об интервалах, подлежащих тампонажу. Целесообразность выполнения большого объема геологоразведочных работ определяется их крайне низкой себестоимостью по сравнению с расходами на сорбирующие материалы геохимического барьера для локализации очага загрязнения.

Ключевые слова: бурение; загрязнение; подземные воды; защитные мероприятия; фации.

Введение

Основная часть строительных работ в крупных городах направлена на здания и сооружения промышленного и гражданского назначения, поэтому такие объекты стали привычными в практике инженерно-геологических изысканий (ИГИ). Согласно п. 6.3 СП 47.13330.2016 [8], инженерно-геологические условия изучаются для:

- обоснования компоновки зданий и сооружений;
- принятия конструктивных и объемно-планировочных решений;
- предварительного выбора типов фундаментов;
- составления схемы планировочной организации земельного участка, расположения проектируемого объекта;
- предварительной разработки мероприятий по инженерной защите сооружений;
- охране геологической среды.

Объекты исследований и подход к решению методических проблем

Совершенно конкретно указано, какую информацию необходимо получить для объектов промышленного и гражданского строительства, последние же два пункта даны сжато, по-видимому, из-за различия процессов,

подлежащих изучению. На объектах, где отмечается формирование и миграция загрязнения подземных вод, подход к производству ИГИ очень часто не отличается от тех, что выполняются для сооружения объектов промышленного и гражданского назначения: бурение по сетке, отбор образцов грунта на изучение физических и физико-механических свойств, сокращенный химический анализ воды, общее описание гидрогеологических условий. Так, к примеру на одном из полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО) для нужд его рекультивации пробурены скважины с шагом 50 м, в основном через толщу отходов (рис. 1). Из схемы видно, что расположение и шаг скважин выбраны исходя того, чтобы вся площадь тела свалки была охарактеризована геологическим разрезом.

Рис. 1. Разведочное бурение на примере одного из полигонов ТКО, подлежащих рекультивации

Несмотря на большое количество скважин, данные разведочного бурения на приведенном примере, как и на ряде других, не позволяют построить представление о пути миграции загрязнения в подземных водах, о их загрязненности у жилых территорий, о поступлении загрязнения в гидрографическую сеть. Обнаруживается и другая проблема – избыточное покрытие скважинами отдельных участков полигона, на которых отсутствует значительная неоднородность литологического состава и фильтрационных свойств. Необходимо изучить гидрогеологические условия, включив ближайшие водотоки и водоозаборы, в которых может быть встречено загрязнение. На завершающих этапах разведочного бурения ограничить территорию изучения следует участком, на котором присутствует загрязнение,

превышающее допустимые значения. Оценка направления, ориентировочной скорости потока подземных вод, отраженная на карте гидроизогипс, дает представление о пути переноса загрязнения. Полученные данные должны быть достаточны и для предварительного прогноза изменения гидрогеологических условий [10].

В методическом отношении авторы считают необходимым на первом этапе ИГИ добиться такого расположения разведочных скважин, при котором:

1. Будут определены водоносные горизонты, в которых происходит разгрузка фильтра, их мощность, напоры и литологический состав.

2. Ближайшие гидрогеологические границы.

3. Характер взаимодействия с ближайшими водоемами, водотоками, водозаборами.

4. Густота разведочной сети будет оправдана изменчивостью литологического состава, гидравлических характеристик и фильтрационных параметров водоносных горизонтов.

Исходя из представленных принципов, при разведочном бурении необходимо отказаться от привычной сетки бурения, когда скважины расположены равноудаленно друг от друга. Локализация источника загрязнения подземных вод главным образом приурочена к четвертичным отложениям. Путь миграции загрязнения определяется пространственной и фильтрационной неоднородностью водовмещающих отложений. Наличие в разрезе хорошо проницаемых грунтов определяется процессами формирования этих отложений, т.е. их генезисом.

Генетические типы четвертичных водоносных отложений широко представлены флювиогляциальными, аллювиальными, пролювиальными, делювиальными, озерными, коллювиальными, эолово-делювиальными, элювиально-делювиальными, болотными и техногенными отложениями.

Далее рассмотрен предлагаемый методический подход разведочного бурения на примере аллювиальных отложений. Известно, что строение речных долин связано с процессами формирования состава аллювиальных отложений. Согласно исследованиям Е.В. Шанцера [11], формирование аллювия зависит от скорости течения реки, периодов половодья, плановой ориентации русла. Речные фации, представленные русловым, пойменным и старичным аллювием, имеют различную зернистость, изменчивую и в пределах каждой фации. В руководстве [1] отмечается, что геоморфологические особенности – основной признак геологических границ четвертичных отложений, в т.ч. аллювиальных. Разработки Е.В. Шанцера уже нашли применение, в частности, при выборе мест размещения отходов [7]. На рис. 2 показан упомянутый полигон ТКО, нанесено три линии геоморфологических профилей по направлению к реке. Важно, что разведка территории полигонов, где поблизости есть река, должна включать и противоположный ее берег, т.к. подземные воды в его пределах могут питаться и водами свалки.

Рис. 2. Геоморфологическая схема участка полигона ТКО

В рельефе участка полигона, по предварительной оценке, выделяется пойма и две террасы. На верхней расположен сам полигон ТКО, противоположная часть берега на профилях также представлена поймой. Поскольку выделяемые по элементам рельефа террасы и поймы могут иметь различный друг от друга и в своих пределах литологический состав и строение, имеет смысл произвести:

1. Маршрутное обследование с описанием обнажений тыловых швов террас, закопшек, границ отложений поймы, водопоявлений.

2. Проходку шурфов и закопшек для установки фациальных границ четвертичных отложений.

3. Бурение минимум двух скважин в пределах каждой террасы и поймы для определения мощности, состава водоносных горизонтов, напоров подземных вод, а также литологической и пространственной неоднородности внутри геологического тела.

Предварительная схема минимального объема геологоразведочного бурения может выглядеть следующим образом, показанным на рис. 3.

Представленное расположение разведочных скважин дает возможность оценить наличие водоносных горизонтов и (предварительно) характер связи водоносных горизонтов с рекой, фильтрационную неоднородность в пределах каждой фации. Опытнo-фильтрационные работы в скважинах в этом случае являются обязательными. Полученная исходная информация должна дать возможность сделать вывод о пути миграции от источника загрязнения в

подземные воды на основе гидрогеологических разрезов и карты. Конечной целью оценки гидрогеологических условий в ходе ИГИ должны быть оценка влияния загрязнения на ухудшение экологической обстановки и поиск оснований для вывода о необходимости проектирования защитных мероприятий.

Рис. 3. Схема геологоразведочного бурения

Разведочное бурение на участках сооружения защитных экранов

В дальнейшем, когда требуется проектирование защиты от загрязнения, объем буровых работ должен быть увеличен. Сооружение защитных экранов производится в целях локализации очагов загрязнения подземных вод [6]. При неоднородном литологическом составе водоносных горизонтов детальное расчленение разреза на водоносные и разделяющие слои необходимо для сокращения объема тампонажных работ при сооружении защитных экранов, стоимость которых значительно выше геологоразведочных работ. Прежде чем проиллюстрировать это положение с экономических позиций, следует обратиться к хорошо известным и общепринятым в мировой практике положениям, касающимся решения проблем локализации очагов загрязнения подземных вод в районах размещения токсичных и радиоактивных отходов.

Для локализации загрязнения используются противифльтрационные сорбирующие вертикальные завесы. Сооружение таких завес в мировой практике в основном осуществляется с использованием «манжетных колонн». Манжетная колонна представляет собой трубу с отверстиями через каждые 0,5 м, которые закрыты резиновыми манжетами. Такая колонна, опущенная в предварительно пробуренную скважину, позволяет при использовании

специального иньектора осуществлять закачку сорбента через каждые 0,5 м. Закачка сорбирующего раствора в поровое пространство грунта должна выполняться в две стадии. На первой при высоких давлениях осуществляется разрыв грунтовой толщи на участке обрабатываемого манжета. При разрыве грунта формируются три вертикальные полости разрыва, ориентированные в плане под углом 120°, от этих полостей разрыва и идет пропитка порового пространства грунта сорбентом (вторая стадии иньекции при использовании манжетных колонн). Использование манжетных колонн значительно сокращает время на создание защитного экрана (положительная сторона при использовании манжетных колонн). К сожалению, есть и отрицательная. Она заключается в том, что при использовании высоких давлений на первой стадии иньекции разрыв может формироваться как в песчаных, так и в суглинистых разностях. При его формировании в песчаных разностях он является источником распространения раствора в грунтовой толще вокруг скважины. При формировании разрыва в суглинистых разностях поступающий объем тампонаж раствора идет не на пропитку порового пространства грунта, а на дальнейшее развитие полости разрыва, длина которого может определяться десятками метров. В этом случае расходуется дорогостоящий раствор, не выполняя своего предназначения, т.к. природные суглинистые разности обладают сорбционной способностью в отношении тяжелых металлов и радионуклидов значительно большей, чем закачиваемый в грунт сорбент. Кроме этого, формирование только полостей разрыва толщиной 0,5–1,0 см, не позволяет получить на пути миграции загрязнителей массив геохимического барьера необходимой мощности.

Таким образом, первая задача специалистов, создающих геохимический барьер, определяется необходимостью исключить распространение дорогостоящего сорбента в суглинистых разностях. Наличие этих разностей может быть определено только в результате разведочного бурения. На базе этого бурения принимаются решения об исключении закачки сорбента через ряд манжетов. Такое исключение ведет к снижению себестоимости работ, но принятие таких исключений должно базироваться на разведочных работах.

Далее рассмотрено соотношение себестоимости разведочных работ и расходов на стоимость тампонажных материалов. Это можно сделать на примере сооружения трехрядной противодиффузионной сорбирующей завесы длиной 100 м и глубиной 20 м. Согласно действующему справочнику базовых цен на инженерно-геологические и инженерно-экологические изыскания для строительства при III категории по буримости породы [9] с индексом изменения стоимости 54,75 [2–5], стоимость погонного метра бурения ударно-канатным способом с обсадкой трубами диаметром 147 мм и с геологической документацией: $28,3 \text{ руб/пог. м} \cdot 54,75 = 1549,42 \text{ руб/пог. м}$. Таким образом, бурение трех двадцатиметровых разведочных скважин без дополнительных затрат составит $60 \text{ м} \cdot 1549,42 \text{ руб/пог. м} \approx 93 \text{ тыс. руб.}$ При сооружении сплошной завесы глубиной 20 м на 100-метровом участке, когда

требуется три ряда скважин для инъекции раствора, шаг между скважинами и между рядами составляет 1,5 м, необходима проходка двухсот скважин. Длина манжетных колонн для нагнетания щавелево-алюмосиликатного гелеобразующего раствора (ЩАС), составляет также 200 шт. на каждую скважину, общая их длина составит 4000 м. Колонковое бурение 4000 пог. м с обсадкой трубами диаметром 147 мм и геологической документацией для двухсот скважин глубиной 20 м каждая, согласно [2–5] составит: $37,8 \text{ руб./пог. м} \cdot 54,75 \cdot 4000 \approx \mathbf{8278 \text{ тыс. руб.}}$

Объем нагнетаемого ЩАС-раствора, требуемый для каждой скважины при средней пористости грунтов ($n = 40\%$) и необходимом заполнении ее объема на удаление 0,75 м от центра скважины: $20 \cdot \pi \cdot 0,75^2 \cdot 3,14 \cdot 0,4 \approx 14 \text{ м}^3$ (2800 м^3 на 200 скважин).

При стоимости раствора 4400 руб/м³ затраты на весь участок сплошной завесы длиной 100 м составят: $4400 \text{ руб./м}^3 \cdot 2800 \text{ м}^3 = \mathbf{12320 \text{ тыс. руб.}}$

Обойменный раствор, приготавливаемый для фиксации и герметизации манжетных колонн при инъекции ЩАС-раствора в грунтовую толщу, требует для каждой скважины 123,6 кг цемента и 75 кг глины при их ориентировочной стоимости 10 и 7 руб/кг соответственно. Таким образом, затраты на раствор для 100-метрового участка завесы составят: $(123,6 \cdot 200 \cdot 10) + (75 \cdot 200 \cdot 7) \approx \mathbf{352 \text{ тыс. руб.}}$

Манжетные колонны на 100 м завесы при стоимости 120 руб/м: $4000 \text{ м} \cdot 120 \text{ руб/м} = \mathbf{480 \text{ тыс. руб.}}$

Таким образом, затраты на материалы и бурение сплошной инъекционной завесы на участке протяженностью 100 м и ее глубиной 20 м составят, по меньшей мере, **21,5 млн руб.** Стоит помнить, что стоимость значительно возрастает, если при таком слабо изученном разрезе произойдет разрыв пласта с избыточной закачкой раствора.

Далее представлены *затраты на разведочное бурение и сооружение завесы, выполняемой способом избирательной инъекции в проницаемые отложения.*

Примером участка с резкой плановой и профильной неоднородностью в проницаемости грунтов выступает полигон твердых бытовых и промышленных отходов «Саларьево». Более проницаемые интервалы московской морены, доля которых в разрезе составляет от 17 до 25% по вскрытой мощности, должны подвергаться инъекции, а слабопроницаемые суглинистые отложения окружающие их обладают собственной сорбционной способностью, поэтому возможно уменьшение стоимости инъекционных работ за счет повышения детальности разведочного бурения. Объем и стоимость разведочного бурения ударно-канатным способом с обсадкой трубами диаметром 147 мм, с геологической документацией и шагом 3 м на протяжении 100 м участка составит: $1549,42 \text{ руб./пог. м} \cdot 660 \text{ пог. м} \approx \mathbf{1022 \text{ тыс. руб.}}$

В соответствии с тем, что проницаемые отложения в разрезе разведочных скважин по имеющимся данным составляют не более 30%, объем необходимого

ЩАС-раствора и затраты на него составят: $(4400 \text{ руб/м}^3 \cdot 2800 \text{ м}^3) \cdot 0,3 \approx$
3700 тыс. руб.

Трехметровый шаг разведочного бурения позволяет применить разведочные скважины в качестве одного из трех инъекционных рядов скважин, таким образом стоимость колонкового бурения также уменьшится: $(37,8 \text{ руб/пог. м} \cdot 54,75 \cdot (4000 - 660) \text{ м}) \approx$ **6912 тыс. руб.**

Таким образом, затраты на материалы и бурение при сооружении завесы способом избирательной инъекции, при разведочном бурении с шагом 3 м составят по меньшей мере **11,6 млн руб.**, что намного меньше затрат на сплошную завесу.

В заключение следует отметить, что разведочное бурение определяет, прежде всего, обоснованность решений о целесообразности разработки дорогостоящих мероприятий по защите одного из важнейших компонентов окружающей среды – водных ресурсов. Снижение востребованных объемов разведочных работ не должно определяться общей необходимостью уменьшения себестоимости проектируемых защитных мероприятий, в связи с тем, что их эффективность в значительной степени определяется результатами этого бурения.

Заключение

По мнению авторов, в ходе ИГИ на участках загрязнения подземных вод, необходимо выделить мест и объема разведочного бурения с учетом фациальных границ четвертичных отложений, это позволит выполнить подготовку рационального объема буровых работ, который даст возможность:

1. Исследовать загрязненность подземных вод.
2. Определить пути поступления и дальнейшей миграции загрязнителей за пределы полигона.
3. Спланировать тип и стоимость необходимых защитных мероприятий.
4. Создать сеть мониторинга напоров и химического состава подземных вод.
5. Снизить объем буровых работ на этапе ИГИ.
6. Обосновать минимально необходимое количество буровых работ, при локализации очагов загрязнения подземных вод, в районе размещения промышленных и бытовых отходов.

Список литературы

1. Краткое полеводное руководство по комплексной геологической съемке четвертичных отложений / Под ред. С.Г. Боча, В.И. Громова, К.В. Никифорова. М.: АН СССР, Москва, 1957. 202 с.
2. Письмо Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ № 46012-ИФ/09 от 25.10.2021 «О рекомендуемой величине

индексов изменения сметной стоимости строительства в IV квартале 2021 года, в том числе величине индексов изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ, индексов изменения сметной стоимости пусконаладочных работ, индексов изменения сметной стоимости проектных и изыскательских работ».

3. Письмо Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ № 48346-ИФ/09 от 06.11.2021 «О рекомендуемой величине индексов изменения сметной стоимости строительства в IV квартале 2021 года, в том числе величине индексов изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ, индексов изменения сметной стоимости пусконаладочных работ».
4. Письмо Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ № 48642-ИФ/09 от 09.11.2021 «О рекомендуемой величине индексов изменения сметной стоимости строительства в IV квартале 2021 года, в том числе величине индексов изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ, индексов изменения сметной стоимости пусконаладочных работ».
5. Письмо Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ № 49637-ИФ/09 от 15.11.2021 «О рекомендуемой величине индексов изменения сметной стоимости строительства в IV квартале 2021 года, в том числе величине индексов изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ, индексов изменения сметной стоимости пусконаладочных работ».
6. Сергеев В.И., Шимко Т.Г. Техническая мелиорация грунтов в современных задачах охраны геологической среды // Геотехника. 2015. № 4. С. 64–70.
7. Сергеев Р.В. Анализ фациального состава аллювиальных отложений при выборе места размещения отходов промышленности // Сборник V Международной научно-практической конференции «Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы». Севастополь: Научная книга, 2017. С. 433–435.
8. СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96*».
9. Справочник базовых цен на инженерно-геологические и инженерно-экологические изыскания для строительства от 01.01.1999.
10. Царев М.А. Подготовка исходных данных при составлении гидрогеологического прогноза // Материалы XII Общероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». М.: Геомаркетинг, 2016. С. 453–457.
11. Шанцер Е.В. Аллювий рек умеренного пояса и его значение для познания закономерностей строения и формирования аллювиальных свит // Труды ГИН АН СССР. Серия геологическая. 1951. Вып. 135. С. 173–193.

M.A. Tsarev, V.I. Sergeev, R.V. Sergeev

Lomonosov Moscow State University, Moscow, domikes@gmail.com

DETERMINATION OF THE NECESSARY VOLUME OF DRILLING WORKS DURING ENGINEERING-GEOLOGICAL SURVEYS NEAR THE SOURCES OF POLLUTION OF GROUNDWATER

Abstract. Engineering-geological surveys in the territories of the projected and subject to reclamation waste disposal sites include exploratory drilling. In the overwhelming majority of cases, exploratory drilling data is insufficient for designing protection against pollution, there are often excess wells. The purpose of this publication is to show a methodological approach to the volume of exploration drilling to study the migration path from the source of pollution to groundwater, which will make it possible to obtain the optimal number of exploration wells for making a decision on the advisability of localizing the formed source of pollution. The goal was also to justify the minimum number of exploration wells for making decisions about the intervals to be plugged. The feasibility of performing a large volume of geological exploration work is determined by their extremely low cost compared to the costs of sorbing materials of a geochemical barrier for localizing a pollution source.

Key words: drilling; pollution; groundwater; protective measures; facies.

Подлипский И.И.

РГПУ им. А.И. Герцена, г. Санкт-Петербург, ecoadvisor@mail.ru
ООО «КТПИ “Газпроект”», г. Санкт-Петербург

ТИПИЧНЫЕ ОШИБКИ ЭКОЛОГОВ ПРИ СОСТАВЛЕНИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОТЧЕТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОВЕДЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

Аннотация. Представлены первые наработки для планируемого методического сборника (чек-листа) по оценке качества и установления соответствия материалов инженерных изысканий. Рассматриваются типичные ошибки экологов при составлении технического отчета по результатам проведения инженерно-экологических изысканий.

Ключевые слова: инженерные изыскания; инженерно-экологические изыскания; технический отчет; нормативные документы; границы изысканий.

Данные инженерных изысканий являются основной для начала осуществления любого объекта капитального строительства, и от того, насколько грамотно они будут проведены, зависит весь ход реализации строительного проекта, безопасность и устойчивость будущего здания или сооружения в течение всего жизненного цикла.

Недостовверные результаты инженерных изысканий оказывают негативное влияние на принятие проектных решений и стоимость строительства. Часто работа непрофессионалов в области инженерных изысканий приводит к переплате инвесторов на 30–35% и более в период проведения строительных работ. Качественное проведение инженерных изысканий, с другой стороны, позволит исключить риск возникновения аварийных ситуаций, а также связанных с ними материальных и юридических проблем.

Эксперты утверждают, что проблема недобросовестного проведения инженерных изысканий связана с тем, что в настоящее время разорвана важная технологическая цепочка, состоящая из трех элементов: изыскатель, проектировщик, строитель.

По статистике, в последнее время на инженерные изыскания в типовом городском строительстве приходится всего 0,2% от стоимости проекта, а на уникальных и особо опасных объектах – порядка 2–3%.

Обсуждение основных ошибок – это всегда актуально и всегда вызывает интерес у экологов-разработчиков, заказчиков и экспертов по направлениям. В данной публикации не будет попытки проанализировать все возможные замечания и выявить скрытые алгоритмы их возникновения. Основой послужил опыт автора в области проведения полевых и камеральных работ, разработки технического отчета по результатам проведения инженерно-экологических изысканий (ИЭИ), заказа и приемки данных работ у подрядчиков, использования материалов для разработки природоохранных разделов

проектной документации, а также практики в области экспертизы данных материалов.

Данная работа представляет собой часть большого проекта в области разработки методического сборника (чек-листа) по оценке качества и установления соответствия материалов инженерных изысканий.

1. Общераспространенная и частая ошибка полевых и камеральных экологов изыскателей – установление границ проведения изысканий. В отличие от других видов изысканий, зона проведения ИЭИ не ограничивается границей площадки проектируемого объекта или границей предприятия, на территории которого этот объект расположен. Границей изысканий в соответствии с п. 3.9 [4] как раз и является «предполагаемая граница **зоны воздействия** (особенно по экологически опасным объектам)». Определение, что такое граница зоны воздействия в данном нормативе нет. В соответствии с [6], **зоной воздействия** является граница, на которой отсутствует вредное воздействие факторов среды обитания на человека и обеспечиваются благоприятные условия его жизнедеятельности. В [2] **зона влияния** на атмосферный воздух определяется изолинией с концентрацией 0,05 от предельно допустимой, но вот являются ли понятия зоны воздействия и зоны влияния аналогичными, каждый эксперт трактует по-разному. По [5] **зона воздействия проектируемого объекта** – участок территории суши и (или) акватории, в пределах которого в ходе строительства и эксплуатации объекта может быть оказано негативное воздействие на окружающую среду.

2. Сведения об источниках водоснабжения, их зонах санитарной охраны (ЗСО). В этом разделе необходимо предоставить сведения не только об отсутствии источников водоснабжения, но и об отсутствии зон санитарной охраны в границах территории проведения ИЭИ. Также ввиду возможного изменения проектных решений рекомендуется запрашивать сведения не только непосредственно для объекта, но также и для буферной зоны (1000–1500 м). Наличие информации по ЗСО источников водоснабжения позволяет оценить полноту проведенных исследований (согласно п. 2 [5] и прил. 9 [3]). Формулировка ответа: «по объекту (наименование объекта), а также в 1000 м зоне отсутствуют поверхностные и подземные водозаборы, а также их зоны санитарной охраны». Не принимаются ответы об отсутствии сведений об источниках водоснабжения, сведения, не содержащие исчерпывающей информации о расположении источников водоснабжения, а также границах ЗСО.

3. Сведения о защитных и особо защитных участках (ОЗУ) лесов. При получении сведений о защитных лесах, ценных лесах и особо защитных участках лесов необходимо помнить, что такие леса могут встречаться как на землях лесного фонда, так и на землях иных категорий. В связи с этим требуется предоставление сведений как **от уполномоченного органа в сфере лесного хозяйства**, так и **от органов местного самоуправления**. Если объект полностью находится в границах земель лесного фонда или наоборот не

затрагивает их, то следует представить подтверждение этому факту – например, утвержденные материалы документации по планировке территории, перечень кадастровых номеров участков, отводимых под строительство с указанием их категории. Кроме того, ответы администраций не всегда (с первого раза – практически никогда!) содержат полные сведения о защитных, ОЗУ лесов, лесопарковых зеленых поясах, а часто содержат терминологию, отсутствующую в Лесном кодексе РФ [8] – изыскателям необходимо требовать от администраций четкого следования формулировкам Лесного кодекса РФ [8].

4. Наличии/отсутствии особо ценных продуктивных сельскохозяйственных угодий (в соответствии со ст. 79 Земельного кодекса РФ [7]) – предоставляется региональным министерством сельского хозяйства. Важно понимать, что часто в регионах проведения работ отсутствуют картографические данные о границах этих участков.

5. Наличии/отсутствии ЗСО районов морского водопользования (согласно СанПиН 2.1.7.3684-21 [3]) – предоставляется органом местного самоуправления. Важно помнить, что предметом ошибок в этой части является недооценка размеров ЗСО.

Список литературы

1. ГОСТ 17.4.2.01-81 Охрана природы. Почвы. Номенклатура показателей санитарного состояния.
2. ОНД-86 Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий.
3. СанПиН 2.1.7.3684-21 Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий.
4. СП 11-102-97 Инженерно-экологические изыскания для строительства.
5. СП 502.1325800.2021 Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.
6. Федеральный закон № 52-ФЗ от 30.03.1999 «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения».
7. Федеральный закон № 136-ФЗ от 25.10.2001 «Земельный кодекс Российской Федерации».
8. Федеральный закон № 200-ФЗ от 04.12.2006 «Лесной кодекс Российской Федерации».

I.I. Podlipskiy

Herzen State Pedagogical University, Saint Petersburg, ecoadvisor@mail.ru
Design and Technological Institute “Gazproekt” LLC, Saint Petersburg

TYPICAL ERRORS OF ECOLOGISTS IN PREPARING A TECHNICAL REPORT ON THE RESULTS OF ENGINEERING-ECOLOGICAL SURVEYS

Abstract. The first developments for the planned methodological collection (checklist) for assessing the quality and establishing the conformity of engineering survey materials are presented. Typical errors of ecologists when drawing up a technical report based on the results of engineering-ecological surveys are considered.

Key words: engineering surveys; engineering-ecological surveys; technical report; regulations; survey boundaries.

СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНО-ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ»

Клименко Д.Е.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, klimenkodi@rambler.ru

КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ НАВОДНЕНИЯ НА СРЕДНЕМ УРАЛЕ В УСЛОВИЯХ УВЕЛИЧЕНИЯ ЧАСТОТЫ И ИНТЕНСИВНОСТИ ЛИВНЕЙ

Аннотация. Климатические изменения в последние 50 лет обусловили интенсификацию конвективных процессов и влагопереноса в атмосфере. Отмечается увеличение частоты ливней, количества осадков и их интенсивности. Изменения затронули глубоко континентальные районы России, в т.ч. Урал. По данным исследования, количество паводкоформирующих ливневых осадков (сумма осадков за ливень более 10 мм и максимальная минутная интенсивность более 0,2 мм/мин) за последние 120 лет возросло в 1,5–2,0 раза, а суточные максимумы осадков – в 3,0 раза. Это обстоятельство приводит к формированию катастрофических дождевых паводков на малых реках, к которым не готова хозяйственная инфраструктура региона, спроектированная более 50 лет назад в расчете на ранее принятые характеристики дождей.

Ключевые слова: наводнения; изменения климата; паводкоформирующие ливни; гидрологические расчеты; малые реки.

Введение

Расчет максимальных расходов воды дождевых паводков малых рек является наиболее частой задачей инженерно-гидрометеорологических изысканий на линейных объектах (расчеты мостов и водопропускных труб), учитывая, что паводочные расходы воды на малых реках часто превышают расходы весеннего половодья. В инженерной практике расчеты выполняются в соответствии с требованиями СП 33-101-2003, с использованием метода «предельной интенсивности» [4].

Основными факторами, формирующими паводочные расходы малых рек, являются обеспеченные суточные максимумы осадков, параметры кривых редукции ливней, а также характеристики склонов водосбора (уклон водосбора и инфильтрационная способность грунтов). Существующие методы расчета базируются на характеристиках дождей, определенных более 70 лет назад. Существующие хозяйственные объекты Среднего Урала (гидротехнические сооружения, мостовые переходы на малых реках) запроектированы и построены в расчете на максимальные расходы дождевых паводков, рассчитываемых на основе параметров ливней, определенных в 1950–1960-е гг. Наводнения, прошедшие в 2020–2021 гг. на территории Свердловской области,

хорошо отражают факт несоответствия пропускной способности существующих гидротехнических сооружений величинам паводочных расходов, формируемых ливневыми осадками в современных условиях.

Материалы и методы

Исходными материалами для анализа многолетних тенденций ливневых осадков послужили данные метеонаблюдений с одной стороны, и последствия наводнений, прошедших в последние годы, с другой.

В качестве исходной информации по ливням использовались ряды максимальных в году суточных сумм осадков по 217 метеостанциям, расположенным на территории Уральского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (далее – Уральское УГМС) за период с начала наблюдений (наиболее ранние годы – 1880–1895) по 2019 г. По данным настоящего исследования установлено, что ряды эмпирических интенсивностей ливня не могут быть описаны единым законом распределения, а экстремальных интенсивностей описываются лог-нормальным распределением (реже – экспоненциальным), но не нормальным. Ряды величин суточных максимумов осадков H_{max} не являются однородными и независимыми, а значит, статистический аппарат их обработки требует разработки. Для анализа временных рядов рационально использование полных кривых обеспеченностей, полученных на основании усеченных совокупностей [1, 2].

Оценка всех эмпирических рядов на принадлежность к статистическим законам распределения выполнена с использованием программы STATISTICA 6.0 в двух вариантах: с выделением из общего количества «экстремальных ливней» и без такого выделения. Эмпирические распределения интенсивности ливня за заданные временные интервалы проверялись на соответствие следующим законам распределения, используемым в климатологических расчетах: Z-распределение (нормальное); экспоненциальное; γ -распределение (трехпараметрическое гамма-распределение); лог-нормальное распределение; χ^2 -распределение (хи-квадрат или Пирсона). Проверка соответствия осуществлена с использованием критериев согласия: Колмогорова – Смирнова; Шапиро – Уилка; Пирсона χ^2 (хи-квадрат) [3].

Результаты

На основе материалов наблюдений над ливневыми осадками был выполнен анализ многолетних трендов в суммах осадков. Ливни могут выпадать с равной вероятностью в любой точке географически однородной территории. При этом плотность метеорологических станций очень низкая. В связи с этим территория была районирована на горную и равнинную части (горная часть ограничена изогипсой 200 м), разделенных водоразделом

Уральских гор на Предуралье (к западу от водораздела) и Зауралье (к востоку от водораздела). Для каждой из этих территорий за каждый год был выбран наибольший слой осадков по совокупности метеостанций региона. На основе максимальных годовых сумм осадков по каждому региону были построены хронологические графики (рис. 1). Данные графики показывают, что во времени суммы осадков не остаются постоянными и за последние 100 лет максимальные суточные суммы осадков увеличились в 2–3 раза по сравнению с данными начала XX в. Это является важнейшей причиной увеличения частоты и интенсивности наводнений в результате выпадения дождей на малых реках.

Рис. 1. Многолетние колебания максимальных в году сумм осадков за непрерывные 24 ч по районам Урала

Обзор наводнений на территории Свердловской обл. в 2020–2021 гг.

Последние 2 года ознаменовались значительными наводнениями на территории Свердловской области в городах Нижние Серги, Нижний Тагил, Верхняя и Нижняя Салда и в их окрестностях.

В период с 20 по 21 июля 2020 г. в районе г. Нижние Серги выпало 102 мм осадков (ранее зафиксированный максимум по метеостанции «Бисерть» в 1966 г. составлял всего 60 мм). Основная порция осадков (82 мм) прилась на срок 15:00 UTC 20.07.2020, вторая порция (20 мм) прилась на срок 03:00 UTC 21.07.2020. Причина ливневых осадков – фронтальная облачность,

перемещавшаяся по склонам Бардымского и Коноваловского хребтов. Суточный максимум осадков имел обеспеченность около 0,5%.

Наиболее существенным наводнение оказалось на р. Заставка. Эта река берет начало на отметках 450–460 м н.у.м. и является правобережным притоком р. Серга (речная система рек Заставка – Серга – Уфа – Белая – Кама – Волга – Каспийское море), в которую она впадает на 64-м км от устья. До расчетного створа в г. Нижние Серги (0,4 км от устья) длина р. Заставка 8,2 км, площадь водосбора 27,5 км². Залесенность бассейна составляет 91%.

Величина максимального расхода воды р. Заставка, сформированного ливнем, оценена в 54,0–64,0 м³/с (ранее величина максимального паводочного расхода воды той же обеспеченности оценивалась в 25,0 м³/с). На автомобильном и пешеходном мостах по ул. Ленина сформировался залом из веток, стволов деревьев, досок и прочего мусора (холодильников, лыж, решеток, бочек и т.п.) (рис. 2). Этот мусор полностью забил подмостовые сечения, приведя к подъему уровня на 2,2 м над меженным (меженный уровень практически равен отметкам дна). Далее мусор начал забивать решетчатые ограждения пешеходного моста. Общий подъем уровня составил 3,6 м. Ниже автомобильного моста на ул. Ленина вплоть до устья р. Заставки заломов не было, однако наблюдалось интенсивное переформирование берегов.

Рис. 2. Завалы на пешеходном мосту. Фото Е.П. Корепанова

Выше по течению р. Заставка поменяла свое русло (оно сместилось на восток на 21 м и сформировалось по одной из улиц). Берег отступил на 2–5 м в

разных местах (рис. 3). Оказались подмыты фундаменты ряда домов (деревянные дома накренились в сторону реки). Металлические гаражи обваливались в реку, выносились на отмели, создавая препятствия потоку воды и заставляя его вновь и вновь менять свое русло.

Рис. 3. Разрушенный дом в районе пересечения ул. Жукова с р. Заставкой

В период с 4 по 5 июля 2021 г. в районе г. Нижний Тагил суточный максимум по метеостанции «Нижний Тагил» составил 152 мм (ранее в расчетах паводочного стока использовали максимум 28.07.2004, равный 90 мм). Мощные ливни стали причиной наводнений в окрестностях города, а также в городах Верхняя и Нижняя Салда.

В г. Верхняя Салда был нарушен режим эксплуатации Верхне-Салдинского водохранилища. Плотина обеспечила пропуск максимального расхода воды, но ее уровень в самом водохранилище оказался выше отметки гребня дамбы по северному берегу (вдоль территории бывшего металлургического завода), произошел перелив воды через гребень с затоплением близлежащих территорий (рис. 4). К юго-западу от г. Верхняя Салда, на участке перехода автодороги (участок «Северная – Никитино») мостовой переход через р. Ису не обеспечил пропуск максимального расхода воды, произошел перелив через полотно дороги.

В г. Нижняя Салда произошли превышение уровней воды выше критической отметки временной дамбы в верхнем бьефе водохранилища, прорыв дамбы, были затоплены набережные. На железнодорожном перегоне

Нижняя Салда – Ясашная осел участок насыпи дороги вследствие размыва водопропускного сооружения под насыпью, движение на участке остановлено. На реках в окрестностях города затоплены мосты, происходил перелив воды через насыпи автомобильных дорог.

Рис. 4. Перелив воды через гребень плотины Верхне-Салдинского водохранилища.
Источник: <https://vsalde.ru/>

В месте слияния рек Тагил, Черной и Шайтанки были затоплены дачные постройки (так называемая «Уральская Венеция») вследствие синхронного спуска воды через плотины Леновского (максимальный сбросной расход 320 м³/с) и Черноисточинского (44,5 м³/с) водохранилищ. В с. Николо-Павловском затоплены улицы Береговая и Заречная вдоль р. Шайтанки; размывло земляную плотину на р. Шайтанке выше села, насыпь автодороги (долинный ход вдоль р. Шайтанки) и откосы мостового перехода; прорваны плотины на р. Виллой в п.г.т. Виллой.

Обсуждение и выводы

Тенденции увеличения количества ливней и суммы осадков за время их выпадения отмечены рядом исследователей. Так, в работе [5] отмечается увеличение количества конвективных осадков при сокращении количества обложных, что косвенно подтверждает вывод автора об увеличении суточных максимумов осадков за последние 100 лет.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Сложность анализа гидрометеорологической обстановки за время прохождения наводнений обнажает проблему абсолютной недостаточности пунктов гидрологических наблюдений на малых реках и недостаточную для анализа пространственной структуры дождей плотность метеостанций. Данная проблема могла бы быть решена с развитием радиолокационных методов наблюдений за осадками.

2. Для оценки последствий наводнений требуется проведение регулярных оперативных послепаводковых обследований и комплекса гидрометрических измерений (в настоящее время официальные структуры проводят подобные работы через полгода-год после события, когда следы паводков на местности установить невозможно).

3. Зачастую к интенсификации наводнений приводит ненадлежащее состояние прибрежных территорий водных объектов в населенных пунктах (наличие по берегам мусора, упавших деревьев, способных при повышении уровня прийти в движение и создать лесной залом у ближайшего препятствия, что приведет к дополнительному росту уровней воды).

4. Изменение характеристик ливневых осадков в последние годы требует актуализации параметров дождя, используемых в инженерно-гидрометеорологических расчетах для целей строительного проектирования. Кроме того, необходимо приведение хозяйственной инфраструктуры регионов в соответствие современным факторам формирования стока и современным расчетным величинам ливневых осадков (т.е. необходимость реконструкции мостов, плотин, автодорог должна определяться не только их техническим состоянием, но и изменением расчетных максимальных расходов дождевых паводков).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-05-00448.

Список литературы

1. Клименко Д.Е., Епончинцева Д.Н., Корепанов Е.П., Черепанова Е.С. Исследование кривых редукции паводкоформирующих ливневых осадков Зауралья // Метеорология и гидрология. 2018. № 2. С. 76–89.
2. Клименко Д.Е., Корепанов Е.П. Картирование суточного слоя осадков обеспеченностью $P = 1\%$ на территории деятельности Уральского УГМС при расчетах стока дождевых паводков по формуле предельной интенсивности // Географический вестник. 2012. № 3(22). С. 54–63.
3. Клименко Д.Е., Корепанов Е.П. Максимальный сток рек Свердловской области. Пермь – Екатеринбург: Раритет-Пермь, 2014. 180 с.
4. СП 33-101-2003 Определение основных расчетных гидрологических характеристик.

5. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades / A. Chernokulsky, F. Kozlov, O. Zolina, O. Bulygina, I. Mokhov, V. Semenov // Environmental Research Letters. 2019. Vol. 14. No. 4. ID 045001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafb82>.

D.E. Klimenko

Ural Federal University, Yekaterinburg, klimenkodi@rambler.ru

CATASTROPHIC FLOODING IN THE MIDDLE URALS UNDER CONDITIONS OF INCREASING THE FREQUENCY AND INTENSITY OF SHOWERS

Abstract. Climatic changes in the last 50 years have led to the intensification of convective processes and moisture transfer in the atmosphere. An increase in the frequency of showers, the amount of precipitation and their intensity is noted. The changes affected deeply continental regions of Russia, including the Urals. According to the study, the amount of flood-forming rainfall (the amount of precipitation for a rainstorm is more than 10 mm and the maximum minute intensity is more than 0.2 mm/min) over the past 120 years has increased by 1.5–2.0 times, and the daily maximum precipitation has increased by 3.0 times. This circumstance leads to the formation of catastrophic rain floods on small rivers, for which the economic infrastructure of the region, designed more than 50 years ago, based on the previously accepted characteristics of rains, is not ready.

Key words: floods; climate change; flood-forming showers; hydrological calculations; small rivers.

Мискевич И.В.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, szoiran@mail.ru

ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УСТЬЯ р. КАРГОВКИ В МЕЗЕНСКОМ ЗАЛИВЕ БЕЛОГО МОРЕ В ЛЕТНЮЮ МЕЖЕНЬ

Аннотация: Приведено описание гидрологических характеристик устья р. Карговки в вершине Мезенского залива Белого моря в летний период по результатам исследований 2021 г. Рассмотрена изменчивость уровня, температуры воды, солености и содержания взвесей в зоне смешения речных и морских вод. Ее протяженность в летнюю межень составляет около 5 км. Максимальная соленость в устье реки на полной воде приливного цикла достигала 23‰, диапазон изменчивости концентраций взвеси составил 47–626 мг/л. Зафиксировано значительное снижение величины прилива на устьевом взморье р. Карговки, что не наблюдается на входе в эстуарии рек Кулой и Мезени. Это можно объяснить наличием дивергенции приливных потоков воды, входящих в указанные эстуарии.

Ключевые слова: Белое море; Мезенский залив; река Карговка; устье; прилив; гидрология; изменчивость.

В ходе подготовки России к низкоуглеродному будущему (к «зеленой экономике») в последующие годы можно ожидать возобновление интереса к строительству приливных электростанций (ПЭС), в т.ч. в Мезенском заливе Белого моря. Для проекта Мезенской ПЭС в СССР был проведен широкий комплекс инженерных изысканий в области гидрометеорологии и экологии [1], но основное внимание при этом было уделено природным характеристикам Мезенского залива и эстуариям рек Мезени и Кулой. В то же время устья многочисленных малых рек Мезенского залива остались практически не исследованными. В сложившейся ситуации изучение указанных водных объектов получает особую актуальность. В настоящей публикации даны сведения по гидрологии устья одной из таких рек в южной части Мезенского залива, что дает определенный вклад в решение рассматриваемой проблемы.

Исследования устья р. Карговки выполнялись сотрудниками Северо-Западного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН в летнюю межень (16–18 августа) 2021 г. Этот водоток относится к малым рекам и имеет длину около 38 км. Река располагается в вершине Мезенского залива между эстуариями рек Кулой и Мезень. Макроприливное устье р. Карговки можно разделить на полузакрытое устьевое взморье длиной около 1 км и шириной до 1,2 км и устьевой участок реки, представленный узким извилистым водотоком протяженностью в несколько километров. Для устьевой области р. Карговки характерны очень малые глубины. В малую воду приливного цикла устьевое взморье реки практически полностью пересыхает, а сток воды в море идет через канал шириной 2–3 м с глубиной не более 0,5 м и через сеть микроводотоков (ваттовых ручьев). Таким образом, на малой воде устьевая область р. Карговки представлена преимущественно каналообразным водотоком, на серединах фаз прилива и отлива – воронкообразным эстуарием, на полной воде устьевое

взморье реки трансформируется в довольно обширный залив, ширина устьевое участка реки при этом мало меняется.

Станции, на которых были проведены наблюдения, показаны на рисунке. На станциях 1к–8к был выполнен разрез в полную воду приливного цикла, на станциях 2к и 3к – полусуточные серии наблюдений. Для определения температуры и солености воды применялся многопараметрический анализатор жидкости Multi 3420 фирмы WTW (Германия). Для измерения гидрологических параметров (глубины, температуры воды, солености, параметров течения) на придонном горизонте на станции 3к использовался зонд-регистратор SEAGUARD RCM SW фирмы Aanderaa (Норвегия). Уровень воды на станции 2к определялся по водомерной рейке с привязкой к условному нулю поста.

Рис. Карта-схема расположения станций наблюдений в устье р. Карговки. Расстояние между станциями 1к и 2к составляет 1 км, между остальными станциями – 0,5 км; пунктирной линией обозначена морская граница устьевое взморья реки

Пробы воды для определения количества взвешенных веществ отбирались в чистые пластиковые бутылки емкостью 1,5 л для дальнейшей фильтрации. Выделение взвеси проводилось методом мембранной ультрафильтрации под вакуумом через чистые (обработанные 4%-й соляной кислотой и тщательно промытые бидистиллированной водой) ядерные фильтры. Предварительное взвешивание ядерных фильтров осуществлялось на электронных лабораторных весах Adventurer Pro model RV214 (производства фирмы OHAUS Europe, Швейцария, свидетельство о поверке № АК–329, со специальным классом точности и ценой деления 0,1 мг). Ядерные фильтры (диаметр – 47 мм, диаметр пор – 0,45 мкм, изготовлены в Объединенном институте ядерных исследований, г. Дубна) помещались в прибор вакуумного фильтрования (ТУ 9471-002-00212038-00) с поликарбонатными фильтродержателями (фирмы Sartorius AG, Германия). Фильтрация каждой пробы воды проводилась через три параллельных ядерных фильтра при помощи вакуумного мембранного насоса НВМ 2×2-К производства ЗАО «ВЛАДИСАРТ» (г. Владимир) с предельным остаточным давлением 50 мм рт. ст.

Величина прилива на станции 2к в период проведения наблюдений составила 2,9 м. В то же время ее табличное значение на морской границе эстуария р. Кулой около мыса Карговский равнялось 4,6 м. Столь значительное падение уровня воды на данном коротком участке Мезенского залива можно объяснить наличием дивергенции (расхождением) потоков воды, входящих в эстуарии рек Кулой и Мезень в фазу прилива. Например, в эстуарии р. Кулой у с. Долгощелье, отстоящего от мыса Карговский на 30 км, величина прилива была такой же, что и на станции 2к, отстоящей от мыса всего на 2 км.

Временная изменчивость уровня воды на устьевом участке реки носила «импульсный» характер с наличием короткого периода его подъема (2–3 ч) и аналогичным периодом его быстрого спада. Последний затем сменялся периодом медленного уменьшения. Такая картина типична для приливных устьев малых рек Арктической зоны РФ с наличием очень мелководного устьевого взморья [5].

Максимальная температура воды (13,8–14,6°C) в устье р. Карговки наблюдалась в полную воду приливного цикла, когда морские воды проходили мелководное устьевое взморье реки с обширной сильно нагретой приливной осушкой. Это характерно для подобных устьевых объектов в летний период [2].

В распределении солёности в полную воду приливного цикла отмечалось отсутствие его пространственного градиента на устьевом взморье реки при формировании резкого фронтального раздела на границе взморья с устьевым участком около станции 2к. Дальность проникновения морских вод в устье р. Карговки в летнюю межень по авторским наблюдениям достигает около 5 км.

Содержание взвешенных веществ в устье р. Карговки в период проведения полевых работ колебалось в диапазоне 47–626 мг/л. Подобный диапазон в целом характерен для макроприливных устьев рек Белого моря. Их максимум отмечался в начале фазы прилива, когда малые глубины водотока и

сильные приливные течения вызывают наиболее сильное взмучивание донных отложений. Зона повышенной мутности, или так называемая «мутевая пробка» маргинального фильтра [3], локализовалась в диапазоне солёности 13–18‰ и в пространственном отношении была приурочена к границе устьевому участку реки и ее устьевому взморью. Здесь необходимо заметить, что в устьях больших и средних рек «мутевая пробка» обычно располагается в начале зоны смешения речных и морских вод.

Таблица

Результаты полусуточной серии гидрологических наблюдений в придонном горизонте на станции 3к в устье р. Карговки в августе 2021 г.

№	Дата	Время	H , м	t , °C	S , ‰	V , °	$V_{абс}$, см/с	V_x , см/с
1	17.08	4:00	0,15	12,8	1,55	107	9,2	-6,0
2	17.08	5:00	0,12	12,6	1,41	173	7,1	-6,8
3	17.08	6:00	1,69	13,1	22,16	142	59,1	-56,9
4	17.08	7:00	2,96	13,6	22,72	144	31,3	-30,5
5	17.08	8:00	3,06	13,6	22,59	318	14,4	13,6
6	17.08	9:00	2,35	13,4	22,66	331	34,4	34,2
7	17.08	10:00	1,37	13,1	21,27	331	45,9	45,6
8	17.08	11:00	0,77	12,7	11,92	324	46,3	45,2
9	17.08	12:00	0,54	12,9	4,67	328	29,0	28,7
10	17.08	13:00	0,35	13,2	2,35	326	14,0	13,8
11	17.08	14:00	0,35	13,7	1,70	60	4,0	0,5
12	17.08	15:00	0,33	13,9	1,44	174	7,4	-7,1
13	17.08	16:00	0,30	14,2	1,29	204	14,7	-10,1
14	17.08	17:00	0,26	14,1	1,15	55	10,0	2,1
15	17.08	18:00	0,27	14,2	2,12	140	70,3	-67,2
16	17.08	19:00	1,96	15,0	22,79	142	43,5	-42,1
17	17.08	20:00	2,72	15,0	22,74	140	10,2	-9,7
18	17.08	21:00	2,40	15,0	22,71	322	23,2	22,4
19	17.08	22:00	1,54	14,8	22,69	326	39,9	39,2
20	17.08	23:00	0,86	14,4	12,40	327	47,4	46,8
21	18.08	0:00	0,57	14,0	7,82	332	31,0	30,9
22	18.08	1:00	0,46	13,5	3,76	329	21,0	20,8
23	18.08	2:00	0,38	13,1	2,08	270	5,3	2,0
24	18.08	3:00	0,32	12,7	1,52	97	11,3	-5,6
25	18.08	4:00	0,27	12,5	1,26	72	3,7	-0,3
26	18.08	5:00	0,15	10,7	0,10	334	7,4	7,4

Примечание: H – уровень воды, м; t – температура, °C; S – солёность, ‰; V – направление течения, °; $V_{абс}$ – абсолютная скорость течения, см/с; V_x – проекция скорости течения на ось водотока («+» – отливное течение, «-» – приливное течение).

Таким образом, можно предположить, что гидрологический режим устьев малых рек в южной части Мезенского залива зависит от геоморфологии и глубин их устьевых взморьев, а также специфики их взаимодействия с потоками, формируемыми динамикой вод эстуариев рек Мезень и Кулой. Изучение устьевых областей следует продолжить в последующие годы, что будет иметь значительное научно-фундаментальное и прикладное значение. Учитывая большую короткопериодную изменчивость гидрологических параметров в макроприливных устьях рек, инженерно-гидрометеорологические изыскания в них целесообразно проводить согласно рекомендациям, изложенным в работе [4].

Работа выполнена в рамках темы № 0128-2021-0006 «Современные и древние донные осадки и взвесь Мирового океана – геологическая летопись изменений среды и климата: рассеянное осадочное вещество и донные осадки морей России, Атлантического, Тихого и Северного Ледовитого океанов – литологические, геохимические и микропалеонтологические исследования; изучение загрязнений, палеообстановок и процессов в маргинальных фильтрах рек».

Список литературы

1. Бернштейн Л.Б. Приливные электростанции. М.: Энергоатомиздат, 1987. 296 с.
2. Мискевич И.В., Коробов В.Б., Мосеев Д.С. Специфика формирования маргинальных фильтров в приливных устьях рек арктических морей // Океанология. 2021. Т. 61. № 1. С. 141–146.
3. Исследования короткопериодной изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик устья реки Кянда в Онежском заливе Белого моря (28 июля–15 августа 2016 г.) / И.В. Мискевич, А.М. Алабян, В.Б. Коробов, Н.А. Демиденко, А.А. Попрядухин // Океанология. 2018. Т. 58. № 3. С. 369–373.
4. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
5. Мискевич И.В., Коробов В.Б., Алабян А.М. Специфика инженерно-экологических изысканий в приливных устьях малых рек западного сектора российской Арктики // Инженерные изыскания. 2018. Т. XII. № 3–4. С. 50–61.

I.V. Miskevich

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, szoiran@mail.ru

**HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE KARGOVKA RIVER
MOUTH IN THE MEZEN BAY OF THE WHITE SEA
IN THE SUMMER LOW WATER**

Abstract. The description of the hydrological characteristics of the mouth of the Kargovka River at the top of the Mezen Bay of the White Sea in the summer period according to the results of research in 2021 is given. The variability of the water level, temperature, salinity, and suspension content in the mixing zone of river and sea waters is considered. Its length in the summer is about 5 km. The maximum salinity at the mouth of the river at full water of the tidal cycle reached 21.5%, the range of variability of suspension concentrations was 47–626 mg/l. A significant decrease in the tide value was recorded at the mouth of the Kargovka River seashore, which is not observed at the entrance to the estuaries of the Kuloy and Mezen rivers. This can be explained by the presence of divergence of tidal water flows entering these estuaries.

Key words: White Sea; Mezen Bay; Kargovka River; estuary; tide; hydrology; variability.

Юхно А.В., Кулешов А.А.

Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, artem-ardene@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СМЕШЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДОВ ВОДЫ НА МАЛЫХ ВОДОТОКАХ

Аннотация. Измерение расходов воды на малых водотоках – одна из наиболее часто встречающихся задач при выполнении инженерно-гидрометеорологических изысканий, воднобалансовых исследованиях, гидрологическом мониторинге водных объектов. При этом точному измерению традиционными методами препятствуют сразу несколько неблагоприятных факторов. Большинство из них не актуально при применении метода смешения. В публикации кратко изложена основа метода, особенности его применения на малых водотоках, приведены результаты сравнительных измерений как по аналитическим материалам, так и по данным полевых натурных измерений авторов.

Ключевые слова: малые водотоки; метод смешения; измерение расхода воды; метод ионного паводка; инженерно-гидрометеорологические изыскания.

Введение

Если в сети Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) малые водотоки занимают лишь малую часть исследуемых водных объектов, то при производстве инженерно-гидрометеорологических изысканий (ИГМИ) при проектировании автомобильных дорог, трубопроводов и других линейных объектов они составляют подавляющее большинство. Доля работ на них, как правило, может достигать 90% от общего объема. В сети Росгидромета к категории малых рек (с площадями водосборов до 2000 км²) относятся 57% постов, с площадями водосборов менее 100 км² – менее 1,5%, наблюдения на ручьях во многих природных зонах фактически не ведутся. Также необходимость измерения расходов воды малых водотоков с высокой точностью возникает при воднобалансовых исследованиях и гидрологическом мониторинге водного режима объектов.

Ниже рассмотрены наиболее часто используемые методы, применяемые в практике ИГМИ в части измерения расходов воды на малых водотоках (расположены в порядке уменьшения частотности применения).

1. *Поплавковый метод.* Имеет существенные недостатки, а его применение неопытным гидрологом может привести к погрешностям более 100%. Основным источником погрешностей в этом методе является переход от поверхностных скоростей течения к средним по потоку. Это и другие ограничения метода подробно рассмотрены в [2].

2. *Измерение скоростей течения гидрометрической вертушкой и вычисление расхода воды методом «скорость – площадь».* Измерения вертушкой, прежде всего, ограничиваются габаритами лопастной части винта.

На ручьях малые глубины могут препятствовать его свободному вращению в потоке. В таких условиях корректное измерение с выведением вертушки на тот или иной горизонт по глубине потока невозможно. Эту проблему решает применение микровертушек, но они практически не представлены на отечественном рынке гидрометрических приборов и финансово затратны. Остальные особенности применения гидрометрических вертушек и их характеристики хорошо изучены и описаны в аналитическом труде [1].

3. *Измерение скоростей течения электромагнитным измерителем скорости потока и вычисление расхода воды методом «скорость – площадь».* Электромагнитные измерители скоростей водного потока, такие как «Посейдон-1» или Flow Tracker (фирма SonTek), хорошо проявляют себя в диапазоне малых скоростей, их габариты существенно меньше вертушек, тем не менее вариация измеряемых скоростей и, как следствие, расходов воды, довольно велика. Это является основным ограничением применения данного типа средств измерения наравне со сравнительно большей стоимостью относительно вертушек.

4. *Объемный метод.* Является наиболее точным из всех, однако сложности возникают на этапе поиска естественного водослива, к которому бы можно было без потерь приставить измерительную емкость. В природе встретить такой водослив довольно сложно. Даже в случае его нахождения не исключены «переливы» стока подповерхностным путем или же по стенке природного «водослива», величину которых измерить достоверно невозможно.

5. *Организация временных водосливов.* Трудоемкий и долгий процесс, который в условиях интенсивной полевой работы нерентабелен, метод больше подходит для использования на воднобалансовых станциях при ведении постоянного гидрологического мониторинга. Результаты измерений, полученных на водосливах, можно считать эталонными. При этом существуют и переносные водосливы, но их транспортировка и сложности установки также являются существенными недостатками.

В указанный перечень *метод смешения* не входит – как правило, в современной отечественной практике ИГМИ его не применяют. При этом он имеет целый ряд преимуществ, которые по достоинству оценены зарубежными коллегами, активно внедряющими метод в течение последних 70 лет.

Физическая сущность метода и методология

Метод ионного паводка заключается в измерении расхода воды путем оценки степени разбавления вводимого в поток раствора электролита с течением времени. Раствор электролита объемом W_1 и концентрацией S_1 одновременно простым вливанием вводится в поток с фоновой (естественной) концентрацией электролита S_0 в пусковом створе. Через некоторый промежуток времени t , раствор индикатора (соляная волна) должен быть отнесен на такое расстояние l , чтобы обеспечивалось его равномерное распределение по живому

сечению потока ω (как по глубине, так и ширине). Такой створ называется створом полного перемешивания. При прохождении соляной волны выполняется уравнение баланса массы индикатора, при этом концентрация вещества-индикатора S в потоке переменна:

$$(S_1 - S_0)W_1 = \iint_{\omega} (S - S_0) dl, d\omega. \quad (1)$$

Путь, проходимый индикатором, пропорционален скорости потока v :

$$dl = v dt. \quad (2)$$

В створе полного перемешивания можно пренебречь изменением концентрации по площади сечения, и тогда, подставляя выражение (2) в (1), можно получить:

$$(S_1 - S_0)W_1 = Q \int_t (S - (S - S_0)) dt. \quad (3)$$

Следовательно, расход воды Q будет равен:

$$Q = \frac{V_1(S_1 - S_0)}{\int_t (S - S_0) dt}. \quad (4)$$

Для сухого пуска массой индикатора в граммах m формула имеет вид:

$$Q = \frac{m}{\int_t (S - S_0) dt}. \quad (5)$$

В случае измерения электропроводности воды (ЕС) для определения степени разбавления электролита, вводимого в поток с фоновым значением электропроводности ЕС_ф, формула преобразуется и имеет конечный вид:

$$Q = \frac{W_1}{k \Delta t \sum_t (ЕС - ЕС_{\text{ф}}) dt}. \quad (6)$$

При этом для перехода от значений электропроводности к значениям концентрации электролита производится процедура калибровки, описанная в [3], в результате которой вычисляется переходной коэффициент k .

Наиболее точным, согласно [5], является способ постоянного пуска, при котором раствор вводится с постоянным расходом q , а измерение проводится в течение промежутка времени $\Delta t_{\text{равн}}$, необходимого для прихода системы в «равновесное» состояние (когда концентрация индикатора в створе смешения достигнет постоянных значений ЕС_{равн}). Расход воды в таком случае вычисляется по формуле:

$$Q = \frac{q}{k(ЕС_{\text{равн}} - ЕС_{\text{ф}})} \quad (7)$$

При этом устройство для подачи раствора в поток должно строго обеспечивать постоянство его расхода, а объем жидкости должен быть с высокой точностью оценен по достижении равновесного состояния. Основными условиями применимости метода является полное вертикальное и горизонтальное перемешивание индикатора по площади потока, превышение фоновой электропроводности хотя бы в 1,5 раза и объем вводимой соли не менее 1 кг на 1 предполагаемый м³/с потока. В качестве индикаторов в современной практике наиболее часто употребляются поваренная соль и флуоресцеин.

Обзор рынка приборов для измерения расхода воды методом ионного паводка

Современная приборная база для применения метода достаточно ограничена, приборы выпускают три зарубежные компании – Sommer (Австрия), MADD Technologies (Бельгия) и Fathom Scientific (Канада). Тем не менее существующих средств измерения достаточно для измерений при проведении инженерно-гидрометеорологических изысканий и для решения научных задач. Все они представляют собой полуавтоматические и автоматические измерительные системы, состоящие из отдельных датчиков и зондов электропроводности. Для нужд периодического мониторинга разработаны автоматизированные гидрологические комплексы. Характеристики существующих приборов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика современной приборной базы для измерения расходов воды методом смешения

Устройство	Измеряемая характеристика	ΔЕС, %	Стоимость, усл.ед. на 01.12.2021	Q , м ³ /с		$T_{\text{экспл}}$, °С	
				min	max	min	max
Автоматизированные гидрологические комплексы							
Fathom AutoSalt M5	EC → C _{NaCl}	< 1,0	6500	н.и.	< 300	–15	н.и.
Fathom QiQuac	EC → C _{NaCl}	< 1,0	5525	н.и.	н.и.	н.и.	н.и.
Полуавтоматические системы							
Sommer TQ-F	EC → C _{NaCl} (C _{Fluor})	1,0–2,0	15 400	нет	нет	0	+50
Sommer TQ-S	EC → C _{NaCl}	< 1,5	8400	нет	< 10	–20	+60
Madd Tech EasyFlow	EC → C _{NaCl}	< 1,0	2500	нет	< 50	0	+40

Примечание: $T_{\text{экспл}}$ – температура эксплуатации, °С; C_{NaCl} – концентрация хлорида натрия; C_{Fluor} – концентрация флуоресцеина или других красителей; н.и. – нет информации.

Стоит отметить, что применение двухпараметрических датчиков удельной электропроводности (УЭП) и температуры воды при измерении в «ручном» режиме (с дальнейшей лабораторной калибровкой и получением коэффициента k) является путем к оптимизации затрат. При этом погрешность измерения УЭП не должна превышать 5 мкСм/см [6]. Стоимость таких датчиков варьируется в пределах от 200–375 усл. ед. на 01.12.2021 с ограниченным числом записей и (или) необходимостью использовать дополнительный контроллер до 1500 усл. ед. на 01.12.2021 с функцией непрерывной записи во внутреннюю память большого числа данных. Примером такого датчика может служить внесенный в Государственный реестр средств измерений отечественный прибор МАРК-603 (ООО «ВЗОР»). Существуют на рынке также и автоматизированные зонды электропроводности, температуры и уровня воды, способные удаленно записывать и непрерывно передавать данные в режиме реального времени, их стоимость достигает 3400 усл. ед. на 01.12.2021.

Анализ публикаций по применению метода на малых водотоках

В современной научной литературе и публикациях можно найти достаточно подтверждений состоятельности метода на малых водотоках. Далее приводятся самые весомые из них. Так, в Канаде в период с 1995 по 2002 гг. на руч. Рассела (с площадью водосбора 4,5 км²) ежегодно производились измерения расходов воды методом смешения (по 20–30 измерений в год) [4]. При этом применялся как сухой, так и мгновенный пуск раствора. Среднее расхождение расходов воды в диапазоне от 0,255 до 22,600 м³/с, составило 2,7%, а полученная по результатам измерения кривая $Q = f(H)$ признана статистически надежной и однозначной.

Итальянский исследователь А. Tizioli [8] приводит объемное сравнение результатов измерения расходов воды способами смешения и гидрометрической вертушкой на малых и средних реках, которое тоже сводится к высокой эффективности методов смешения и получения с их помощью надежных кривых расходов воды. Результаты подтверждаются современными исследованиями G. Sappa, F. Ferranti [7].

В недавнем прошлом метод прошел успешное испытание в зимних условиях в Канаде [3] и в условиях зарастания русла при малых скоростях течения в Новой Зеландии [6].

Опыт полевых работ в летний сезон 2021 г.

В течение полевого сезона 2021 г. сотрудниками лаборатории гидрологических приборов Государственного гидрологического института были проведены испытания метода на двух малых водотоках. Первая серия измерений производилась на руч. Западный-1 (болотный массив Ламмин-Суо),

вторая – на ручье без названия (д. Новая Усть-Капша). Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты полевых сравнительных измерений расходов воды

Метод	Q , л/с	СКО	$\Delta_{\text{ср}} = Q_{\text{эт}} - Q_{\text{смеш}}$, %
Ручей без названия – д. Новая Усть-Капша, 01.10.2021 ($V_{\text{теч ср}} = 0,06$ м/с)			
Объемный метод	1,41	5,23	Эталон
Метод смешения (Hanna HI98195, мгновенный пуск)	1,38	12,0	+7,39 (1)
Метод смешения (EasyFlow, мгновенный пуск)	1,35	3,61	–4,22
Поплавковый метод	2,17	37,9	+53,9
ИСП-1М	1,22	5,39	–13,5
ИСВП «Посейдон-1»	2,25	13,7	+59,6
Ручей Западный-1 – болотный массив Ламмин-Суо, 26.08.2021 ($V_{\text{теч ср}} = 0,07$ м/с)			
Объемный метод	1,18	–	эталон
Метод смешения (EasyFlow, мгновенный пуск)	1,27	–	+7,23
Метод смешения (Hanna HI98195, мгновенный пуск)	1,23	5,20	+4,10
То же (Hanna HI98195, постоянный пуск)	1,97	–	+66,6 (2)

Примечание: СКО – среднеквадратическое отклонение, (1) – заиливание датчика, (2) – неточность определения объема пускового раствора по уровню воды в мерном сосуде.

Полученные результаты для столь малых значений расхода воды можно считать приемлемыми. Каждому из выбросов найдено логическое обоснование (заиливание датчика в случае (1), объясняющее высокое СКО, и неточность определения объема пускового раствора по уровню воды в мерном сосуде в (2)). Натурные эксперименты сотрудниками Государственного гидрологического института продолжатся для получения более детальных и научно-обоснованных выводов.

Выводы

В результате проделанной аналитической работы и полевых измерений к преимуществам метода смешения для измерения расхода воды на малых водотоках можно отнести следующие положения:

- 1) не интрузивен;
- 2) не требуется определять площадь водного сечения;
- 3) работает в широком диапазоне скоростей течения (0,05–3,00 м/с);
- 4) применим в условиях развитой турбулентности;
- 5) не требует больших финансовых затрат при использовании отдельных датчиков УЭП;

б) чувствительная часть датчика электропроводности или солености воды имеет сверхмалые габариты;

7) мертвые зоны скоростного поля потока не являются преградой.

Среди недостатков следует отметить:

1) относительно традиционных методов измерения метод более трудоемок, требует соблюдения многих условий;

2) увеличение погрешности измерения с уменьшением скорости течения, особенно в диапазоне до 0,1 м/с;

3) физически обоснованно, без применения красящих веществ, определить положения створа полного перемешивания практически невозможно;

4) увеличение погрешности при измерении расхода в зарастающих руслах;

5) сложность, связанная с заиливанием чувствительной части датчика при его позиционировании на дне потока в течение измерения.

Несмотря на то, что необходимость дальнейших экспериментов очевидна, уже сейчас метод смещения можно смело рассматривать как один из возможных вариантов для измерения расходов воды малых водотоков.

Список литературы

1. Клименко Д.Е. Развитие гидрометрических вертушек в России и за рубежом // Географический вестник. 2010. № 2(13). С. 64–76.
2. Мазур Г.С. Определение расходов воды речных потоков при минимуме полевых измерений // Известия Иркутского государственного университета. 2009. Т. 1. № 1. С. 93–106.
3. Clow D.W., Fleming A.C. Tracer gauge: an automated dye dilution gauging system for ice-affected streams // Water Resources Research. 2008. No. 44(12). P. 1–11.
4. Hudson R., Fraser J. Alternative methods of flow rating in small Coastal streams // Forest Research Extension Note. Vancouver Forest Region. 2002. ID EN-014. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.for.gov.bc.ca/rco/research/hydroreports/en014.pdf> (дата обращения: 15.11.2021).
5. Moore R.D. Introduction to Salt dilution gauging for streamflow measurement. Part 2: Constant-rate injection // Streamline Watershed Management Bulletin. 2004. Vol. 8. No. 1. P. 11–15.
6. Plew D.R., Hoyle J. Dilution gauging measurements of discharge in vegetated stream channels // Journal of Hydrology (New Zealand). 2017. Vol. 56. No. 1. P. 31–46.

7. Sappa G., Ferranti F. Validation of salt dilution method for discharge measurements in the upper valley of Aniene River (Central Italy) // Proceedings of the 13th International Conference on environment, ecosystems and development. Athens: WSEAS Press, 2015. P. 42–48.
8. Tizioli A. Experimental methods for river discharge measurements: comparison among tracers and current meter // Hydrological Sciences Journal. 2011. No. 66(7). P. 1314–1325.

A.V. Iukhno, A.A. Kuleshov

State Hydrological Institute, Saint Petersburg, artem-ardene@mail.ru

APPLICATION OF THE DILUTION METHOD FOR MEASURING WATER DISCHARGE OF SMALL WATERCOURSES

Abstract. Measurement of water discharge in small watercourses is one of the most common tasks when performing engineering-hydrometeorological surveys, water balance studies, and hydrological monitoring of water bodies. At the same time, accurate measurement using traditional methods is hindered by several unfavorable factors at once. Most of these limitations are not relevant when using the dilution method. The paper summarizes the essence of the method, the features of its application on small watercourses, and also presents the materials of comparative measurements both from analytical materials and from the data of field full-scale measurements, performed by the authors of the article.

Key words: small watercourses; dilution method; water discharge measurements; pulse dilution method; engineering-hydrometeorological surveys.

Иглин С.М.

Архангельский филиал ФГУП «Росморпорт», г. Архангельск, iglin.sm@bk.ru

НАБЛЮДЕНИЯ ЗА УРОВНЕМ МОРЯ НА УЧАСТКЕ ГЛАВНОГО СУДОВОГО ХОДА В УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ р. СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ В ЛЕТНЮЮ НАВИГАЦИЮ 2021 г.

Аннотация. Архангельским филиалом ФГУП «Росморпорт» в летнюю навигацию 2021 г. выполнена установка датчиков уровня моря в устьевой области р. Северной Двины на участке судового хода в морском порту Архангельск. Получены ежечасные уровни воды на пяти пунктах следования судов с предельной осадкой в порту Архангельск. Максимально наблюдаемый уровень составил 211 см на Лапоминском канале. Установлено, что время наступления прилива между Мудьюгским каналом и портом Экономия составляет 1–2 ч. Вычислены гармонические постоянные приливов для порта Экономия.

Ключевые слова: р. Северная Двина; устьевая область; уровни; наивысший теоретический уровень; гармонические постоянные.

Введение

Обеспечение безопасности мореплавания – одна из ключевых задач эксплуатации морских портов и судоходных морских каналов. Проведение работ по актуализации сведений о глубинах и уровнях моря – важная составляющая этого процесса, особенно значимая для морского порта Архангельск, располагающегося в устьевой области р. Северной Двины (рис. 1), в котором приливные и нагонные колебания уровня могут достигать нескольких метров.

Колебания высот уровней моря в исследуемом районе обусловлены главным образом приливо-отливными явлениями, стоком р. Северной Двины, сгонно-нагонными явлениями, а также резким изменением атмосферного давления [1].

За нуль глубин в морском порту Архангельск принят «Нуль порта 1881 г.», – 1,083 м в Балтийской системе высот 1977 г. (БС). Основным фактором, влияющим на уровенный режим устьевое участка реки, является сток речной воды. Средний многолетний уровень воды в вершине устьевой области (гидрологический пост «Усть-Пинега») равен 318 см над «0» 1881 г., наибольший из средних годовых – 423 см, наименьший – 230 см. Средний многолетний уровень воды в вершине дельты составляет 100 см над «0» 1881 г. Средний перепад уровня воды между вершиной дельты и устьевым взморьем составляет около 0,3 м [4]. Средний уровень приемного водоема – Двинского залива – 68 см над «0» 1881 г. (–0,30 м БС). Средние годовые значения уровня на взморье изменяются в диапазоне от 61 до 84 см над «0» 1881 г. [1, 5, 7].

Суда с предельной осадкой проходят по участку от Мудьюгского канала в Двинском заливе до порта Экономия в Маймаксанской протоке. В связи с

этим Архангельским филиалом ФГУП «Росморпорт» были установлены датчики уровня моря для актуализации сведений об уровненом режиме в районе обеспечения безопасности мореплавания в навигацию 2021 г.

Рис. 1. Карта-схема расположения датчиков уровня моря в порту Архангельск

Материалы и методы

В районе порта Экономия и о-ва Мудьюгский ((1) и (4) на рис. 1) были установлены стационарные уровненые посты (УП) на базе самописца уровня моря Valeport TideMaster. Высотная привязка УП в районе порта Экономии к БС выполнена нивелированием IV класса, а в районе о-ва Мудьюгский – спутниковым геодезическим нивелированием. Датчики уровня моря ((2), (3), (5) на рис. 1) представлены погружными мареографами НОВО U20L. Точность определения уровня воды составила 1 см.

Частота записи данных составляла 10 мин. Для дальнейшей обработки уровней было выполнено удаление выбросов и осреднение за 1 ч. Отсчет

времени велся в Гринвичском часовом поясе (GMT 0). Длительность ведущихся измерений уровня воды представлена в табл. 1.

Таблица 1
Временные промежутки измерения уровня воды в порту Архангельск

Местоположение*	Временной промежуток	Длительность
Порт Экономия (1)	30.06.–10.10.2021	Три 30-суточных серии
Лапоминский канал (2)	02.08.–11.10.2021	Две 30-суточных серии
Залив Сухое море (3)	02.08.–13.10.2021	Две 30-суточных серии
Остров Мудьюгский (4)	29.07.–13.10.2021	Две 30-суточных серии
Мудьюгский канал (5)	05.08.–13.10.2021	Две 30-суточных серии

Примечание: * местоположение пунктов см. на рис. 1.

Передача высотной отметки на мареографы (2), (3), (5) (см. рис. 1) проводилась путем сопоставления высот полных и малых вод по методике, описанной в [6]. Коэффициенты корреляции при этом не опускались ниже 0,97. Для расчета гармонических постоянных приливов уровенные наблюдения были сформированы в 30-суточные ежечасные серии наблюдений. Расчет гармонических постоянных прилива, а также предвычисление высот уровня выполнены по методике, описанной в [6].

Результаты

Данные о минимальном, среднем и максимальном наблюденном уровне воды представлены в табл. 2.

Таблица 2
Минимальные, максимальные и средние уровни воды за периоды наблюдений
в порту Архангельск

Параметр	Порт Экономия (1)	Лапоминский канал (2)	Залив Сухое море (3)	Остров Мудьюгский (4)	Мудьюгский канал (5)
Минимальный уровень, см	7	21	22	21	13
Максимальный уровень, см	202	211	208	195	202
Средний уровень, см	88	101	97	94	95

На рис. 2 представлены наблюдения уровня воды за 10.08.2021 в точках установки уровенных постов. Время задержки прилива в порту Экономия относительно Мудьюгского канала составляет от 1–2 ч.

Рис. 2. Наблюдаемые уровни воды от нуля порта (см) за 10.08.2021

Максимально зафиксированная разница в уровнях воды между Мудьюгским каналом и портом Экономия с учетом временного смещения составляет 35 см.

Рассчитанные гармонические постоянные прилива по УП в порту Экономия представлены в табл. 3.

Таблица 3
Рассчитанные гармонические постоянные прилива за одну 30-суточную серию (01.07.–30.07.2021) наблюдений за уровнем моря на УП порта Экономия

Параметр	M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1	Q1	M4	MS4	M6
H , см	42,1	8,8	6,9	2,4	4,6	1,6	1,5	0,3	6,1	2,9	4,5
$g^{\circ}_{\text{мер. } 45^{\circ}}$	79,1	167,3	163,0	160,2	79,0	95,0	80,2	103,0	266,6	327,4	287,9

Примечание: $g^{\circ}_{\text{мер. } 45^{\circ}}$ – фаза прилива, M2 – главная лунная полусуточная волна, S2 – главная солнечная полусуточная волна, N2 – большая лунная эллиптическая волна, K2 – лунно-солнечная деклинационная волна, K1 – лунно-солнечная деклинационная суточная волна, O1 – главная лунная деклинационная суточная волна, P1 – главная солнечная деклинационная суточная волна, Q1 – большая лунная эллиптическая суточная волна, M4 – лунная мелководная волна, MS4 – лунно-солнечная мелководная волна, M6 – лунная мелководная волна [6].

Расчитанные гармонические постоянные позволят вычислить наинизший теоретический уровень для изучения возможностей оптимизации судоходства с предельными осадками.

По результатам сравнения предвычисленных и наблюдаемых уровней можно судить о влиянии паводковых вод (в весенний период с апреля по июнь), наличии сгонно-нагонных явлений. Полученные материалы наблюдений позволят не только улучшить разрабатываемые гидродинамические модели циркуляции морских и речных вод, но и более точно интерпретировать экологическое состояния устьевой области р. Северной Двины при проведении ремонтных дноуглубительных работ на акватории судоходного канала [2, 3].

Рис. 3. Предвычисленные уровни воды за 01.07.2021 на УП в порту Экономия по гармоническим постоянным (см. табл. 3.)

Список литературы

1. Гидрология устьевой области Северной Двины / Под ред. М.И. Зотина, В.Н. Михайлова. М.: Гидрометеиздат, 1965. 376 с.
2. Иглин С.М., Котова Е.И., Коробов В.Б. Геоэкологическая оценка состояния вод и донных грунтов при проведении ремонтных работ в порту Архангельск // Естественные и технические науки. 2020. № 5(143). С. 76–87.

3. Котова Е.И., Коробов В.Б., Шевченко В.П., Иглин С.М. Экологическая ситуация в устьевой области реки Северной Двины (Белое море) // Успехи современного естествознания. 2020. № 5. С. 121–129. <https://doi.org/10.17513/use.37402>.
4. Ляхницкий В.Е. Изыскания в устьях р. Северной Двины, произведенные в 1915–1916 годах для составления проекта авонпорта у гор. Архангельска. Петроград: Типография Министерства путей сообщения (товарищества И.Н. Кушнерев и К°), 1916. 252 с.
5. Макарова Т.А. Сток и уровни воды в устьевой области Северной Двины и их возможные изменения // Труды ГОИН. 1984. Вып. 172. С. 110–117.
6. Правила гидрографической службы № 35. Приведение глубин к уровню (ПГС № 35). Управление начальника гидрографической службы военно-морского флота / Под ред. В.В. Зеленко. Ленинград: Картфабрика ВМФ, 1956. 193 с.
7. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3. Северный край. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 662 с.

S.M. Iglin

Arkhangelsk branch of Rosmorport, Arkhangelsk, iglin.sm@bk.ru

OBSERVATIONS OF THE WATER LEVEL IN THE AREA OF THE NAVIGABLE CHANNEL IN THE MOUTH OF THE NORTHERN DVINA RIVER IN THE SUMMER NAVIGATION OF 2021

Abstract. In the summer navigation of 2021, the Arkhangelsk branch of Rosmorport installed sea level sensors in the mouth area of the Northern Dvina River at the section of the navigable way in the seaport of Arkhangelsk. Hourly water levels were obtained at five points of vessel traffic with maximum draft in the port of Arkhangelsk. The maximum observed level was 211 cm at the Lapominsky Canal. It was found that the time of the onset of the tide between the Mudyug Canal and the port of Ekonomiya is 1–2 hours. Harmonic constants of tides for the port are calculated.

Key words: Northern Dvina River; mouth area; levels; the highest theoretical level; harmonic constants.

Лебедева С.В.^{1,2}, Льюменс М.³

¹Северное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Архангельск,
hydrosima@gmail.com

²Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, г. Москва

³ООО «Экхайдн», г. Москва

РАСЧЕТЫ СКОРОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ В УСТЬЕ р. СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОХОДСТВА

Аннотация. Задача определения скоростей течения в устье р. Северной Двины актуальна для обслуживания морского порта Архангельск, причалы которого значительно разнесены в пространстве. Измерение и расчет скоростей течения здесь осложняются особенностями гидродинамического режима, который формируется под воздействием речного стока, приливов, ветровых нагонов и сгонов со стороны Белого моря. Наиболее опасными для проводки судов местами являются пересечения судового хода с разводными мостами. В работе сопоставлены расчеты скоростей течения по методике, используемой в ФГБУ «Северное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» с 1990 г., современные данные измерений и результаты двумерного гидродинамического моделирования.

Ключевые слова: устьевая область; скорости течения; гидродинамическое моделирование; приливы; нагоны; судоходство; р. Северная Двина; порт Архангельск.

Большие скорости течения р. Северной Двины в акватории порта Архангельск затрудняют судоходство, буксировку плотов, лимитируют водолазные работы. Сведения о течениях становятся необходимы также при разборе аварийных случаев и происшествий.

Гидрологический режим устьевой области р. Северной Двины, где расположены причалы порта, сложен и формируется под воздействием целого ряда факторов: речного стока, приливов, ветровых сгонов и нагонов [3].

Традиционно трудные участки для судоходства – это проход под двумя разводными мостами – Краснофлотским и Северодвинским (рис. 1). Наибольшие скорости течения в этих районах наблюдаются в период весеннего половодья и дождевых паводков, когда устанавливается односторонний режим течений, а речной сток преобладает среди факторов, влияющих на динамику потока. При этом приливо-отливные и сгонно-нагонные явления дополнительно сказываются на увеличении и снижении величин скоростей течения.

8 мая 1989 г. у строящихся опор Краснофлотского моста произошла авария. Теплоход «Спартак» под воздействием сильного бокового течения навалился левым бортом на бетонную опору, получил пробоину и затонул в течение 7–10 мин. Два человека из 25, находившихся на судне; погибли [4, 5].

После этого случая в отделе речных и морских прогнозов ФГБУ «Северное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (далее – ФГБУ «Северное УГМС») была разработана методика расчета скоростей течения («Отчет об оперативно-методической работе “Анализ

течений в Архангельском порту”», 1990 г., исполнитель В.П. Попов). Она основана на подробном анализе ежемесячных рейдовых наблюдений за скоростями течения в Корабельном рукаве дельты напротив гидрологического поста (г.п.) Соломбала вблизи фарватера в период с 1970 по 1987 гг. В анализ вошли данные о скорости в так называемом верхнем навигационном слое потока: от 0 до 5 м глубины. Не рассматривались измерения, проведенные в ситуациях сгона или нагона, а также при скоростях ветра более 10 м/с, чтобы избежать слишком сильного разброса точек на графиках связи. Методика позволяет по номограммам определить максимальную и минимальную за приливный цикл скорости течения в зависимости от уровня воды в вершине устьевой области (характеризующего, по сути, сток реки) и месячной фазы прилива: сизигия, квадратура или промежуток. Проверочные расчеты скорости течения, выполненные на основе независимого материала, имели оправдываемость 90% при допустимой ошибке 0,2 м/с (согласно «Отчет об оперативно-методической работе...»). Номограммы были разработаны также и для определения скорости течения на каждый час приливного цикла по водным часам.

Рис. 1. Рассматриваемый участок устьевой области р. Северной Двины и створы измерений скоростей течения (МГП-2 – морской гидрологический пост 2-го разряда)

Разработанные таким образом статистические зависимости стали регулярно применяться для оперативных расчетов скоростей течения перед Краснофлотским и железнодорожным (Северодвинским) мостами, а также в

ряде других точек дельты р. Северной Двины по запросам портовых служб. Несмотря на проведенные в последующие годы дополнительные измерения скоростей течения, методика, разработанная в 1990 г., используется до сих пор в первоначальном виде.

Альтернативным способом расчета скоростей течения в водном объекте со сложным гидродинамическим режимом является численная гидродинамическая модель. Используемая двумерная гидродинамическая модель устьевое участка р. Северной Двины была разработана на базе программного комплекса Stream_2D [1, 2]. На устьевой участок реки (135 км длиной) построена нерегулярная гибридная расчетная сетка, состоящая из треугольников на суше и четырехугольников в русле. Всего в сетке около 190 тыс. элементов, линейные размеры которых варьируют от 10 до 300 м. В Stream_2D дискретизация двумерных уравнений Сен-Венана производится по явной схеме методом распада разрыва.

Измерения скоростей течения были выполнены акустическим доплеровским профилографом (acoustic Doppler current profiler – ADCP) River Ray. Они проводились на лодке в поперечном створе по всей ширине реки с периодичностью один раз в 30 мин или в 1 ч в зависимости от фазы приливного цикла. Длительность измерений была такой, чтобы зафиксировать максимальную скорость, когда стоковое и отливное течения складываются, и минимальную скорость, когда стоковое течения подпирается приливом. Измерения в створе на 240 м выше Северодвинского моста были выполнены 6 мая 2021 г. при расходе воды (за предыдущие сутки в вершине устьевой области) около $11400 \text{ м}^3/\text{с}$, в створе на 350 м выше Краснофлотского моста – 24 мая 2021 г. при расходе воды около $8800 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для анализа скоростей течения значения мгновенных скоростей в ячейках были осреднены по глубине в верхнем 5-метровом слое (навигационном) без учета поверхностного (0–0,3 м) слоя, в котором ADCP не измеряет скорости течения. По ширине русла данные были осреднены за каждые 5 м длины пути лодки с прибором по створу.

По результатам измерений в створе выше Северодвинского моста у г.п. Смольный Буян 6 мая 2021 г. расход воды изменялся от 10600 до $12800 \text{ м}^3/\text{с}$ в течение приливного цикла. Величина прилива при этом составила 27 см. Средняя скорость в поперечном сечении изменялась от 0,80 до 1,00 м/с, максимальная скорость в навигационном слое составила от 1,02 м/с во время прилива до 1,26 м/с во время отлива (рис. 2, а).

По результатам измерений в створе выше Краснофлотского моста (левый Бакарицкий рукав р. Северной Двины) 24 мая 2021 г. на спаде половодья расход воды изменялся от 5300 до $2900 \text{ м}^3/\text{с}$ в течение приливного цикла. Величина прилива по данным г.п. Смольный Буян при этом составила 64 см. Средняя скорость в поперечном сечении изменялась от 0,65 до 0,32 м/с, максимальная скорость в навигационном слое составила от 1,02 м/с во время отлива до 0,53 м/с во время прилива (рис. 2, б).

Расчетные максимальные и минимальные скорости течения были взяты с соответствующей номограммы (согласно «Отчет об оперативно-методической работе...»). 6 мая 2021 г. прилив соответствовал условиям квадратуры, уровень воды по г.п. Усть-Пинега за предыдущие сутки составлял 331 см, и в этих условиях максимальная за приливный цикл расчетная скорость для района Северодвинского моста достигала 1,34 м/с, минимальная – 0,88 м/с. 24 мая 2021 г. прилив в дельте р. Северной Двины соответствовал условиям промежутка между квадратурой и сизигией, уровень воды по г.п. Усть-Пинега за предыдущие сутки составил 246 см, и в этих условиях максимальная за приливный цикл расчетная скорость для района Краснофлотского моста достигала 1,16 м/с, минимальная – 0,45 м/с.

Рис. 2. Характеристики потока в створах: а – выше Северодвинского моста 6 мая 2021 г., б – выше Краснофлотского моста 24 мая 2021 г. Обозначения: 1 – измеренные, 2 – рассчитанные по методике В.П. Попова, 3 – смоделированные максимальные скорости течения; 4 – наблюдаемый уровень воды на г.п. Смольный Буян

Разница между рассчитанными и измеренными значениями максимальных в створе и за приливный цикл скоростей течения составила от 8 до 14 см/с (рис. 2, а, б). Для обоих створов максимальная скорость течения оказалась завышена расчетной методикой, а минимальная – занижена. Расчет скоростей течения на каждый час приливного цикла показал значения, отличающиеся от измеренных не более, чем на 0,2 м/с, как и утверждается в описании методики, т.е. в пределах условий оправдываемости (см. рис. 2).

По результатам моделирования максимальные скорости течения в створе у Северодвинского моста в рассматриваемый приливный цикл 6 мая 2021 г. изменяются от 1,25 до 1,46 м/с. Смоделированные скорости течения имеют систематический сдвиг по сравнению с измеренными на 0,20–0,25 м/с (см. рис. 2, а).

В створе у Краснофлотского моста в рассматриваемый приливный цикл 24 мая 2021 г. максимальные в створе скорости течения изменяются от 0,68 до 0,99 м/с (см. рис. 2, б). В этом случае систематического сдвига нет, а различия с максимальными измеренными скоростями течения от 0,10 до 0,17 м/с.

Выводы

Полученные результаты не позволяют сделать обобщающих выводов о качестве работы расчетной методики 1990 г. в современных гидрологических условиях, для таких оценок нужно гораздо большее количество измерений и наблюдений. Принятая методика в большей степени подтверждена многолетней практикой передачи расчетных сведений в обслуживающие порт службы.

По сопоставлению модели и измерений видно, что требуется отладка участков модели непосредственно в соответствии с условиями решаемой задачи. Необходимы проработка и добавление в модель рукава Исакогорка, который впадает слева сразу выше Краснофлотского моста и в текущей версии не учитывается.

Неоспоримые преимущества моделирования – пространственный охват результатов расчетов, которые помогают рассмотреть всю акваторию порта. По результатам моделирования видна изменчивость в пространстве максимальных за приливный цикл скоростей течения и пространственное расположение наиболее опасных с этой точки зрения участков. Видно, что рейдовая вертикаль, по данным которой в 1990 г. разрабатывалась методика, находится в зоне больших скоростей течения, чем оба рассмотренных моста, хотя в методике ФГБУ «Северное УГМС» принято, что течения на рейдовой вертикали в Соломбале соответствуют также и району Краснофлотского моста. Измерения профилографом и гидродинамическое моделирование позволяют перейти от вынужденного статистического анализа величин скоростей течения в отдельных точках сложной устьевой области к рассмотрению физики и гидродинамики течений.

Список литературы

1. Лебедева С.В. Перспективы внедрения гидродинамического моделирования в практику оперативных расчетов и прогнозов уровней воды и скоростей течения в устьевой области Северной Двины // Четвертые Виноградовские чтения, Гидрология от познания к мировоззрению: сборник докладов Международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова. СПб.: ВВМ, 2020. С. 111–116.
2. Лебедева С.В., Алабян А.М., Крыленко И.Н., Федорова Т.А. Наводнения в устье Северной Двины и их моделирование // ГеоРиск. 2015. № 1. С. 18–25.
3. Панченко Е.Д., Льюменс М., Лебедева С.В. Изменчивость скоростного поля потока в течение приливного цикла в устьях крупных рек бассейна Белого моря // Сборник трудов III Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». СПб.: Химиздат, 2019. С. 678–682.
4. Гибель «Спартака»: в 1989 году в Архангельске случилась катастрофа, которую пророчили некоторые специалисты. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dvina29.ru/gibel-spartaka-v-1989-godu-v-arhangelske-sluchilas-katastrofa-kotoruju-prorochili-nekotorye-specialisty/> (дата обращения: 15.03.2021).
5. Столкновения с мостами. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.morvesti.ru/themes/1693/71176/> (дата обращения: 15.03.2021).

S.V. Lebedeva^{1,2}, M. Leummens³

¹Northern Agency for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Arkhangelsk, hydrosima@gmail.com

²Zubov State Oceanographic Institute, Moscow

³Echyden LLC, Moscow

FLOW VELOCITIES ESTIMATION FOR THE NORTHERN DVINA RIVER MOUTH TO PROVIDE SAFE NAVIGATION

Abstract. Flow velocities estimation for the mouth of the Northern Dvina River is relevant for servicing the seaport of Arkhangelsk. Terminals of the seaport are spaced along the large area of the delta and near-delta river section. Flow velocities measurement and estimation are complicated by a hydrodynamic regime of the tidal river mouth. The points of crossings the passage and bridges: Severodvinsky and Krasnoflotsky, are dangerous for ships. The article verifies the technique for flow velocity estimation, used in the Northern Agency for Hydrometeorology and Environmental Monitoring since 1990, and 2D hydrodynamic modeling on the basis of actual field measurements.
Key words: river mouth area; flow velocities; hydrodynamic modeling; tides; wind surges; navigation; Northern Dvina River; port of Arkhangelsk.

Виноградов Р.А., Андреев О.М., Драбенко Д.В., Скутин А.А.

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, vinra@aari.ru

ИНЖЕНЕРНО-ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ С УЧЕТОМ АККУМУЛЯЦИИ ЛЕДЯНОЙ КАШИ В АРКТИЧЕСКИХ ПОРТАХ

Аннотация. Рассмотрены особенности инженерно-гидрометеорологических изысканий в условиях накопления ледяной каши на акватории порта. Показаны сложности проведения работ в зоне накопления ледяной каши. Даны предварительные рекомендации по проведению полевых работ. Показана значимость лабораторного и математического моделирования при изучении ледяной каши.

Ключевые слова: ледяная каша; инженерно-гидрометеорологические изыскания; ледовая навигация; математическое моделирование.

Согласно отечественной номенклатуре морских льдов [4], ледяная каша (brash ice) относится к формам льда и определяется как «скопление плавучего льда, состоящее из обломков не более 2 м в поперечнике, образовавшихся в результате разрушения других форм льда». Аналогичное определение содержится также в международной номенклатуре и в других источниках [1, 3].

Негативное влияние ледяной каши на судоходство отмечалось во все времена [2, 6]. Причем при накоплении слоя ледяной каши значительной толщины движение даже достаточно мощных современных судов может быть затруднено или полностью заблокировано. Например, для судов класса Yamalmax определена следующая ледопроездимость в ровном льду: до 1,5 м при движении носом и до 2,1 м – кормой [7]. Однако возможность движения столь мощного судна в ледяной каше ограничивают (по расчету) слоем около 4 м. Для менее мощных судов ситуация еще сложнее.

Накопление ледяной каши на акватории, в условиях ограничения перемещения ледяного покрова (припай, частично изолированный бассейн и др.), происходит под воздействием регулярного судоходства и отрицательной температуры воздуха вследствие многократного повторения цикла «взлом – смерзание – взлом». По сути процесса, чем чаще лед взламывается проходящими судами и чем ниже температура воздуха, тем быстрее будет накапливаться ледяная каша. Естественно, что это значительно упрощенная схема. Механизм образования и накопления каши зависит от многих факторов, которые частично будут рассмотрены ниже.

В замкнутой акватории порта, когда на ограниченном пространстве наблюдается достаточно интенсивный судовый трафик, в суровых зимних условиях слой ледяной каши может в течение нескольких месяцев, а то и недель, достичь критических значений в несколько метров. Если абстрагироваться от ледопроездимости судов, то в пределе слой каши может достичь дна. Кроме затруднения для движения судов, ледяная каша способна

создать и много других сложностей для различных работ на акватории порта. Ввиду своего ускоренного промерзания скопление ледяной каши способствует обмерзанию причальных стенок, палов и других конструкций, выступающих из воды, с образованием «ледяной шубы». При проведении швартовных операций ликвидация подобных ледяных наростов требует дополнительных трудозатрат. В практике работы арктических портов отмечались случаи, когда за время выгрузки суда вмерзали в массив ледяной каши у стенки причала. Бороться приходилось, применяя термические и химические методы. Например, с внеплановым задействованием передвижных парогенераторных установок, запасов соли и т.д. В частности, это одна из причин необходимости максимального очищения от ледяной каши пространства между причалом и бортом судна.

Затрудняет ледяная каша и проведение изыскательских работ на акватории действующего порта, например, под задачи строительства нового причала или уточнения заносимости района порта. Инженерно-гидрометеорологические изыскания (ИГМИ) в зимний период подразумевают измерения гидрологических характеристик, как в ручном режиме, так и с помощью автономных приборов. Проведение подобных работ со льда давно отработано и не представляет особой сложности. В некотором смысле их выполнение зимой даже легче, чем летом с воды. Однако при наличии в районе исследований подо льдом ледяной каши существенно затрудняются даже простые операции: вертикальное зондирование или измерение глубины места. Если слой каши составляет 0,5–1,0 м, то приборы или лот часто невозможно опустить под действием только силы тяжести. Их приходится проталкивать, т.к. куски льда из-за своей плавучести быстро заполняют лунку, а их массив способен выдержать вес прибора без заметного притапливания. В итоге трудоемкость и продолжительность ручных измерений может значительно возрасть.

Ледяная каша в отличие от припая обладает подвижностью в горизонтальной плоскости. Под действием ветра и течений она может перемещаться по акватории и в определенных случаях проникать под ледяной покров. Причем в зависимости от скорости потока воды и параметров каши она может распространяться на достаточно большие расстояния подо льдом. В результате, если с припая в лунку при отсутствии ледяной каши были установлены автономные приборы (доплеровский измеритель течений или иное), то со временем их датчики могут быть изолированы от водной толщи слоем перемещающейся каши.

Подвижность ледяной каши затрудняет также перемещение по акватории до места проведения измерений. Как уже указывалось, судно может просто не пройти в толстом слое каши. Если же при небольшой толщине слоя судно способно передвигаться, то возникает угроза блокировки доступа к забортным устройствам, типа «ледовых ящиков» и др. [5]. Перемещение людей пешком

или наземными средствами по ледяной каше обычно невозможно или, при промерзании верхнего слоя, небезопасно.

Из сказанного выше следует, что ледяная каша при проведении ИГМИ требует весьма внимательного изучения наравне с остальными гидрометеорологическими параметрами. Причем это необходимо как для обеспечения эффективности и безопасности самих изыскательских работ, так и с точки зрения получения характеристик, требуемых для нормального функционирования объекта, под который проводятся изыскания. Это изучение включает стандартные этапы проведения ИГМИ, т.е. сбор и анализ архивной информации, полевые работы, лабораторное и математическое моделирование.

Сбор и анализ архивной информации

Поскольку процесс накопления ледяной каши зависит как от природных (гидрометеорологических) факторов, так и от характеристик судоходства, то на данном этапе требуется сбор и анализ обоих видов информации. К гидрометеорологическим параметрам относятся в первую очередь:

- сведения о ледовых условиях (сроки ледовых фаз, продолжительность ледового сезона, характерные формы льда и т.д.);
- метеоинформация (температура воздуха, ветер, осадки, облачность и др.);
- гидрологические данные (TS-характеристики, параметры динамики вод).

Перечисленный стандартный набор гидрометеорологических параметров, который необходим и для подготовки к проведению полевых ИГМИ, и для последующей работы на объекте (проектированию, строительству, реконструкции и т.д.). Естественно, что крайне важными являются архивные данные по характеристикам ледяной каши в районе ИГМИ, если они, конечно, обнаруживаются на этом этапе.

К технической информации о судоходстве относятся:

- тактико-технические характеристики судов (в первую очередь интересуют габариты судов и их ледопроходимость, необходимые для определения ширины единичного взлома льда – параметра, влияющего на накопление каши);
- сведения о судовом трафике (с разделением как минимум по сезонам);
- характер движения судов в порту (существующие или планируемые схемы перемещения судов и организация судопотоков).

Два последних пункта будут определять частоту взлома льда на том или ином участке акватории порта. Очень важно их анализировать в комплексе, поскольку данные только о количестве судозаходов в порт за неделю, месяц или сезон не дают полной картины. Например, при равномерном распределении судов во времени частота взлома будет в два раза чаще, чем при организации того же количества судов в равномерный поток караванов по два судна в каждом. Схема же движения важна для определения не средней по порту, а

частной нагрузки на конкретный участок акватории. Например, к одному причалу планируется подход в два раза больше судов, чем к другому. Соответственно и лед по пути следования к первому причалу будет взламываться в два раза чаще, чем ко второму. Следовательно, при прочих равных условиях (погодных, характеристиках судов и др.) накопление ледяной каши на этих участках будет происходить с разной интенсивностью.

В заключении рассмотрения технической информации необходимо упомянуть о системах контроля ледообразования. Это технический элемент оснащения порта, который предназначен для регулирования скорости роста льда или его перераспределения на акватории. Последнее достигается применением потокогенераторов, когда искусственно создаются течения, способные смещать скопления льда (каши) в заданном направлении. Контролировать скорость роста льда или накопления/промерзания ледяной каши возможно путем изменения термического режима акватории. При наличии достаточного запаса тепла во внутренних водах логичным будет применение барботажных установок. Если запас тепла отсутствует, то может быть задействован внешний источник, например, сброс теплых вод от соседнего предприятия. Подобные системы контроля ледообразования сами могут являться объектами, под которые проводятся ИГМИ, или они планируются для обеспечения работы иного объекта изысканий (причала, канала, батопорта и др.).

Полевые работы

При проведении полевых ИГМИ в зимний период в общем случае следует избегать мест скопления ледяной каши, т.к. она, как было указано выше, будет затруднять проведение измерений. В случае, если все же необходимо проведение отдельных видов наблюдений на участке с кашей, на основе некоторого опыта, можно сформулировать следующие рекомендации:

- в случае проведения работ с борта судна возможно создание небольшой зоны разрежения или даже открытой воды с подветренного борта при смещении судна относительно каши (однако, если такое смещение создается движителями судна, то возникает опасность потери / повреждения приборов из-за их попадания в винты и т.п.);

- в дополнение к первому пункту необходимо отметить, что определение с борта судна характеристик ледяной каши контактными методами практически невозможно, т.к. судно (корпусом и движителями) будет вносить изменения в измеряемую среду, т.е. в массив каши;

- при проведении работ «со льда» необходимо применять повышенные требования к обеспечению безопасности исполнителей (обязательны спасательные жилеты, страховочный трос, средства оказания первой помощи (вплоть до экстренной эвакуации со льда) и т.д.);

- перемещение по поверхности ледяной каши и проведение измерений с нее возможны при замерзании верхнего слоя каши и достижении им грузоподъемности, достаточной для стоянки одного человека со снаряжением;
- при отсутствии смерзшегося слоя или его недостаточной прочности, возможно использование в качестве опоры легких и достаточно прочных листовых материалов (экструдированного пенополистирола, пенопласта повышенной прочности и т.п.), которые могут служить дополнительным элементом плавучести в случае проваливания под лед;
- при необходимости опустить под слой каши какой-либо прибор теоретически это возможно сделать путем создания шахты, защищенной от каши, подобно колодцу с обсадной трубой, выведенной глубже нижней границы ледяной каши (естественно, что прибор должен быть соизмерим с обсадной трубой);
- при умеренных глубинах для определения глубины места можно использовать наращиваемые по длине шнеки;
- определение толщины слоя каши возможно посредством механического бурения, однако более точные данные следует ожидать при применении термобурения (не водяного);
- эффективное применение эхолокации маловероятно из-за отсутствия четких границ сред/слоев;
- в литературе приводятся описания специальных шугомерных реек (в т.ч. патентованных), однако не встречаются отзывы об их применении (опыт использования авторской рейки можно признать положительным только частично);
- применение подводной фото/видеосъемки с зондированием слоя ледяной каши для определения размеров и плотности упаковки ее элементов теоретически возможно, однако авторский опыт таких наблюдений оказался негативным (требуется тщательно подбирать оборудование для обеспечения необходимой освещенности и предотвращения обмерзания объектива);
- определение размеров отдельных блоков/кусков ледяной каши в поверхностном слое возможно с помощью фотофиксации с наличием в кадре объекта, заданного масштаба (шnek, линейка и др.), с учетом перспективы изображения желательно присутствие несколько таких объектов в кадре на разном удалении.

Наглядные примеры проведения работ с поверхности ледяной каши и масштабирования съемки ее элементов приведены на рисунке. Следует еще раз отметить, что при проведении работ с поверхности каши, особенно недостаточно смороженной, обязательны повышенные требования по технике безопасности работ. Проваливание зимой в воду всегда неприятно и опасно, но проваливание в массив ледяной каши значительно опаснее. Перемещаться (плыть) в ней или самостоятельно выбраться на поверхность практически невозможно. Благодаря повышенной смерзаемости каши, повышается риск ускоренного переохлаждения провалившегося человека, вплоть до летального исхода. В данных условиях многократно возрастает роль страховочного троса

и спасательного жилета (желательно минимально сковывающего движения человека).

а

б

Рис. Шнек для масштабирования снимка элементов каши (а) и бурение ледяной каши с листа экструдированного пенополистирола (б)

Из этих рекомендаций видно, что они касаются как в целом проведения зимних ИГМИ в условиях акватории с накоплением ледяной каши, так и определения конкретных характеристик каши. В полевых условиях наиболее реально получение данных о площади покрытия и толщине слоя ледяной каши, а также величине промороженного (консолидированного) слоя и размерах элементов каши на ее поверхности. Определение физико-механических свойств рассматриваемого массива ледяного обломочного материала по аналогии с ровным льдом или ледяными образованиями проблематично. Во-первых, прямой перенос известных методик не всегда приемлем, а во-вторых, желание проведения крупномасштабных экспериментов (испытание клавиш), сталкивается с невозможностью создать качественную опору как на ровном льду.

Моделирование

Указанные выше противоречия при определении характеристик ледяной каши подводят к необходимости проведения ее лабораторного и математического моделирования. В лабораторных условиях технически значительно проще создать условия для проведения аналогов крупномасштабных экспериментов с определением прочности промороженного слоя каши. Также здесь возможны эксперименты с определением пористости массива ледяной каши или плотности упаковки его элементов. Данный параметр является крайне важным при расчете накопления каши на основе термодинамических математических моделей. Его неправильное определение способно исказить конечный результат в разы, что является неприемлемым для использования методов математического моделирования в ИГМИ.

Выводы

Представленный материал наглядно свидетельствует, что ледяная каша является, с одной стороны, важным элементом гидрометеорологического режима порта, а с другой, недостаточно изученным элементом этого режима. В дополнение ледяная каша способна существенно затруднить в портовой акватории проведение стандартных наблюдений из состава зимних ИГМИ. Методы исследования ледяной каши и способы проведения изысканий в условиях ее наличия недостаточно изучены и опробованы на сегодняшний день. Лабораторное и математическое моделирование ледяной каши требует отработки методов проведения экспериментов и уточнения числовых значений параметров, используемых в моделях.

Список литературы

1. Гляциологический словарь / В.Р. Алексеев, Н.В. Волков, Б.И. Втюрин, Е.А. Втюрина, М.Г. Гросвальд, Р.В. Донченко, А.К. Дюнин, Л.А. Канаев, В.М. Котляков, А.Н. Кренке, К.С. Лосев, В.Ф. Перов, В.Л. Цуриков; под ред. В.М. Котлякова. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 527 с.
2. Лаппо С.Д. Справочная книжка полярника: краткие сведения об океанографии, климате, животном мире и населении Арктики. М.: Главсевморпуть, 1945. 423 с.
3. Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов / Арктический и антарктический научно-исследовательский институт; подготовлено В.С. Лоциловым, К.П. Широковым. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 56 с.
4. Номенклатура морских льдов: условные обозначения для ледовых карт. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 75 с.
5. Рыжков А.В., Сазонов К.Е. О работе «ледовых ящиков» ледоколов на мелководье // Избранные доклады Четвертой Сахалинской региональной морской научно-технической конференции в год 200-летия Геннадия Ивановича Невельского и 150-летия Алексея Николаевича Крылова «Мореходство и морские науки – 2012». Южно-Сахалинск: Сахалинская областная типография, 2013. С. 223–226.
6. Сазонов К.Е. Теоретические основы плавания судов во льдах. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010. 274 с.
7. Соколова Ю.В., Девятаев О.С., Афанасьева Е.В., Титова Ю.М. Сравнение самостоятельного движения и движения под проводкой ледокола газозовов типа «Yamalmax» // Российская Арктика. 2020. № 11. С. 39–58.

R.A. Vinogradov, O.M. Andreev, D.V. Drabenko, A.A. Skutin

Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, vinra@aari.ru

ENGINEERING-HYDROMETEOROLOGICAL SURVEYS THAT TAKES INTO ACCOUNT ACCUMULATION OF BRASH ICE IN ARCTIC PORTS

Abstract. The features of engineering-hydrometeorological surveys in the conditions of the accumulation of brash ice in the port water area are considered. The difficulties of carrying out work in the zone of accumulation of brash ice are shown. Preliminary recommendations for carrying out field work are given. The significance of laboratory and mathematical modeling in the study of brash ice is shown.

Key words: brash ice; engineering-hydrometeorological surveys; ice navigation; math modeling.

Андреев О.М., Виноградов Р.А.

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, andoleg@aari.ru

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПРЕДЕЛОВ ПРОЧНОСТИ ЛЬДА В ТЕКУЩЕЙ РЕДАКЦИИ СП 38.13330.2018 «НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ (ВОЛНОВЫЕ, ЛЕДОВЫЕ И ОТ СУДОВ)»

Аннотация. Рассмотрена методика расчета пределов прочности льда, используемая в СП 38.13330.2018 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)». Показано, что при расчете предела прочности льда на одноосное сжатие достаточно учета только средней температуры льда. Расчет предела прочности льда на изгиб нуждается в дополнительных пояснениях.

Ключевые слова: ледовые нагрузки; предел прочности льда на сжатие и изгиб; расчет; свод правил.

Современные морские технологии гидротехнического строительства и их развитие в Арктической зоне РФ требуют точной оценки прочностных характеристик ледяного покрова. Не столько морфометрические (толщинные), сколько прочностные характеристики льда определяют величину нагрузок от него как на отдельные элементы, так и на все гидротехническое сооружение в целом. Поскольку лед является продуктом взаимодействия атмосферы и гидросферы, то весьма очевидным видится факт того, что на значимые характеристики льда непосредственное влияние оказывают окружающие гидрометеорологические условия.

Основным руководящим документом, регулирующим расчет нагрузок (в т.ч. ледовых) на гидротехнические сооружения, является современная редакция СП 38.13330.2018 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)» [1]. Согласно п. 7.5 указанного нормативного технического документа, исходные данные для расчета ледовых нагрузок следует назначать путем статистической обработки материалов натурных наблюдений в соответствии с ежегодной вероятностью превышения по классу сооружений. Там же указано, что при отсутствии материалов натурных наблюдений за исходные данные принимаются номинальные значения прочности из таблиц, получаемые путем решения задачи теплопроводности при стационарном режиме с использованием в качестве входных параметров гидрометеорологических условий, соответствующих заданной ежегодной вероятности превышения.

Расчет предела прочности на одноосное сжатие (R_c), приведенный ко всей толщине льда, следует вести по формуле:

$$R_c = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i + \Delta_i)^2}, \quad (1)$$

где N – количество слоев одинаковой толщины ($N \geq 3$), на которые разбивается толща льда; C_i – значение прочности льда на сжатие в i -м слое при температуре T_i ; Δ_i – доверительная граница случайной погрешности измерений.

Расчет предела прочности при изгибе (R_f), приведенный ко всей толщине льда, следует проводить по формуле:

$$R_f = 0,4(C_b + \Delta_b), \quad (2)$$

где b – индекс нижнего слоя рассматриваемого ледяного покрова (или, как сказано в одной из редакций, индекс нижней границы льда).

Расчет по формуле (1) для результатов полевых наблюдений за пределами прочности льда на одноосное сжатие, выполненный параллельно поверхности, приведенной ко всей толщине льда, не вызывает никаких нареканий. Однако аналогичный расчет, проводимый с использованием номинальных значений предела прочности льда из табл. 14 и 15 [1], может столкнуться с рядом особенностей.

Сутью стационарного режима, используемого при решении задачи теплопроводности, является наличие линейного (по толщине льда) профиля температуры. Таким образом, зная значения температур на верхней и нижней границах льда, можно определить среднюю температуру любого слоя в толще. Ряд несложных расчетов с варьированием количества слоев одинаковой толщины, на которые разбивается толща льда, проведенных для пресного льда (например, зернистой или волокнистой структур с температурой -15°C на верхней границе) по табл. 14 [1] показывает результат, представленный в табл. 1.

Таблица 1

Результаты сравнения расчетных значений предела прочности при одноосном сжатии (МПа), приведенного ко всей толщине льда, при разном количестве слоев

Кристаллическая структура льда	Количество используемых при расчете слоев, ед.			Значение предела прочности только для среднего слоя льда
	3	5	7	
Зернистая	4,27	4,11	4,08	$4,0 \pm 0,4$
Волокнистая	2,85	2,75	2,80	$2,6 \pm 0,3$

Анализ табл. 1 показывает, что при однородной (по всей толщине льда) кристаллической структуре и линейном профиле температуры разбиение льда на слои является излишней работой. Для оценки предела прочности льда для всей его толщи достаточно определить прочность только с использованием его средней температуры и добавить табличную же доверительную границу случайной погрешности измерений. Аналогичный результат можно получить и при профессионально проведенном учете разной (по толщине льда) кристаллической структуры. Небольшие отличия в получаемых пределах

прочности связаны с погрешностями при интерполяции как самих номинальных значений прочности, так и доверительных границ. Также незначительное влияние должна была бы оказывать нелинейная зависимость прочности льда от температуры, однако при использовании линейной интерполяции между номинальными табличными значениями, указанное влияние нивелируется.

Далее приводятся аналитические расчеты значения номинального значения предела прочности льда на одноосное сжатие для соленого морского льда зернистой структуры (с температурой -17°C на верхней границе и $-1,8^{\circ}\text{C}$ на нижней). Наиболее важным моментом является учет солености льда. Поскольку распределение солености по вертикали обычно неизвестно, традиционно используются разного рода зависимости интегральной (т.е. одинаковой для всей толщи) солености льда от его толщины. Результаты расчетов для льда соленостью 4‰ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты сравнения расчетных значений предела прочности на сжатие (МПа) для соленого льда, приведенного ко всей толщине льда, при разном количестве слоев

Кристаллическая структура льда	Количество используемых при расчете слоев, ед.			Значение предела прочности только для среднего слоя льда
	3	5	7	
Зернистая	3,48	3,42	3,40	$2,9 \pm 0,6$

Таким образом и для соленого льда при использовании в расчетах линейного профиля температуры и интегральной солености разбиение толщи на слои является лишним. Для оценки предела прочности всей толщи льда достаточно определить прочность с использованием средней температуры льда и доверительной границы погрешности.

В международном стандарте [2] при расчете нагрузок на гидротехническое сооружение учет пределов прочности рекомендуется осуществлять путем их оценки непосредственно по приводимым в стандарте формулам (приведенным в зависимости от структуры льда и направления воздействия). Так, предел прочности на одноосное сжатие предложено оценивать по выражению вида:

$$R_c = a\varepsilon^{0,22} \left[1 - \sqrt{\frac{v_T}{b}} \right], \quad (3)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты, зависящие от структуры льда и направления воздействия; v_T – общая доля свободного объема (рассол и воздух); ε – скорость деформации.

Предел прочности льда на изгиб снижается с увеличением доли жидкой фазы (рассола), что опосредованно включает влияние температуры льда:

$$R_f = 1,76 \exp(-5,88 \sqrt{v_b}), \quad (4)$$

где v_b – объем рассола.

Как относительный объем рассола в (4), так и доля свободного объема в (3) рассчитываются с учетом среднеинтегральной температура и солёности льда, т.е. в международном стандарте [2] никакого разбиения на слои нет. Причем это касается расчета предела прочности льда как на одноосное сжатие, так и на изгиб.

Как было сказано выше, в российском стандарте СП 38.13330.2018 [1] расчет предела прочности льда на изгиб требует учета его прочности на одноосное сжатие или (в зависимости от версии издания) в нижнем слое (вариант 1), или на нижней границе льда (вариант 2).

Вариант 2. В случае пресного льда температура на нижней границе равна температуре заморзания пресной воды (0°C) и не меняется в течение всего ледового сезона. Практически аналогичный результат можно получить и для соленого льда. Температура на нижней границе льда равна температуре заморзания соленой воды, а колебания солёности воды в подледном слое весьма незначительны в течение всего ледового сезона. Таким образом, вариант 2 дает неизменные значения предела прочности льда (и пресного, и соленого) на изгиб в течение всего ледового сезона. Это противоречит многочисленным результатам натурных наблюдений, показывающим присутствие значительного сезонного хода данного параметра прочности льда.

Вариант 1. Для примера взяты расчеты прочности нижнего слоя пресного льда, полученные ранее для табл. 1, и формулы (2). Полученные результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты сравнения расчетных значений предела прочности льда при изгибе (МПа),
приведенного ко всей толщине, при разном количестве слоев в толще льда

Кристаллическая структура льда	Количество используемых при расчете слоев, ед.		
	3	5	7
Зернистая	1,28	0,92	0,76
Волокнистая	0,84	0,60	0,56

Наглядно видно, что результаты, приведенные в табл. 3, свидетельствуют о сильной зависимости оценки предела прочности льда на изгиб от количества слоев в толще льда. Разумеется, что полученный результат антифизичен и является неприемлемым.

Выводы

1. При использовании в расчетах предела прочности льда на одноосное сжатие (приведенного ко всей толще льда) линейного профиля температуры (и

интегральной солености) разбиение толщи льда на слои является излишним. Для получения обоснованной оценки достаточно получить величину предела прочности льда на сжатие, соответствующую средней температуре льда с учетом табличного значения доверительной границы погрешности.

2. Расчет предела прочности льда на изгиб (отнесенный ко всей толщине льда) по формуле (2) требует дополнительного обоснования получаемых оценок. В настоящем виде существует значительная зависимость получаемого результата от количества слоев, на которые разбивается толщина льда (или, иными словами, от толщины нижнего слоя, используемого при расчетах).

Список литературы

1. СП 38.13330.2018 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82*».
2. ISO/FDIS 19906:2010(E) Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures.

O.M. Andreev, R.A. Vinogradov

Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, andoleg@aari.ru

PECULIARITIES OF THE CALCULATION OF THE ICE STRENGTH IN THE CURRENT EDITION OF SP 38.13330.2018 “LOADS AND IMPACTS ON HYDRAULIC STRUCTURES (FROM WAVE, ICE AND SHIPS)”

Abstract. The method of calculating the ultimate strength of ice used in the Russian code of practice SP 38.13330.2018 “Loads and impacts on hydraulic structures (from wave, ice and ships)” is considered. It is shown that when calculating the ultimate strength of ice for uniaxial compression, it is sufficient to take into account only the average temperature of the ice. Calculation of the ultimate strength of ice for bending needs additional explanations.

Key words: ice loads; compressive and flexural strength of ice; calculation; code of practice.

Черноус П.А.

Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного
отделения РАН, г. Южно-Сахалинск, pchernous48@gmail.com

ОЦЕНИВАНИЕ ЛАВИННОЙ ОПАСНОСТИ ПРИ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЯХ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. НЕДОСТАТКИ И ВОЗМОЖНОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Аннотация. В работе дается оценка действующего СП 428.1325800.2018 «Инженерные изыскания для строительства в лавиноопасных районах. Общие требования», введенного с 20.06.2019. Рассмотрены вопросы терминологии, оценки снегонакопления в лавинных очагах и его связи с возникновением лавин, расчетов скоростей и ударных давлений различных типов лавин. Указаны возможные причины недооценки лавинной опасности. Даны предложения, позволяющие избежать такой недооценки.

Ключевые слова: лавины; скорость; дальность выброса; ударное давление; повторяемость.

Недостаток знаний о возникновении и движении лавин является основной проблемой оценки лавинной опасности при проведении инженерных изысканий для строительства в лавиноопасных районах. В этих условиях конкретные изыскания должны представлять собой самостоятельное научное исследование. Для того, чтобы качество таких исследований гарантировано обеспечивало безопасность людей и проектируемых объектов во время их строительства и эксплуатации, уполномоченные государственные органы выпускают нормативные технические документы (НТД), в которых описаны достаточные технологии оценки лавинной опасности. Настоящая работа касается расчетных методов оценки характеристик возможных лавин при проведении инженерных изысканий для строительства.

С 1973 г. по настоящее время было выпущено три основных НТД [1, 4, 5], в которых эти методы были представлены. С 1980 до 1992 гг. одновременно действовали НТД [1] и [4], расчеты скоростей для лавин в одном и том же лавиноборе различались в два раза, а ударных давлений – в четыре раза. Значительно различались и дальности выброса лавин. Документ [1] был значительно хуже, чем документ [4], тем не менее, он был обязательным к применению до 2010 г., когда вступил в действие Федеральный закон № 384-ФЗ от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [7], а фактически использовался при проведении инженерных изысканий до настоящего времени. С 2010 по 2019 гг. действующих НТД, обязательных для оценки характеристик лавин и содержащих методы такой оценки при инженерных изысканиях, не было. В целом в период с 1973 по 2018 гг. в оценивании лавинной опасности наблюдалась полная неразбериха в использовании НТД, а они сами в значительной части были неполные и некорректные. Результатом их использования при реализации проектов были несчастные случаи и материальный ущерб.

Окончание этой неразберихи связано с появлением СП 428.1325800.2018 «Инженерные изыскания для строительства в лавиноопасных районах. Общие требования» [5], который позволил упорядочить многие процедуры проведения инженерных изысканий и избежать существенных недостатков предыдущих НТД. В своде правил даны определения и термины, касающиеся используемых в нем понятий. В более ранних НТД этого не было. К достоинствам свода правил можно отнести отсутствие мелкомасштабной карты лавиноопасных районов СССР, которая была в [1] и в соответствии с которой оценка лавинной опасности должна была выполняться только в них. В работе [3] показано, что большое количество несчастных случаев и аварий, связанных с лавинами, происходит на равнинных территориях, не попадающих в эти районы. В своде правил впервые в НТД показано, как выделять лавинные очаги на склоне, что важно для последующего определения размеров и динамических характеристик лавин. Впервые в НТД, регулирующий оценку лавинной опасности при проведении инженерных изысканий, включен метод определения максимально возможной дальности выброса текучих лавин и, таким образом, определения предельных границ лавиносборов. Конечно, знание границ лавиносбора определенной обеспеченности наиболее полно информирует заказчика изысканий о лавинной опасности, но за некоторыми исключениями является практически недостижимым из-за низкой (а чаще всего, совсем не оцениваемой) точности результатов.

Несмотря на все достоинства нового СП 428.1325800.2018 [5] в нем имеются противоречия и недостатки. Например, в [5] нет определения лавины. Есть определения отдельных типов лавин, но общего определения лавины нет. В тексте [5] встречаются некоторые характеристики, которые приписываются лавине в самом общем смысле, а на самом деле относятся лишь к некоторым ее типам. Из-за отсутствия однозначного определения не очень понятно входят ли в понятие «лавины» гидронапорные лавины, теперь чаще называемые водоснежными потоками. В СП 428.1325800.2018 [5] используется термин «лавиноактивный склон», но не ясно, как определить его параметры. Тождественен ли этот термин понятиям «зона зарождения лавин» и «лавиновых очаг», которые также используются в своде правил? Но их определения в нем не даются. Желательно было всем характеристикам лавин и лавиносборов, для которых это возможно, дать графические пояснения. Путаница возникает и в связи с использованием терминов «пылевая лавина», «снеговоздушный поток» и «воздушная волна». Непонятно, когда они различаются, а когда совпадают. Не ясно, что понимается под границей их воздействия, хотя методы ее определения приводятся. Расчетная скорость пылевой лавины (видимо, она же скорость воздушной волны), определяемая лишь углом склона, получается сильно завышенной – от 107 до 140 м/с. Такие скорости никогда не наблюдались. Причем, удивительно, что скорость с ростом угла наклона склона в диапазоне от 30 до 45° снижается. Ничего не сказано, где эта скорость достигается. Возможно, это максимальная скорость. Учитывая, что ударное

давление снеговоздушного потока пропорционально квадрату скорости потока, его расчетные значения сильно завышены по сравнению с фактическими и могут различаться в несколько раз. В [2] приведен метод расчета скорости и динамического давления фронта снеговоздушного облака в зависимости от пройденного расстояния, полученный на уникальных немногочисленных данных измерений на Кавказе [6]. Каковы были предпочтения для включения в СП 428.1325800.2018 [5] не его, а непонятного и неопределенного метода из [1], не ясно.

При интерпретации данных о снегонакоплении в лавинных очагах рассматривается лишь временная изменчивость высоты снежного покрова, но ничего не говорится о пространственной изменчивости. В зависимости от мест измерений высоты снежного покрова в лавинном очаге могут различаться в разы и даже в десятки раз. При оценке лавинной опасности целесообразней было бы вместо максимальной высоты снежного покрова (измеренной в одной точке) ориентироваться на более устойчивые показатели – оценки средней интегральной по площади лавинного очага или/и математического ожидания высоты снежного покрова в лавинном очаге. В них влияние крупномасштабной пространственной изменчивости высоты снежного покрова сглажено. На привязку данных о высоте снежного покрова в лавинном очаге к измерениям на удаленной опорной метеостанции в этом случае будет влиять главным образом мезо и микромасштабная изменчивость (в зависимости от расположения метеостанции и лавинного очага). Например, для оценки максимального снегонакопления на опорной метеорологической станции можно использовать средние значения высоты снежного покрова, полученные для маршрутных снегосъемок. Для оценки максимального снегонакопления в лавинном очаге также использовать не высоту снежного покрова в отдельной точке, а среднюю высоту, полученную по данным всех измерений в лавинном очаге во время снегосъемки. Количество необходимых точечных измерений и их места в лавинном очаге в зависимости от необходимой точности средней интегральной высоты или математического ожидания можно учесть, если использовать данные о пространственной статистической структуре высоты снега на склонах в различных ландшафтах [8]. При отсутствии корреляции между измерениями в отдельных точках, а также для некоррелированных с измеряемой величиной погрешностей измерений $\overline{\theta_H^2}$ (средний квадрат ошибки замены математического ожидания средним арифметическим) определяется следующим выражением:

$$\overline{\theta_H^2} = \frac{\sigma_H^2 + \Delta_H^2}{n} \quad (1)$$

где σ_H^2 – оценка дисперсии поля высоты снежного покрова; Δ_H^2 – дисперсия ошибок измерения высоты H снежного покрова; n – число измерений H . Обычно измерения высоты снежного покрова можно считать статистически независимыми уже на расстояниях 20–30 м и более [8]. Требование проведения

параллельных наблюдений на опорной метеостанции и в лавинном очаге на протяжении не менее пяти лет (достаточная снеголавинная изученность) представляется недостаточно обоснованным. Здесь необходимо руководствоваться величинами абсолютных и относительных ошибок определения высоты снежного покрова в лавинном очаге по данным опорной метеостанции.

Вызывают сомнения и некоторые зависимости для определения характеристик снегонакопления в лавинных очагах. Например, формула для определения стандартного отклонения максимальной годовой высоты снежного покрова по средней многолетней максимальной годовой высоте дает существенно заниженные значения. Особенно для районов с интенсивной метелевой деятельностью [9]. Определение повторяемости лавин в лавиносборе по средней многолетней максимальной годовой высоте снега и средней месячной температуре января также выглядит сомнительным. Например, в Хибинах есть лавинные очаги, для которых указанные характеристики очень близки, но повторяемость лавин в них различается на порядок. Более информативными признаками для определения повторяемости по сравнению со средней месячной температурой января выглядят крутизна склона и площадь лавинного очага. Вообще говоря, проведение инженерных изысканий представляется как исследование и оценка характеристик процесса лавинообразования и лавинопроявления на *конкретном* склоне. Предлагаемое для определения вероятностных характеристик лавин использование статистического моделирования лишь создает иллюзию возможности такой оценки. Ориентированные на обобщенные, по наблюдениям в различных лавиносборах, статистические зависимости, используемые при моделировании, в результате дают вероятности различных лавинных характеристик для некоторого виртуального лавиносбора. Насколько они близки к искомому, т.е. соответствующим лавиносбору, для которого проводятся инженерные изыскания, не известно. На практике чаще всего нет возможности оценить надежность получаемых вероятностей (обеспеченности) из-за отсутствия достаточно длинных рядов наблюдений за лавинами и их характеристиками на территории проведения изысканий. Применение статистического моделирования было бы оправданным, если бы в его основе была надежная детерминированная физически обоснованная модель, а не используемые в СП 428.1325800.2018 [5] эмпирические зависимости. Можно также попытаться восстановить распределение вероятностей некоторых неблагоприятных событий, связанных с лавинопроявлением в пространстве нескольких статистически независимых характеристик, определяющих образование лавин. Хотя данных наблюдений для этого, как правило, будет мало. С помощью приведенного в [5] метода статистического моделирования это и делается. В качестве независимых характеристик используются максимальная высота снежного покрова в лавинном очаге и температура воздуха января (видимо средняя многолетняя). Но отсутствие статистической связи максимальной

высоты снежного покрова и температуры воздуха января требует проверки. Более информативной характеристикой по сравнению с температурой января является крутизна склона. Очевидно, что крутизна склона и максимальная высота снега в лавинном очаге являются независимыми.

В СП 428.1325800.2018 [5] также имеется ряд неопределенностей, неточностей и опечаток, которые затрудняют его практическое использование.

СП 428.1325800.2018 [5] по сути дела является действующим доказательным НТД, регламентирующим более или менее подробно проведение инженерных изысканий по оценке лавинной опасности. В нем не должно быть неопределенностей, неточностей, противоречий и ошибок.

Главным недостатком приведенных методов оценки лавинной опасности является отсутствие какой-либо информации о точности получаемых с их помощью результатов. Помимо авторских испытаний различных опубликованных методов другой информации об их качестве нет. Представляется, что прежде чем попасть в НТД, метод должен проходить независимую проверку надежности в различных условиях. Для детерминированных методов такая проверка не представляет больших проблем (помимо организационных). Оценка надежности вероятностных методов может проводиться лишь на некотором ансамбле случаев, но из-за малочисленности зарегистрированных «лавиновых событий» такая оценка для одного лавиносбора, как правило, невозможна. Если имеются несколько методов оценки лавинной опасности, предпочтение использования в качестве нормативного необходимо отдавать методу, показавшему лучшие результаты при независимой проверке. Из НТД должны исключаться методы, которые могут снизить лавинную опасность. Как уже говорилось, большинство указанных недостатков является следствием несоответствия знаний о лавинах желаниям заказчиков изысканий, а иногда и государственным НТД, устанавливающим правила оценки лавинной опасности. Государственные органы, устанавливающие нормы оценки лавинной опасности при инженерных изысканиях для строительства, должны обратить внимание на это противоречие и активизировать необходимые научные исследования для решения указанной проблемы.

В настоящей работе представлены лишь некоторые замечания и предложения, касающиеся совершенствования СП 428.1325800.2018 [5]. Они не являются исчерпывающими и бесспорными. Но они, как и другие, требуют рассмотрения. Законом [7] предусмотрено, что своды правил подлежат ревизии и в необходимых случаях пересмотру и (или) актуализации не реже, чем каждые пять лет. Таким образом, существует возможность улучшить действующий сейчас документ [5], сделав его надежным и удобным инструментом для проведения инженерных изысканий в лавиноопасных районах.

Список литературы

1. ВСН 02-73 Указания по расчету снеголавинных нагрузок при проектировании сооружений.
2. Москалев Ю.Д. Динамика лавин и снеголавинные расчеты. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 233 с.
3. Селиверстов Ю.Г. Снежные лавины на равнине // Сборник трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций». СПб.: УГПС МЧС России, 2009. С. 149–156.
4. СН 517-80 Инструкция по проектированию и строительству противолавинных защитных сооружений.
5. СП 428.1325800.2018 Инженерные изыскания для строительства в лавиноопасных районах. Общие требования.
6. Урумбаев Н.А. Результаты исследований природы и деятельности лавинных воздушных волн // Труды САРНИГМИ. 1974. Вып. 15(96). С. 31–38.
7. Федеральный закон № 384-ФЗ от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».
8. Черноус П.А. О рационализации измерений характеристик снега для оценки его устойчивости на склоне // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. № 1. С. 114–142. <https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.1.005>.
9. Черноус П.А. Мониторинг высоты снежного покрова при изысканиях для оценки лавинной опасности // Материалы Общероссийской научно-практической конференции «Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях». М.: Геомаркетинг. 2021. С. 124–130. <https://doi.org/10.25296/978-5-6040982-4-0-2021-3-1-165>.

P.A. Chernous

Special Research Bureau for Automation of Marine Researchers, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
Yuzhno-Sakhalinsk, pchernous48@gmail.com

AVALANCHE HAZARD ASSESSMENT DURING ENGINEERING SURVEY FOR CONSTRUCTION. DISADVANTAGES AND POSSIBILITIES FOR IMPROVEMENT

Abstract. The paper provides an assessment of the current code of practice SP 428.1325800.2018 “Engineering survey for construction in snow avalanches-endangered regions. General requirements”, introduced from 20.06.2019. The issues of terminology, assessment of snow accumulation in avalanche starting zones and its connection with the occurrence of avalanches, calculations of velocities and impact pressures of various types of avalanches are considered. Possible reasons for underestimating of the avalanche hazard are indicated. Suggestions are given to avoid such underestimation.

Key words: avalanches; speed; runout distance; impact pressure; frequency of avalanches.

Селиверстов Ю.Г., Петраков Д.А., Турчанинова А.С., Глазовская Т.Г.

МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, г. Москва, yus5@yandex.ru

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИНЖЕНЕРНО-ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ. ЛАВИНЫ. НАПРАВЛЯЮЩИЕ, ТОРМОЗЯЩИЕ, ОСТАНАВЛИВАЮЩИЕ СООРУЖЕНИЯ

Аннотация. По результатам инженерных изысканий должны быть разработаны рекомендации для принятия проектных решений по размещению и строительству объектов, а также организации мероприятий по инженерной защите. Профильный нормативный документ СП 116.13330.2012 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения» содержит часто только общие указания и не всегда предлагает способы определения расположения и расчета параметров инженерных сооружений, включает устаревшие, а также неправильные трактовки зарубежных рекомендаций. Эти обстоятельства затрудняют изыскателю выбор защитных мероприятий и могут привести к неправильным решениям. На примере разработки рекомендаций по применению направляющих, тормозящих и останавливающих противолавинных сооружений авторы рассматривают используемые в мировой практике современные подходы.

Ключевые слова: лавина; защита; направляющие сооружения; тормозящие сооружения; останавливающие сооружения.

Федеральное законодательство РФ определяет инженерную защиту как комплекс сооружений, направленных на защиту людей, здания или сооружения, территории, на которой будут осуществляться строительство, реконструкция и эксплуатация здания или сооружения, от воздействия опасных природных процессов и явлений, а также на предупреждение и (или) уменьшение последствий воздействия опасных природных процессов и явлений [10]. Соблюдение требований этого закона призван обеспечивать нормативный технический документ (НТД) СП 116.13330.2012 [8], в котором содержатся правила проектирования инженерной защиты от опасных природных процессов, включая лавины.

В отечественной практике проектирования защитных сооружений применение противолавинных дамб было частично регламентировано уже в первом НТД ВСН 02-73 [2] – помимо расчета давления на препятствие устанавливалась высота направляющей дамбы (стены). В этом же НТД содержались указания по применению тормозящих сооружений, заключающиеся в расчете снижения скорости лавины при их прохождении.

Хотя ВСН 02-73 [2] имел статус ведомственных строительных норм и был предназначен для обязательного применения только в учреждениях четырех министерств и ведомств, до недавнего времени он использовался в качестве норматива в гораздо более широком диапазоне изыскательских, проектных и строительных работ.

Следующий НТД, содержащий указания по инженерным и специальным изысканиям в лавиноопасных районах, расчету параметров снежного покрова и лавин, размещению зданий и сооружений, а также по проектированию противолавинных защитных сооружений – СН 517-80 [5]. Посвященный дамбам раздел в нем был расширен за счет включения ограничения по скорости лавин в районе расположения дамбы (25 м/с) (которое не было никак не обосновано) и указания на расположение перед дамбой искусственной выемки для вмещения максимально возможного объема лавинных отложений (методика расчета объема в документе не предлагалась). Предписывалось возведение дамб дополнять также лавинотормозящими сооружениями. При этом была откорректирована формула для расчета снижения скорости тормозящими сооружениями, определялась их высота и расстояния между сооружениями и их рядами.

В ряде публикаций положения СН 517-80 [5], касающиеся проектирования дамб и тормозящих сооружений были названы сомнительными, а формулы лишенными физического смысла [4].

С появлением НТД, впервые объединившего нормы на проектирование сооружений и мероприятий инженерной защиты территорий от разных опасных геологических процессов [6], утратила свою силу инструкция [5], а вместе с ней из нормативов исчезли формулы и даже рекомендации для определения высоты останавливающих противолавинных дамб и снижения скорости тормозящими сооружениями. Высоту направляющих сооружений было предложено назначать не менее высоты фронта лавины. Появилось новое указание по поводу размещения лавинотормозящих, направляющих и останавливающих сооружений – их следовало размещать на конусах выноса в зоне отложения лавин, где крутизна склона менее 23° . Такая точность определения начала зоны отложения вызывает удивление – для сравнения в Атласе лавин ЮНЕСКО [1] значение округлено до 20° , а также рассматривается и 10° . Кроме того, устанавливалось, что угол в месте начала встречи лавины с отклоняющим сооружением не должен быть более 10° .

В СНиП 22-02-2003 [7] и СП 342.1325800.2017 [9] указания по проектированию сооружений на пути движения снежных лавин дублировали содержание предшествующего норматива. А вот действующая актуализированная редакция СНиП 22-02-2003 [8] содержит явную ошибку – вместо значения угла встречи лавины с отклоняющим сооружением повторно прописано значение крутизны склона в месте расположения дамбы и равно оно 10° , что входит в противоречие с установленным ранее значением 23° .

В связи с актуальностью темы защиты от лавин при проведении инженерно-гидрометеорологических изысканий (ИГМИ) авторы публикации считают необходимым обратиться к опыту зарубежных коллег, которые в отличие от отечественных исследователей, фактически прекративших в результате перестройки работы по изучению применения противолавинных сооружений, продолжали масштабные исследования [13]. В 2009 г. был

опубликован труд ряда ведущих европейских специалистов в области моделирования движения лавин «The design of avalanche protection dams» [17], в котором обобщен опыт применения противолавинных дамб с учетом динамики лавин разных типов и даны рекомендации по проектированию направляющих и останавливающих дамб, а также их совместного использования с тормозящими сооружениями. Документ представляет собой отчет о научно-исследовательских работах, выполненных по проектам CADZIE и SATSIE по грантам Европейского союза. Эти проекты, осуществленные с применением лабораторных экспериментов и теоретического анализа, привели к лучшему пониманию воздействия снежных лавин на дамбы и другие препятствия и позволили сделать шаг вперед в формулировании критериев проектирования защитных мер. До появления отчета в европейской практике осуществления противолавинных мероприятий при определении размеров защитных сооружений на пути лавин не использовалась даже приблизительно единообразная процедура и не было соответствующей методической основы. Первый же нормативный документ по применению лавинопредотвращающих сооружений был опубликован в Швейцарии в 1961 г. [12]. Впоследствии документ несколько раз актуализировался и нашел применение в Австрии, Италии, Германии, Норвегии, Исландии, Испании, США [11]. Положения этого документа также были приняты за основу первого советского НТД в области организации защиты от лавин [3]. Следует отметить, что согласно содержащейся в отчете [17] правовой информации, ни Европейская комиссия, ни какое-либо лицо, действующее от ее имени, не несут ответственности за возможное использование приводимой в отчете информации, а взгляды, выраженные в этой публикации, являются исключительной ответственностью авторов и не обязательно отражают точку зрения Европейской комиссии. Таким образом, публикация [17] не является нормативным документом на территории Европейского союза.

Одной из первых стран, отреагировавших на появление отчета [17] учетом его положений в нормативной документации, стала Австрия – в 2010–2011 гг. были приняты три документа по организации и применению постоянной противолавинной защиты [14–16]. Первый содержит термины и определения, а также методы определения нагрузок. Во втором документе представлен расчет размеров сооружений и особенности конструкций. В третьем содержатся правила мониторинга работы сооружений и их технического обслуживания – темы, которая в нашей стране практически не поднималась. Документы имеют гриф ONR (Österreichischen Normungsinstitut Regeln – правила Австрийского института стандартов), что означает предварительные стандарты, которые не полностью соответствуют всем требованиям классического стандарта (в Австрии это ÖNORM EN и ÖNORM B) и не являются обязательными к применению. Тем не менее, положения документов уже используются на практике.

Согласно п. 7.3.2.1 СП 116.13330.2012 [8] лавинотормозящие сооружения следует применять для уменьшения или полного гашения скорости лавин на конусах выноса в зоне отложения лавин, где крутизна склона менее 23° . Высоту лавинотормозящих сооружений следует назначать не менее суммы высот снегового покрова в месте их расположения и фронта лавины. Необычное значение 23° в тексте свода правил не объясняется. Его появление объясняется тем, что принятая в [2] формула расчета скорости не применима на участках положе 23° [3]. Снижение скорости рядами тормозящих сооружений предлагается определять расчетом, однако способы для этого не приводятся.

В зарубежной литературе рекомендации по применению тормозящих сооружений более объемны:

- лавинотормозящие сооружения следует применять для уменьшения или полного гашения скорости лавин на конусах выноса в зонах транзита и отложения лавин;

- высота лавинотормозящего сооружения (надолба, клина, бугра, холма) должна быть, как минимум, в 2–3 раза выше высоты фронта лавины;

- лавинотормозящее сооружение со стороны движения лавины должен иметь угол наклона от 45° до 60° , а отношение ширины к высоте сооружения должно быть равно 1;

- лавинотормозящие сооружения должны размещаться по всей ширине потока лавины; промежуточное пространство между соседними сооружениями не может превышать значение ширины отдельных сооружений чтобы взаимодействие отклоняемых вбок частей потока приводило к дополнительному рассеиванию энергии;

- если предусмотрено возведение двух или более рядов лавинотормозящих сооружений, последующие ряды должны быть смещены на половину ширины вперёдистоящих сооружений.

Приводятся таблицы для расчета расстояния между рядами, которое определяется в зависимости от скорости лавин и угла наклона склона в месте расположения лавинотормозящих сооружений [15].

При соблюдении данных рекомендаций предполагается, что при прохождении одного ряда скорость лавины снизится на 20%, двух рядов – на 30%.

Указания по применению направляющих сооружений в СП 116.13330.2012 [8] крайне скупы: направляющие дамбы и стены, лавинорезы следует устанавливать на участках зоны отложения лавины при крутизне склона менее 23° , высоту сооружений следует назначать не менее высоты фронта лавины. Крутизна склона в месте начала встречи лавины с сооружением должна быть не более 10° .

В мировой практике для изменения направления лавин используются дамбы различных конструкций, а в случае отсутствия места для их размещения предлагается возводить стенки, которые могут быть выполнены из разнообразных материалов. Применяются также лавинорезы.

Функционально разделяются направляющие и отклоняющие сооружения. Конструкция направляющей дамбы параллельна основному направлению движения, а сама дамба (стенка) предназначена для предотвращения отклонения (бокового распространения) от него, т.е. сооружение уменьшает возможную ширину растекания лавины. Размещаются такие сооружения на конусах выноса, открывающихся на плоские днища долин.

Отклоняющие сооружения предназначены для изменения направления движения лавин или предотвращения бокового растекания после изменения направления движения без значительного влияния на скорость лавины. Идеальное их расположение – зоны транзита, где лавины имеют достаточную скорость и отклонение не приводит к значительным отложениям лавинного снега и зарабатыванию дамб (стенок). Однако, такие сооружения практически не влияют на движение пылевых лавин. Согласно положениям [15], максимальный угол отклонения α отклоняющего сооружения (угол между направлением движения лавины и сооружением) не должен превышать 20° . Если угол будет больше, необходимая высота сооружения будет очень большой и, кроме того, перед сооружением будут накапливаться значительные массы лавинных отложений. В случае необходимости отклонения направления движения лавин на больший угол предлагается применение серии дамб (стенок).

Необходимо учитывать, что после прохождения нижней части сооружения возможен заплеск в сторону (за линию дамбы) под углом 20° . Отклоняющий эффект возрастает с увеличением крутизны, обращенной к направлению движения лавин стенки отклоняющей конструкции: в любом случае уклон должен быть более 45° . Эффект влияния вертикальных стен практически достигается уже при наклоне откоса 60° .

Для определения высоты направляющих дамб и стенок используется формула [15]:

$$H_D = h_f + h_n + h_a + h_{Fb} + h_{stau}, \quad (1)$$

где H_D – вертикальная высота дамбы, м; h_f – вертикальная высота текущей лавины или текущей составляющей, м; h_n – вертикальная высота естественно отложенного снежного покрова, м; h_a – вертикальная высота лавинных отложений, м; h_{Fb} – вертикальная высота «надводного борта», равная 10% высоты дамбы, но не менее 1 м, м; h_{stau} – вертикальная высота подпора лавины дамбой (энергетическая высота), м.

$$h_{stau} = \frac{(v_f \sin \alpha)^2}{2g\lambda}, \quad (2)$$

где v_f – скорость текущей лавины, м/с; α – угол отклонения, $^\circ$; g – ускорение свободного падения, м/с²; λ – коэффициент высоты подпора. Коэффициент

учитывает рассеивание энергии, когда лавина сталкивается с отклоняющей конструкцией. Точный физический процесс, который имеет место, не известен в деталях и поэтому в настоящее время не может быть адекватно смоделирован – рекомендуется использовать значение $\lambda = 1$.

Таким образом, для обеспечения защиты объектов направляющие сооружения должны иметь высоту, значительно больше определяемого по [8] значения.

Проектирование лавинорезов в действующей отечественной НТД имеет нулевую расчетную базу. Прописана только необходимость их размещения в зонах отложения лавин. В соответствии с международными нормами и рекомендациями по защите от лавин [11] лавинонаправляющие сооружения (лавинорезы) рекомендуется устанавливать также в зонах транзита лавин. При этом крутизна склона для установки лавинорезов не нормирована. При небольших скоростях лавин именно лавинорезы и направляющие дамбы являются оптимальным решением по защите, например, опор канатных дорог. Лавинопредотвращающие мероприятия, включающие системы снегоудерживающих сооружений, при проектировании инженерной защиты опор от лавин, проблематичны ввиду их высокой стоимости и часто бывает достаточным применение лавинозащитных мероприятий – лавинорезов, иногда в сочетании с предупредительными спусками снежных лавин. В советской (лавинорез для защиты опоры МПКД «Азау – Старый Кругозор» в зоне транзита лавин) и российской практике (лавинорезы для защиты опор канатных дорог курорта «Роза-Хутор», расположенных в зонах транзита лавин) лавинорезы устанавливались без учета требований СП 116.13330.2012 [8], при этом повреждений защищаемых опор лавинами к настоящему времени не отмечалось.

Не отличаются в СП 116.13330.2012 [8] информативностью и указания по применению лавиноостанавливающих сооружений. И главное – отсутствуют какие-либо требования к определению их высоты!

В документах [11, 13, 15, 17] содержатся рекомендации по применению останавливающих лавины сооружений. Их следует устанавливать в зоне отложения лавин. Сооружения размещаются фронтально по направлению движения лавин в целях сокращения их дальности выброса и сбора всего объема лавин. Определение высоты останавливающих сооружений также осуществляется по формуле (1).

Изменения относительно направляющих сооружений касаются определения высоты подпора лавин дамбами. Используется формула:

$$h_{stau} = \frac{v_f^2}{2g\lambda}. \quad (3)$$

Значения λ – коэффициента высоты подпора – рекомендуется устанавливать равным 1,5 для сухих и 2,0 для мокрых лавин.

Угол наклона фронтальной поверхности определяется так же, как и для отклоняющих сооружений. На обратной по отношению к направлению

движения лавин поверхности лавиноостанавливающего сооружения выполняются мероприятия для повышения ее шероховатости для предотвращения сползания и скольжения снега.

Перед лавиноостанавливающим сооружением оборудуется выемка для вмещения лавинных отложений. Площадь выемки должна быть определена в зависимости от суммарных объемов лавин, достигающих лавиноостанавливающих сооружений в течение зимнего сезона, а также с учетом растекания лавин в стороны от сооружения. При расчетах принимается, что угол наклона заполняющих выемку лавинных отложений перед дамбой составляет 5–10°. Коэффициент сжатия лавинных отложений определяется равным от 1,5 до 2,0 в зависимости от начального состояния отложений.

Высота защитной дамбы может быть уменьшена за счет тормозящих конструкций, расположенных в зоне отложения выше по потоку, – искусственных неровностей, повышающих шероховатость подстилающей поверхности.

Имея определенный опыт изыскательской деятельности и общения с заказчиками работ, проектировщиками и строителями, авторы статьи считают, что документ СНиП 22-02-2003 [7] требует новой актуализации с учетом современных представлений об организации противолавинных мероприятий. При наличии четких указаний разработка рекомендаций по результатам ИГМИ станет более простой процедурой для изыскателей и прозрачной для экспертов и заказчиков. А защита от лавин станет более надежной. Надо четко осознавать, что сегодняшние решения не должны превращаться в завтрашние проблемы.

Список литературы

1. Атлас лавин. Иллюстрированная международная классификация лавин. Париж: ЮНЕСКО, 1981. 267 с.
2. ВСН 02-73 Указания по расчету снеголавинных нагрузок при проектировании сооружений.
3. Гракович В.Ф., Рунич А.В. Нормативная документация, регламентирующая строительство и освоение лавиноопасных районов // Труды 2-ого Всесоюзного совещания по лавинам. Л.: Гидрометеиздат, 1987. С. 343–352.
4. Дюнин А.К., Гербер А.Р., Фомин А.Г. Состояние исследований по инженерной защите от лавин // Труды 2-ого Всесоюзного совещания по лавинам. Л.: Гидрометеиздат, 1987. С. 283–294.
5. СН 517-80 Инструкция по проектированию и строительству защитных сооружений.
6. СНиП 2.01.15-90 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения проектирования.
7. СНиП 22-02-2003 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения.

8. СП 116.13330.2012 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003*».
9. СП 342.1325800.2017 Защита железнодорожного пути и сооружений от неблагоприятных природных явлений. Правила проектирования, и строительства.
10. Федеральный закон № 384-ФЗ от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».
11. Handbuch technischer Lawinenschutz / F. Rudolf-Miklau, S. Sauermoser (eds). Hoboken; Ernst and Sohn, 2011. 466 p.
12. Lawinenverbau im Anbruchgebiet. Richtlinie für den permanent Stützverbau. Vol. 15. Davos: Mitteilungen des Eidgenössisches Institutes für Schnee- und Lawinenforschung, 1961. 60 p.
13. Margreth S., Sauermoser S. Entwicklung von standards und normen im technischen lawinenschutz // Wildbach- und Lawinenverbau. 2014. Heft No. 174. P. 42–56.
14. ONR 24805:2010-06-01 Permanenter technischer Lawinenschutz – Benennungen und definitionen sowie statische und dynamische einwirkungen.
15. ONR 24806:2011-12-15 Permanenter technischer Lawinenschutz – Bemessung und konstruktive ausgestaltung.
16. ONR 24807: 2010-03-01 Permanenter technischer Lawinenschutz – Überwachung und instandhaltung.
17. The design of avalanche protection dams – Recent practical and theoretical developments // Forschungsprojekt SATSIE – Avalanche studies and model validation in Europe, Climate change and natural hazard research. Series 2 / T. Johannesson, P. Gauer, P. Issler (eds), et al. Brussels: European Commission (Directorate-General for Research, Publication EUR 23339), 2009.

Yu.G. Seliverstov, D.A. Petrakov, A.S. Turchaninova, T.G. Glasovskaya

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, yus5@yandex.ru

RECOMMENDATIONS ON THE RESULTS OF ENGINEERING-HYDROMETEOROLOGICAL SURVEYS. AVALANCHES. DEFLECTING, RETARDING, AND RETENTION STRUCTURES

Abstract. Based on the results of engineering surveys, recommendations should be developed for decisions making on the placement of designed facilities and organizing engineering protection measures. The relevant guideline SP 116.13330.2012 “Engineering protection of territories, buildings and structures from dangerous geological processes. Basic principles” contains often only general instructions and does not always offer methods for determining the location and calculation of parameters of engineering structures, includes outdated, as well as incorrect interpretations of foreign recommendations. These circumstances make it difficult for the engineer to choose protective measures and can lead to incorrect decisions. On the example of developing recommendations for the use of deflecting, retarding, and retention mitigation structures, the authors consider modern approaches applied in the world practice.

Key words: avalanche; protection; deflecting structures; retarding structures; retention structures.

Мальнева И.В.¹, Докукин М.Д.¹, Анаев М.А.², Калов Р.Х.¹, Хаджиев М.М.¹

¹Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, malnir@mail.ru

²Главное управление МЧС России по Кабардино-Балкарской Республике, г. Нальчик, amaga0773@mail.ru

АКТИВНОСТЬ СЕЛЕЙ И ДРУГИХ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ГОДЫ

Аннотация. Представлены результаты исследований влияния космической погоды на проявление селей в Приэльбрусье и метеорологические условия их формирования по данным метеостанции «Терскол» ежедневно за 2016–2021 гг. Также использованы материалы, размещенные в сети Интернет, на сайтах spaceweather.com, tesislebedev.ru. В первую очередь, это скорость солнечного ветра в околоземном пространстве и плотность протонов в нем. При этом селевой процесс рассматривается как многокомпонентная система, главным звеном в которой является энергия, непрерывно поступающая от Солнца. Установлено, что наиболее опасные метеорологические условия для формирования селей в Приэльбрусье сформировались в 2017 и 2019 гг. при определенной активности Солнца. Наиболее активным был 2017 г., когда наблюдалось катастрофическое проявление селей в ущелье Адыл-Су, связанное с прорывом оз. Башкара, также в ущелье р. Герхожан-Су. Отмечено, что влияние космической погоды может проявить себя только тогда, когда для него будут подготовлены земные природные условия, в значительной степени определяющие активность опасных природных процессов. Результаты наблюдений позволяют уточнять оперативные прогнозы селей от нескольких дней до недели, что необходимо для рационального ведения мониторинга.

Ключевые слова: сели; космическая погода; солнечный ветер; солнечные вспышки; плотность протонов; прогноз.

В последние десятилетия ущерб от природных катастроф стремительно растет. Поэтому в настоящее время особое значение придается проблеме гражданской защиты, безопасности населения и народно-хозяйственных объектов. При этом очень важны оперативные прогнозы, которые позволят за несколько дней, даже часов, предупредить о возможной опасности. Эти проблемы имеют большое значение для территории Кабардино-Балкарской Республики, где широко распространена селевая деятельность, как в горной части, так и в предгорьях, и многие другие опасные природные процессы.

Наблюдения за проявлением селей и факторами, их обуславливающими, на территории республики проводятся много лет различными ведомствами. Накоплен очень большой материал, который, безусловно, является основой для прогнозирования селей. Вместе с тем, для составления оперативных прогнозов на различных уровнях необходимы непрерывные режимные наблюдения, которые на современном уровне и в объеме, дающем исчерпывающий материал для прогнозирования селей, в настоящее время не ведутся.

Для разработки и составления оперативных прогнозов селей и других опасных природных процессов на современном уровне селевой процесс следует рассматривать как многокомпонентную систему. Все факторы, определяющие

развитие этой сложной многокомпонентной системы, взаимосвязаны и взаимообусловлены. Главным звеном в этой сложной системе является энергия, непрерывно поступающая от Солнца. Космическая погода является одним из факторов в этой цепи [11].

Оценить характер селевой деятельности в конкретный период времени позволяют сведения об активности селей.

Под активностью селевого процесса понимается интенсивность развития селевого процесса во времени и в пространстве [7]. *Активность селей* изменяется во времени и испытывает циклические колебания различной продолжительности в зависимости от факторов, обуславливающих их развитие. Она различается в селеопасных районах России в зависимости от условий формирования селей.

За 2016–2021 гг. в Кабардино-Балкарской Республике наблюдались селевые потоки, различные по генезису, мощности и разрушительной силе, а также часто связанные с ними оползни.

Таблица 1

Активность селей и других опасных природных процессов на территории Кабардино-Балкарской Республики

Годы	Бассейн реки	Степень активности селей и других процессов		
		сильная	средняя	слабая
2016	Баксан	–	–	6
	Черек	–	–	3
	Псыгансу	–	1	–
2017	Баксан,	2	–	–
	Черек	–	1	–
2018	Баксан	1	–	2
	Черек	–	–	2
2019	Баксан	–	–	7
	Черек	–	–	2
	Чегем	–	–	1
2020	Баксан	Оползень	–	2
	Черек	–	–	1
2021	Баксан	–	1	3
	Черек	–	–	1

Следует отметить годы наиболее значительной селевой деятельности.

1. **2017 г.** 14 августа по пойме р. Герхожан-Су произошел сход селевого потока. Последствиями стали полностью разрушенный пешеходный мост через р. Герхожан-Су, деформации русла. Расход селя достигал 700 м³/с, а объем селевых отложений в лотке и на конусе выноса в пойму р. Баксан составил порядка 300 тыс. м³. В результате повторных селей было частично перекрыто русло р. Баксан. 15 августа селя повторился, но мощность его была значительно меньше [10].

1 сентября в результате прорыва оз. Башкара по долине р. Адыл-Су произошел сход селевого потока объемом около 800 тыс. м³ и наносоводного селя по р. Баксан.

2. **2018 г.** 5 июля прошел катастрофический паводок и незначительные селевые потоки на р. Баксан и на ее притоках (реки Азау, Донгуз-Орунбаксан, Адыл-Су, Курмычи) с разрушениями участков дороги «Прохладный – Азау», газопроводов, линий электропередачи и их опор, мостов, канализационных коллекторов, участков лесных массивов и пр.

3. **2019 г.** 23–24 июля отмечались сходы селей малой мощности, но на большой территории по притокам рек Баксан, Адыр-Су, Тютю-Су, по руслам рек Адыр-Су, Тютю-Су (в верхней и средней части), Герхожан-Су.

Все рассмотренные селевые потоки были вызваны ливнями в высокогорной и среднегорной зонах или стали последствием длительной жары (14–15 августа 2017 г. при отсутствии осадков).

Опорной для горных районов Кабардино-Балкарской Республики является гидрометеорологическая станция (ГМС) «Терскол», однако для всей территории она недостаточно репрезентативна. В республике имеются существенные различия метеорологических показателей с этой метеостанцией. Вместе с тем, многолетние наблюдения можно использовать только по данным этой метеостанции. В табл. 2 приведены средние за месяц показатели суточной температуры воздуха и количества осадков за 2016–2020 гг.

Таблица 2

Среднемесячные температуры воздуха ($T_{\text{ср}}$, °C) и количество осадков (Q , мм) в 2016–2020 гг. по отношению к среднему многолетнему значению

Месяцы	Май		Июнь		Июль		Август	
	$T_{\text{ср}}$, °C	Q , мм	$T_{\text{ср}}$, °C	Q , мм	$T_{\text{ср}}$, °C	Q , мм	$T_{\text{ср}}$, °C	Q , мм
Среднее многолетнее значение	6,7	87	9,9	93	12,5	100	12,1	91
2016	7,6	111,1	10,5	54,8	12,5	169,5	13,8	115,3
2017	5,9	255,3	10,6	80,9	14,1	67,1	14,1	83,4
2018	8,6	46,3	11,7	44,8	14,2	146,1	12,2	96,9
2019	8,5	108,2	12,6	105,9	11,9	177,9	12,9	45,9
2020	7,5	147,9	11,5	80,3	13,9	81,0	10,8	88,9

В результате анализа данных, представленных в табл. 2, можно отметить, что значительные и катастрофические проявления селей не связаны с месячными значениями метеорологических показателей.

При увеличении количества осадков за месяц вероятно проявление слабых и незначительных селей в отдельных бассейнах (июль в 2016, 2018, 2019, 2021 гг.). В эти же месяцы часто проявление селей связано с периодами повышения средней суточной температуры воздуха до 15–17°C.

При оценке метеорологических условий формирования селей следует отметить, что вследствие тенденции повышения температуры воздуха в начале XXI в. были созданы условия для изменения условий абляции, повышения снеговой линии на ледниках, которые сохраняются до настоящего времени. Снеговая линия поднялась значительно выше. Ото льда освободились значительные территории, входящие в ледниково-моренный комплекс. Маршрутные и вертолетные обследования последнего десятилетия показали, что кромки ледников Центрального Кавказа во многих местах перешли отметку в 3000 м н.у.м. и находятся выше. В связи с этим снег, выпавший за зимний период на ледниках, не успевает таять за летний период, тем самым создается «чехол», который препятствует активной абляции. Поэтому в селеопасный период высокие значения температуры воздуха и даже совпадающие с ними периоды значительного количества осадков недостаточны для формирования мощного селевого потока.

В связи с интенсивной деградацией ледников помимо всего прочего исчезли моренные озера. Так, существенные изменения произошли в верховьях р. Каяарты-Су. Все зандры остались далеко от края ледника. Однако сохранилось достаточное количество погребенных льдов, которые могут принять участие в формировании селей при аномально высоких температурах и достаточном увлажнении за счет осадков. Увеличение количества осадков в целом способствовало активизации селей дождевого и смешанного генезиса, учитывая характер четвертичных отложений в Приэльбрусье, в частности, оползневых отложений. *Вместе с тем, конкретные даты проявления селей не всегда совпадают с повышенными значениями метеорологических факторов.*

Для оценки влияния метеорологических факторов формирования селей необходимо учитывать широкое развитие в районе исследований различных по генезису рыхлообломочных пород, являющихся средой развития экзогенных геологических процессов. Широким распространением в районе пользуются оползневые и селевые накопления. В высокогорной зоне оползни-потоки активизируются летом при интенсивном таянии ледников и погребенных льдов, а весной при таянии снежного покрова, склоновые отложения могут приобретать тиксотропные свойства.

Далее рассмотрено проявление катастрофических селей и роль в их развитии метеорологических факторов.

В 2017 г. прохождение селей было подготовлено аномальными погодными условиями в июле и августе. Так, в июле 12 дней средняя суточная температура воздуха была выше 15°C (по данным ГМС «Терскол»), что является пороговым критическим значением при формировании селей. В августе с начала месяца не было средней суточной температуры ниже 15°C, а доходила она почти до 20°C, что обусловлено влиянием мощного антициклона на юге европейской части России. Осадков в августе практически не было. К 11 августа снеговая линия проходила на высоте более 3800 м н.у.м. Вышеперечисленные температурные аномалии негативно повлияли на

моренно-ледниковый комплекс р. Герхожан-Су. Высокие температуры воздуха создали условия для формирования значительных объемов талых ледниковых вод, которые могли накапливаться внутри ледника и затем прорываться в виде гляциальных паводков. Данные условия можно сравнить с июлем 2000 г.

После длительного периода аномально жаркой погоды над высокогорными районами Центрального Кавказа установился атмосферный фронт, с которым были связаны локальные ливни. Причиной прорыва оз. Башкара и катастрофического селя в Баксанском ущелье Кабардино-Балкарской Республики стал один такой ливень. Настолько сильных осадков в этом районе не было более четверти века, а их вероятность, по данным многолетних наблюдений, менее, чем раз в сто лет.

В 2019 г. наиболее селеопасным месяцем был июль. С начала июля на территории наблюдался циклонический характер погоды. По результатам анализа табл. 2 можно отметить существенные отличия средней температуры воздуха и количества осадков за последние годы и особенности 2019 г. В июле средняя температура уже была существенно ниже нормы, а количество осадков – почти в два раза больше. Эта ситуация и определила высокую активность оползневых и селевых процессов в июле 2019 г. Осадки, с которыми связано наибольшее количество опасных геологических процессов, прошли в основном 22–25 июля, а также 12–13 июля [6].

Авторами произведен анализ синоптической ситуации на Северном Кавказе и конкретно в Приэльбрусье по материалам Кабардино-Балкарского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды за наиболее селеопасный месяц – июль. С начала июля на территории наблюдался циклонический характер погоды, частое прохождение фронтов. Вдоль гор часто отмечался фронт окклюзии, с которым связано формирование протяженной зоны облаков и осадков, который часто возникает за счет смыкания холодных и теплых воздушных масс. 23 и 24 июля отмечено, что погода у Земли будет определяться ложбиной с юга и влиянием холодного воздуха с северо-запада. Ожидался кратковременный дождь, местами с перерывами. Следует отметить, что катастрофический селевой поток, вызванный прорывом оз. Башкара в 2017 г., был обусловлен сходной синоптической ситуацией, хотя в 2017 г. температура воздуха была значительно выше. Столкновение этих воздушных масс, как видно, всегда опасно для данной территории, оно часто приводит к опасной погодной ситуации и активизации оползневых и селевых процессов вместе с другими факторами.

Для уточнения оперативных прогнозов селей авторы в течение шести лет (2016–2021 гг.) ежедневно во время селеопасного периода вели наблюдения за условиями формирования селей в Приэльбрусье, прежде всего, за метеорологическими условиями, а также за изменением показателей космической погоды по данным [12, 14] и др.

На вероятность влияния всплесковых значений характеристик космической погоды авторы обратили внимание при ежегодных исследованиях

условий формирования селей в Приэльбрусье (после катастрофического селя 2000 г.) [2].

Основным фактором космической погоды в рассматриваемые годы является солнечный ветер. Это основной агент, посредством которого активные процессы на Солнце влияют на состояние околоземного пространства, геомагнитосферы и приповерхностной области Земли. Это дополнительный источник энергии при развитии опасных природных процессов. Посредством солнечного ветра происходит перенос импульса и энергии от Солнца к Земле и другим планетам. При изменении скорости и плотности этого потока меняется и давление, которое он оказывает на атмосферу Земли – оно то усиливается, то ослабевает. В некоторых случаях солнечная активность может влиять на возникновение циклонов, но в зависимости от начальной метеорологической обстановки. Основные параметры плазмы геоэффективного солнечного ветра вблизи орбиты Земли имеют следующие характерные значения: скорость 300–800 км/с и более; концентрация протонов в плазме солнечного ветра чаще всего $0,1\text{--}10,0\text{ см}^3$. Наибольшие амплитуды всплесков значений скорости солнечного ветра, достигающие до 1800 км/с и более, наблюдаются тогда, когда он истекает из корональных дыр – открытых магнитных конфигураций с расходимостью магнитных силовых линий [5, 8].

Далее представлены результаты исследований влияния космической погоды на проявление селей в Приэльбрусье. Используются материалы, размещенные в сети Интернет, в основном на сайтах [12, 14]. В первую очередь, это скорость солнечного ветра в околоземном пространстве и плотность протонов в нем. Установлено, что наиболее опасные метеорологические условия в Приэльбрусье для формирования селей в 2017 и 2019 гг., как отмечено ранее, сформировались при определенной активности Солнца.

Следует отметить, что влияние космической погоды может проявить себя только тогда, когда для него будут подготовлены земные природные условия, в значительной степени определяющие активность опасных природных процессов.

Прежде всего, следует отметить, что период 2016–2021 гг., особенно 2019 г., – это период солнечного минимума 24-го 11-летнего цикла солнечной активности. Подсчет солнечных пятен говорит о том, что это один из самых глубоких минимумов прошлого века. Магнитное поле Солнца стало слабым, что позволяет космическим лучам проникать в солнечную систему, по данным [3, 4] и сайта <http://spaceweather.com>.

На рис. 1 показано изменение скорости солнечного ветра за селеопасный период в наиболее селеопасные годы.

За указанные годы солнечная активность была наибольшей в 2017 г. (пятна на Солнце, с которыми связаны вспышки, магнитные бури). Именно в этом году наблюдалось катастрофическое проявление селей в ущелье Адыл-Су, связанное с прорывом оз. Башкара, сели в ущелье р. Герхожан-Су, которые были гляциальными. Хотя солнечный минимум в 2017 г. продолжал

развиваться, в начале июля на Солнце появилось большое пятно размером больше Юпитера. Это самое большое пятно в 2017 г. (по данным сайта <http://spaceweather.com>). В августе, когда пошли сели по р. Герхожансу, пятна снова появились. Резкое высвобождение энергии привело к солнечным вспышкам, протонным событиям [12].

Рис. 1. Изменение скорости солнечного ветра за период с 1 июня по 31 августа в 2017 и 2019 гг.

Результаты наблюдений в августе 2017 г. отражены в работе [5]. 12–13 августа скорость солнечного ветра составляла 540–600 км/с. 19 августа она доходила до 740 км/с. Далее в течение всего августа отмечались высокие значения скорости солнечного ветра и, особенно, плотности протонов. 30–31 августа скорость ветра доходила до 630 км/с, а плотность протонов в ночь с 31 августа на 1 сентября – от 21,7 до 52,6 ед/см³ [13, 14]. Уровень воды в озере упал примерно на 16,5 м, а объем прорывного паводка составил 1,1 млн м³ (800 тыс. м³ сброшено из озера) [9].

В 2018 г. активность Солнца была очень низкой. Пятен на нем в начале лета почти не было, практически не было вспышек, наблюдались отдельные корональные дыры и небольшие магнитные бури. Так, на сайте spaceweather.ru отмечена возможность возникновения магнитных бурь 2–3 июля. Эти процессы и способствовали формированию погоды в регионе и наводнению в долине р. Баксан в ночь с 4 на 5 июля. Очень сильная жара в конце июня и отсутствие

осадков практически в течение всего июня сменились обильным ливнем (44,8 мм) в ночь на 5 июля.

В 2019 г. активность Солнца была также очень низкой. За летний период не было ни одной вспышки выше минимального уровня, способного воздействовать на Землю, но отдельные всплески плотности протонов обеспечили метеорологические условия, при которых за один день прошли сели по многим водотокам.

В июле 2019 г. возмущения космической погоды начались 11 июля, резко увеличилась скорость солнечного ветра (почти до 600 км/с), 12 июля, по данным ГМС «Терскол», прошли аномальные осадки (48,8 мм), за этим последовало увеличение активности опасных процессов. Но массовая активизация оползней и селей в июле 2019 г. произошла позднее.

24 июля Земли достиг поток солнечного ветра из небольшой корональной дыры. В ночь на 22 июля произошло протонное событие. Плотность протонов резко увеличилась до 75 и выше от 10 ед/см³. Затем она уменьшилась до 50, а утром уже до 22 ед/см³. Все это дало дополнительный приток энергии, который вместе со всеми природными факторами способствовал активизации опасных геологических процессов.

Основываясь на изложенном, были рассмотрены показатели космической погоды за май–август 2020 г., т.е. за период подготовки и аномальной подвижки оползня Бузулган [1]. При этом использовались данные сайта spaceweather.com, где отмечается, что случилось в космосе. Так, 29 мая произошла первая в 2020 г. крупная вспышка на Солнце, относящаяся к классу М (находящемуся перед высшим классом Х). *Последний раз вспышка сравнимого уровня произошла в 2017 г.* непосредственно перед впадением светила в долгую, почти трехлетнюю «спячку». На следующий день отмечена «трещина» в магнитном поле Земли. Солнечный ветер проникает в магнитосферу. Произошли две вспышки класса М и две – класса С. Таких событий не было три года. Естественно, с подобными событиями связано поступление путем прорывной инъекции в район оползня Бузулган большого количества энергии, которое могло стать важнейшим фактором в развитии оползневого процесса.

2–3 августа Земля входит в поток быстродвижущегося солнечного ветра (более 500–700 км/с). Новое солнечное пятно появилось в понедельник 5 августа, добавляя энергии к ряду активных областей. Затем активность Солнца оставалась повышенной до конца августа. *Аномальная подвижка оползня Бузулган произошла 13–14 августа 2020 г.*

На основании рассмотренных данных, можно отметить, что аномальная подвижка оползня Бузулган летом 2020 г. не была случайной. Она произошла вследствие синергетического воздействия многих факторов, среди которых космическая погода могла иметь большое значение.

В 2021 г. характер активности Солнца начал меняться.

Так 3 июня отмечена вспышка на Солнце, максимальная по значению (Х1) причем впервые за четыре года. Специалисты отмечают, что 25-й

солнечный цикл начался. Однако различные события в этом году чаще происходят на обратной стороне Солнца и не оказывают очень большого влияния на развитие процессов на Земле, хотя это влияние в той или иной степени проявляется. В частности, после взрыва на Солнце 25 июля по данным ГМС «Терскол» в ночь на 27 июля выпали существенные осадки и сошел незначительный селевой поток в Приэльбрусье. *По-видимому, в ближайшие годы увеличение активности селей и других опасных природных процессов почти неизбежно, поскольку начавшийся солнечный 25-й цикл предположительно будет активным (по данным сайта spaceweather.com).*

Заключение

В настоящее время происходит рост повторяемости указанных погодных ситуаций из года в год, поэтому опасность формирования селей в Кабардино-Балкарской Республике и в целом на Северном Кавказе остается высокой. Для предупреждения негативных последствий указанных процессов необходимо проведение регулярных наблюдений в системе мониторинга, особенно в ближайшие годы в связи с увеличением опасности природных катастроф, связанных с погодными экстремумами. При ведении мониторинга должны быть определены пороговые критические значения метеорологических факторов, превышение которых с большой вероятностью может привести к формированию катастрофического селевого потока.

При составлении оперативных прогнозов селей необходимо давать оценку метеорологических условий во взаимодействии с инженерно-геологическими условиями, оценку синоптической ситуации и оценку изменения космической погоды. Для этого в опасный период целесообразно ежедневно пользоваться материалами указанных сайтов или других, отражающих изменения в активности Солнца.

Результаты наблюдений позволяют уточнять оперативные прогнозы селей от нескольких дней до недели, что необходимо для рационального ведения мониторинга. Хотя вопрос еще крайне недостаточно разработан, но имеющиеся фактические данные позволяют достаточно серьезно относиться к возможности использования характеристик космической погоды для составления и уточнения оперативных прогнозов селей и других опасных природных процессов. Фактические данные по солнечному ветру, помещенные в сети Интернет в открытом доступе на сайтах [12, 14] помогают оценить активность Солнца в конкретный момент.

Список литературы

1. Аномальная подвижка оползня Бузулган в долине р. Герхожан-Су (Центральный Кавказ) / М.Ю. Беккиев, М.А. Анаев, М.Д. Докукин,

- Р.Х. Калов, И.В. Мальнева, К.С. Висхаджиева // ГеоРиск. 2020. № 4. С. 44–54. <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-4-44-54>.
2. Гонсировский Д.Г. О возможном влиянии плазмы солнечных вспышек на возникновение гляциальных селевых потоков на Земле // Жизнь Земли. 2017. Т. 39. № 2. С. 147–154.
 3. Ишков В.Н. Космическая погода в 24 солнечном цикле и его особенности развития в 2017 г. // Сборник тезисов докладов тринадцатой конференции «Физика плазмы в солнечной системе». М.: ИКИ РАН, 2017. С. 297.
 4. Ишков В.Н. Солнечная активность в фазе минимума текущего цикла; определение момента минимума // Сборник тезисов докладов пятнадцатой конференции «Физика плазмы в солнечной системе». М.: ИКИ РАН, 2020. С. 12.
 5. Мальнева И.В. Прогнозирование современных геологических процессов на территории России и стран СНГ в начале XXI века // Геоэкология. 2019. Вып. 1. С. 87–98.
 6. Мальнева И.В., Докукин М.Д., Анаев М.А., Хаджиев М.М. Особенности погоды летом 2019 года на Северном Кавказе и проявления опасных геологических процессов // Материалы XV Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». М.: Геомаркетинг, 2019. С. 189–197.
 7. Перов В.Ф. Селевые явления. Терминологический словарь. М.: Московский университет, 1996. 33 с.
 8. Плазменная гелиогеофизика / Под ред. Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского. М.: Физматлит, 2008. Т. 1. 672 с.
 9. Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года / С.С. Черноморец, Д.А. Петраков, А.А. Алейников, М.Ю. Беккиев, К.С. Висхаджиева, М.Д. Докукин, Р.Х. Калов, В.М. Кидяева, В.В. Крыленко, И.В. Крыленко, И.Н. Крыленко, Е.П. Рец, Е.А. Савернюк, А.М. Смирнов // Криосфера Земли. 2018. Т. 22. № 2. С. 70–80.
 10. Селевые потоки 14–15 августа 2017 г. в бассейне р. Герхожан-Су (Центральный Кавказ): условия и причины формирования, динамика, последствия / М.Д. Докукин, М.Ю. Беккиев, Р.Х. Калов, М.М. Хаджиев, Е.М. Богаченко, Е.А. Савернюк // ГеоРиск. 2018. Т. 12. № 3. С. 82–94.
 11. Шеко А.И. Закономерности формирования и прогноз селей. М.: Недра, 1980. 296 с.
 12. Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца. ФИАН. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tesis.lebedev.ru/> (дата обращения: 20.10.2021).
 13. Real time solar wind. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.swpc.noaa.gov/products/real-time-solar-wind> (дата обращения: 20.10.2021).

14. Spaceweather.com [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://spaceweather.com/> (дата обращения: 20.10.2021).

I.V. Malneva¹, M.D. Dokukin¹, M.A. Anaev², R.Kh. Kalov¹, M.M. Khadzhiev¹

¹High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, malnir@mail.ru

²Main Directorate of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters for the Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, amaga0773@mail.ru

ACTIVITY OF DEBRIS FLOWS AND OTHER HAZARDOUS NATURAL PROCESSES IN KABARDINO-BALKARIAN REPUBLIC IN RECENT YEARS

Abstract. The results of studies of the influence of space weather on the manifestation of debris flows in the Elbrus region and the meteorological conditions of their formation according to the data of the Terskol meteorological station daily for 2016–2021 are presented. Also, it was used materials posted on the Internet, on sites spaceweather.com, tesislebedev.ru. First of all, it is the speed of the solar wind in near-Earth space and the density of protons in it. In this case, the debris flow process is considered as a multicomponent system, the main link in which is the energy continuously supplied from the Sun. It was found that the most dangerous meteorological conditions for the formation of debris flows in the Elbrus region were formed in 2017 and 2019 with a certain activity of the Sun. The most active year was 2017 (this year there was a catastrophic manifestation of debris flows in the Adyl-Su gorge, associated with the of Bashkara Lake outburst, also in the gorge of the Gerkhozhan-Su River. It is noted that the influence of space weather can manifest itself only when the terrestrial natural conditions are prepared for it, which largely determine the activity of hazardous natural processes. The results of the observations make it possible to refine the operational forecasts of debris flows from several days to a week, which is necessary for rational monitoring.

Key words: debris flows; space weather; solar wind; solar flares; proton density; forecast.

СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ»

**Брушков А.В.^{1,2}, Дроздов Д.С.³, Дубровин В.А.⁴, Железняк М.Н.⁵,
Осокин А.Б.⁶, Остарков Н.А.⁷, Садуртдинов М.Р.³, Сергеев Д.О.⁸,
Фролов К.Н.⁹**

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии,
г. Москва, brouchkov@geol.msu.ru

²Тюменский государственный университет, г. Тюмень

³Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, sciensec@ikz.ru

⁴ФГБУ «Гидроспецгеология», г. Москва, dva946@yandex.ru

⁵Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, fe@mpi.ysn.ru

⁶Филиал «Инженерно-технический центр» ООО «Газпром добыча Надым», г. Надым, osokinab@mail.ru

⁷Министерство по развитию Дальнего Востока и Арктики РФ, г. Москва, n.ostarkov@vostokgosplan.ru

⁸Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва, sergeevdo@mail.ru

⁹Министерство энергетики РФ, г. Москва, Frolov@rosenergo.gov.ru

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КРИОЛИТОЗОНЫ

Аннотация. Для создания государственной системы мониторинга криолитозоны необходима интеграция существующих сетей наблюдений, как фоновых, так и геотехнического мониторинга, с созданием межведомственного центра. Важна единая, унифицированная с международной, методика наблюдений, включающая определение параметров, необходимых для количественного прогноза состояния многолетнемерзлых грунтов. Мониторинг криолитозоны должен проводиться на стадии инженерных изысканий, проектирования и эксплуатации сооружений, а результаты прогноза ее состояния необходимо учитывать в проектных расчетах оснований и фундаментов и для обеспечения устойчивости зданий и сооружений при эксплуатации.

Ключевые слова: криолитозона; многолетнемерзлые грунты (ММГ); мониторинг; методика наблюдений; параметры мониторинга; прогноз состояния; геотехнический мониторинг (ГТМ).

Современное потепление необходимо учитывать при активном промышленном освоении Арктики. Изменение состояния верхних горизонтов криолитозоны, которая занимает 65% территории России [2] и определяет ключевые условия природной среды, экономической деятельности и жизни местного населения, вызовет потерю устойчивости оснований зданий и инженерных сооружений [1]. Только для Арктической зоны предполагаемый ущерб экономике может быть оценен к 2050 г. в 5–7 трлн руб. [4]. Новое строительство в ближайшие годы может значительно увеличить эти оценки.

Устойчивость криолитозоны к колебаниям климата или влиянию хозяйственной деятельности человека в процессе освоения зависит от температуры толщ, от содержания и распределения в них подземного льда. Анализ причин аварийности сооружений на многолетнемерзлых грунтах (ММГ), даже в условиях относительной стабильности теплового состояния

криолитозоны, свидетельствует, что доля криогенной составляющей в нештатных ситуациях составляет в среднем 30% [4]. Отечественный и зарубежный опыт освоения криолитозоны показал, что в условиях стабильных климатических условий ее территория может успешно осваиваться и быть надежным фундаментом для различных инженерных сооружений и коммуникаций при соблюдении определенных норм и правил, разработанных для этого периода времени [3]. Однако существующие нормы и правила не могут успешно применяться в эпоху климатических перемен, вне зависимости от направленности климатических процессов. Кроме того, действующие нормы проектирования [5] ограничивают наблюдения измерениями температур ММГ и деформаций сооружений, в то время как изменения поверхностных условий – характеристик снежного и растительного покрова, условий увлажнения, содержания воды в слое сезонного оттаивания в значительной степени определяют температурный режим грунтов и являются необходимыми для регулярных наблюдений и выполнения количественного прогноза температуры. Хорошо известно, что влияние на среднегодовую температуру ММГ снежного и напочвенных покровов, разности теплопроводности в талом и мерзлом состоянии грунтов, органического слоя почвы может достигать нескольких градусов. Наблюдения должны быть дополнены мониторингом развития мерзлотных процессов – термокарста, термоэрозии и других, для которых необходимо развитие количественных методов прогноза [3], позволяющих проектировщикам и эксплуатирующим предприятиям обеспечить безопасность различных объектов. Эти наблюдения, как и выполнение температурного прогноза и прогноза развития опасных мерзлотных процессов должны быть включены в действующие строительные правила и соответствующие рекомендации.

Существующая система геокриологического изучения, картирования, фоновое и геотехническое мониторинга (ГТМ) многолетнемерзлых толщ на территории Арктики в системе Министерства природных ресурсов и экологии РФ, Министерства науки и высшего образования РФ и РАН отстает от темпов ее освоения. Минстрой России практически не ведет систематических мониторинговых наблюдений в арктической криолитозоне. Это создает условия для развития опасных процессов и экологических катастроф. Сегодня по инициативе Минстроя Республики Саха (Якутия) в г. Якутске проводятся наблюдения за тепловым состоянием зданий и сооружений, что приносит непосредственные результаты и является эффективным методом обеспечения устойчивости оснований и фундаментов.

Изменения теплового состояния криолитозоны под влиянием климатических вариаций происходят на протяжении многих лет, но не достигли своего максимума, что значительно повысило риски в строительстве и недропользовании, возросли эпидемиологические и экологические угрозы на осваиваемых территориях. Возросшие техногенные нагрузки и нарушения условий эксплуатации привели к значительному росту деформаций зданий и

инженерных сооружений в Арктике, доля деформированных объектов достигает 40% и более; отмечается потеря несущей способности оснований даже недавно построенных зданий и сооружений, деформации автомобильных и железных дорог [4]. Средний расчетный срок службы многих городских, муниципальных зданий и промышленных сооружений в Арктике без реконструкции и капитального ремонта значительно превышен.

Сегодня положительный опыт ведения ГТМ есть на объектах ПАО «Газпром» и ПАО «НОВАТЭК» на севере Западной Сибири, у ПАО «Транснефть», на алмазных карьерах АК «АЛРОСА», на Вилюйской ГЭС и других объектах, где аварийность минимальна. Службам мониторинга на этих предприятиях в целом удается своевременно выявлять неблагоприятные ситуации и предотвращать их. Однако и там есть недостатки в анализе данных, выполнении количественного прогноза состояния криолитозоны и разработке эффективных методов управления температурным режимом.

Система фоновых геокриологических наблюдений представлена в различных ведомствах ограниченным числом стационаров и площадками периодического посещения, где наблюдения осуществляются в скважинах недостаточной глубины, оборудованных измерительной аппаратурой, не отвечающей современным требованиям. Неудовлетворительное финансирование мониторинговых работ в Арктике, как и во всей криолитозоне России, отсутствие единых требований к методике, техническим средствам, а также ведомственный подход к решению научных и хозяйственных задач резко снижают эффективность фонового мониторинга. Несмотря на то, что на объектах добывающих отраслей функционирует система ГТМ, уровень аварийности промышленных объектов и транспортных коммуникаций в целом по стране не достигает необходимых показателей. Недостатком является отсутствие в составе сети ГТМ фоновых площадок для контроля температур ММГ, динамики развития экзогенных процессов, гидрогеологического режима территории. Сеть ГТМ на промышленных объектах необходимо расширить за счет включения в лицензионные соглашения требований по созданию наблюдательной сети и последующей передачи мониторинговой информации в центр сбора. Эти требования должны быть поддержаны на законодательном уровне.

Необходимо объединить существующие сети наблюдений за криолитозонной РАН, Минобрнауки России, муниципалитетов северных городов, ПАО «Газпром», ПАО «Газпром нефть», ПАО «Транснефть», ПАО «НК «Роснефть»», ПАО «НОВАТЭК», ПАО «Россети» и других и создать комплексную межведомственную систему мониторинга. Однако ведомства и предприятия сегодня идут по пути создания отдельных сетей наблюдений ГТМ или для анализа теплового состояния мерзлых толщ в природных условиях. Создание сети лишь в природных условиях оставляет вне сферы мониторинга активно осваиваемые и застроенные территории и опасные процессы, непосредственно связанные с проблемами устойчивости зданий и сооружений

в Арктике. В крупных населенных пунктах температура грунтов отличается на 3–6°C от температуры в природных условиях.

Сегодня существует план Минприроды России, в котором создаваемый мониторинг включает фоновую его часть (и лишь «за термическим состоянием», исключая мерзлотные процессы) на основе действующей сети Росгидромета, со ссылкой на уже выполняющиеся институтами РАН международные программы TSP и CALM. Вместо решения важной государственной задачи предлагается лишь расширение существующей фоновой сети.

Однако, по авторитетному мнению авторов публикации, нельзя разделять мониторинг криолитозоны на отдельные составляющие (температура, мерзлотные процессы, основания зданий и сооружений, свойства грунтов и т.д.). Такой практики не существует и в мире. За рубежом геокриологический мониторинг проводится на базе научных и геологических организаций: в США и Канаде – Геологическими службами, в Швейцарии и Норвегии – университетами по государственным программам, в КНР – Академией наук совместно с предприятиями. В нашей стране многолетний опыт такого мониторинга имеют геокриологические научные учреждения и ряд производственных предприятий.

Авторская точка зрения заключается в том, что для организации государственного мониторинга криолитозоны необходимо наделение структуры, отвечающей за него, полномочиями, обеспечивающими создание в Арктике межведомственной системы мониторинга с интеграцией в нее сетей различных ведомств и предприятий, и соответствующими законодательными правами.

В качестве первого и необходимого шага для решения вопроса мониторинга, прогнозирования изменений и разработки эффективных методов стабилизации мерзлоты целесообразно подготовить пилотный региональный проект системы государственного межведомственного мониторинга криолитозоны в виде региональной системы мониторинга ММГ на критических объектах топливно-энергетического комплекса на базе отдельных субъектов РФ, где ММГ занимают значительную часть площади. Пилотными регионами по реализации этого проекта могут выступить Ямало-Ненецкий автономный округ, Ненецкий автономный округ, Красноярский край, Республика Саха (Якутия).

Список литературы

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.
2. Достовалов Б.Н., Кудрявцев В.А. Общее мерзлотоведение. М.: Изд-во МГУ, 1967. 404 с.

3. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях / А.В. Брушков, С.Н. Булдович, С.С. Волохов, Л.С. Гарагуля, И.А. Комаров, А.В. Кошурников, Э.З. Кучуков, Р.Г. Мотенко, Е.И. Несмелова, Е.Н. Оспенников, С.Ю. Пармузин, Г.П. Пустовойт, А.И. Тюрин, Е.П. Шушерина. М.: Геоинфо, 2016. 512 с.
4. Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании многолетнемерзлых грунтов в Арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века / В.П. Мельников, В.И. Осипов, А.В. Брушков, С.В. Бадина, Д.С. Дроздов, В.А. Дубровин, М.Н. Железняк, М.Р. Садуртдинов, Д.О. Сергеев, Н.А. Остарков, А.А. Фалалеева, Я.Ю. Шелков // Геоэкология. 2021. № 1. С. 14–31.
5. СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечноммерзлых грунтах.

**A.V. Brouchkov^{1,2}, D.S. Drozdov³, V.A. Dubrovin⁴, M.N. Zheleznyak⁵,
A.B. Osokin⁶, N.A. Ostarkov⁷, M.R. Sadurtdinov³, D.O. Sergeev⁸, K.N. Frolov⁹**

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, brouchkov@geol.msu.ru

²Tyumen State University, Tyumen

³Institute of the Earth Cryosphere, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tyumen, sciensec@ikz.ru

⁴Hydrospetchgeologia, Moscow, dva946@yandex.ru

⁵Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, fe@mpi.ysn.ru

⁶Engineering and Technical Center, Branch of Gazprom dobycha Nadym LLC, Nadym, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, osokinab@mail.ru

⁷Ministry for the Development of the Russian Far East and Arctic, Moscow, n.ostarkov@vostokgosplan.ru

⁸Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Moscow, sergeevdo@mail.ru

⁹Ministry of Energy of Russian Federation, Moscow, Frolov@rosenergo.gov.ru

PROBLEMS OF IMPLEMENTATION OF STATE PERMAFROST MONITORING SYSTEM

Annotation. Implementation of state permafrost monitoring system requires the integration of existing observation networks, both background natural and geotechnical monitoring, with the foundation of an interdepartmental center. What is important is a single, unified with the international, observation methodology, including the determination of the parameters necessary for quantitative forecast of the state of frozen soils. Permafrost monitoring should be carried out at the stage of survey, design, and operation of structures, and the results of its state forecast should be taken into account in design calculations of bases and foundations and to ensure stability of buildings and structures during operation.

Key words: permafrost; frozen soils; monitoring; observation methodology; monitoring parameters; state forecast; geotechnical monitoring.

Литовко А.В., Сыромятников И.И.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Lav_84@mail.ru, igor@mpi.ysn.ru

СОЗДАНИЕ МОНИТОРИНГОВОЙ СЕТИ НА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГЕ «НАМ»

Аннотация. Публикация посвящена результатам научно-методического геокриологического сопровождения работ Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, выполняемых в составе инженерно-геологических изысканий на отдельных проблемных (ключевых) участках автомобильной дороги «Нам» в Республике Саха (Якутия).

Ключевые слова: инженерно-геокриологический мониторинг; дорожные деформации; опытно-методический полигон; криолитозона; многолетнемерзлые грунты; наблюдательная площадка.

Введение

Многолетний опыт проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог в криолитозоне, к сожалению, не избавляет дорожные службы от проведения ремонтных работ в результате многочисленных случаев деформаций этих объектов, зачастую аварийного характера, связанных с криогенными процессами и явлениями. Дополнительную напряженность ситуации вызывает прогнозируемое на ближайший период времени многими учеными и специалистами глобальное изменение климата, что обязывает уже сейчас обеспечивать надежность сохранения мерзлого состояния грунтов оснований при наступлении подобных неблагоприятных воздействий. В этой связи значительно повышается роль инженерно-геокриологического мониторинга как критерия надежности и безаварийной эксплуатации геотехнических систем в криолитозоне.

Важным для организации мониторинга состояния автомобильных дорог является выбор ключевых участков, на которых он должен проводиться. При этом выделение только дефектных, неустойчивых и деформирующихся объектов не способствует правильному выбору всех потенциально опасных мест. В первую очередь это важно для потенциально опасных участков пути, которые проходят по территориям, где развиты неблагоприятные геологические процессы и явления. На них необходимо проводить мониторинг в первую очередь. Перспективным для такого инженерно-геокриологического мониторинга являются аэрокосмические методы, охватывающие большие по площади прилегающие территории. При этом на такие протяженные участки пути должны составляться не паспорта, а, по мнению авторов публикации, карты, используя геоинформационные системы.

Объекты и методика исследования

Район работ расположен в центральной Якутии и в административном отношении охватывает территорию г. Якутска и Намского района Республики Саха (Якутия). Район работ, согласно приложению Б СП-11-105-97 (Часть IV) [3], относится к 3-й категории сложности инженерно-геологических условий.

Исследуемая автомобильная дорога III технической категории относится к дорогам территориального значения с усовершенствованным покрытием. Участок проложен в I дорожно-климатическом районе зоны многолетней мерзлоты согласно ВСН 84-89 [1]. Данный по характеристике типа местности по увлажнению район проложения трассы относится ко 2-му типу.

По результатам рекогносцировочных инструментальных исследований по трассе автомобильной дороги «Нам» для создания опытно-экспериментальных полигонов были выбраны два ключевых участка под дальнейшие мониторинговые наблюдения за температурно-влажностным режимом грунтов оснований. Выбор этих участков определялся тем, что они характеризуют разные типы мерзлотных ландшафтов и имеют сложные инженерно-геокриологические условия с развитием криогенных процессов и их воздействием на автодорогу (рис. 1).

Рис. 1. Мерзлотно-ландшафтная карта автодороги «Нам»

Участки Н-1 на 36,5–38,5 км и Н-2 на 49,5–51,5 км (рис. 2, а, б) автодороги «Нам» расположены в пределах приводораздельной поверхности с абсолютными отметками в среднем 200–230 м на денудационно-аккумулятивной равнине левобережья р. Лена. Представлен межаласным и аласным типом местности. На межаласьях в основном произрастают березово-лиственничные леса с кустарничково-моховой растительностью. А аласы здесь не столь полно выражены, с относительной глубиной, не превышающей 3–4 м, как в других районах Центральной Якутии, однако в целом ландшафтоформирующие процессы тех или других являются идентичными. В их днищах часто встречаются многолетние бугры пучения (булгунняхи). Термокарстовые котловины, образованные при локальном вытаивании толщ ледового комплекса, представлены озерными, озерно-болотными отложениями в сочетании со специфическими аласными осадками, представляющими самостоятельный тип отложений голоценового возраста [2]. Данный комплекс четвертичных отложений имеет небольшую мощность. На аласах произрастают разнотравно-злаковые луга.

а

б

Рис. 2. Фотографии ключевых участков автодороги «Нам»: а – на 36,5–38,5 км;
б – на 49,5–51,5 км

Полигональный бугристо-западинный термокарстовый микрорельеф встречается на поверхности межаласной равнины, на участках сведения лесного покрова. Особенно он характерен по периферии термокарстовых котловин. Полигонально-трещинный микрорельеф локально отмечается в увлажненных местоположениях днищ долин ручьев, междурядовых низин и аласов. В лесах широко распространен мелкобугристый микрорельеф. Солифлюкционные формы характерны в основном для пологих склонов, особенно в их нижней части. Эрозионные формы представлены ложбинами стока. На склонах вдоль дорог имеют место процессы оврагообразования. Криогенные процессы (термокарст и морозное пучение) широко развиты на нарушенных участках вдоль автодороги.

Во время проведения инженерно-геологических изысканий автодороги «Нам» подземные льды были вскрыты на ключевом участке, который расположен на 50 + 950 км автодороги.

В результате рекогносцировочного маршрута этот участок был выбран в качестве ключевого по внешним признакам проявления отложений ледового комплекса. Основные признаки развития ледового комплекса, которые наблюдаются на этой территории: полигональный рельеф, термокарстовые озера, морозобойные трещины, просадочные формы рельефа, заболачивание территории.

На момент проведения буровых работ мощность сезонно-талого слоя (СТС) в теле насыпи автодороги составила около 1 м. По данным лабораторных испытаний суммарная влажность грунтов СТС варьируется от 0,26 до 0,39 д.ед.

Результаты и их обсуждение

Таким образом, в результате сопоставления буровых колонок и полученных ранее данных геофизических исследований, включая глубинные геоэлектрические интерпретационные разрезы можно сделать вывод о том, что подземные льды здесь распространены на межаласных мерзлотных ландшафтах, где развиты сообщества березово-лиственничных лесов. А на ландшафтах с аласными лугами и термокарстовыми понижениями подземные льды не сохранились. Также по анализу амплитуды, фазы и формы отраженных сигналов от границы СТС можно характеризовать тело автомобильной дороги до глубины 2,5 м. Кровля многолетнемерзлых толщ залегает на глубине 1,9 м, подошва при бурении не подсечена. На глубине 10 м температура грунта – 1,5°C. Характер кривой показывает, что глубже 10 м, температура грунтов понижается.

Основной причиной деформации земляного полотна и твердого дорожного покрытия на участке можно считать деградацию линз подземного льда в его основании при неравномерном залегании кровли многолетнемерзлых грунтов. И в качестве рекомендаций предлагается устранить растепление слабльдистых грунтов в основании, путем использования вяжущих материалов для организации укрепления приподошвенной зоны земляного полотна.

Участок Н-2 расположен на 49,5–51,5 км автодороги «Нам» в аналогичных условиях, что и участок Н-1. Этот участок находится на границе межаласного и склонового делювиально-солифлюкционного типов местности. Здесь преобладают сообщества лиственничных и березово-лиственничных лесов с кустарничково-моховым покровом. На территории ключевого участка распространены термокарстовые озера вблизи автодороги, активно развиваются процессы заболачивания и обводнения территории. На участке отмечаются деформации (просадки) поверхности дорожного полотна.

В результате проведения буровых работ было выявлено, что на ключевом участке Н-2 распространены отложения ледового комплекса, которые представлены толщей суглинков серо-коричневого цвета с повторно-жильными льдами. По данным бурения мощность этих отложений варьирует от 5,0 до 7,3 м. Ниже толщи ледового комплекса залегает пачка переслаивания песков разной крупности (от мелкозернистого до гравелистого). Пески находятся в твердомерзлом состоянии, криогенная текстура массивная.

Таким образом, основной причиной деформации автомобильной дороги, является деградация высокольдистых грунтов оснований в результате чего происходит деформация верхнего строения дороги с образованием провалов и трещин. Представляется необходимым принять следующий комплекс мер для устранения сложной ситуации, вызванной наличием высокольдистых грунтов в основании.

1. Для охлаждения грунтов основания применить бермы и оборудовать сезонно-охлаждающие устройства по нижним границам откосов для стабилизации мерзлого состояния грунтов основания насыпи.

2. Использовать вяжущие материалы для организации укрепления приподошвенной зоны земляного полотна.

Заключение

Приведенные результаты инженерно-геокриологических исследований на ключевых участках автомобильной дороги «Нам» по выявлению причин деформаций и предложенные группы мероприятий, несомненно, позволят выбрать оптимальные решения на данном этапе исследований. Однако следует учесть и то, что полученные результаты исследований о состоянии автомобильной дороги в зимний период могут существенно повлиять на окончательное обоснование их применения.

Авторы на основании многолетнего опыта работы считают, что предложенные мероприятия должны пройти проверку на ключевых участках в течение двухлетнего цикла. В этот период, для наблюдения за поведением предложенных проектных решений в конкретных природных условиях на ключевых участках необходимо проводить инженерно-геокриологический мониторинг.

В результате из опытно-экспериментальных они могут быть переведены в ранг типовых для природных условий, в которых функционируют автодороги в зоне сплошного развития криолитозоны в Дальневосточном округе РФ.

Список литературы

1. ВСН 84-89 Изыскания, проектирование и строительство железных дорог в районах распространения вечной мерзлоты.

2. Катасонов Е.М. Криолитогенные отложения, их мерзлотно-формационные комплексы // Проблемы геокриологии: сб статей / Под ред. П.И. Мельникова. М.: Наука, 1983. С. 162–169.
3. СП-11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов.

A.V. Litovko, I.I. Syromyatnikov

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, lav_84@mail.ru, igor@mpi.ysn.ru

DEVELOPING A MONITORING NETWORK ON THE “NAM” HIGHWAY

Abstract. This publication summarizes the results of scientific and methodological geocryological investigations conducted in support of engineering-geological surveys by the Melnikov Permafrost Institute at key problem sections of the “Nam” highway in the Republic of Sakha (Yakutia).

Key words: engineering and geocryological monitoring; road deformations; observation and monitoring sites; cryolithozone; permafrost; observation platform.

Юров Ф.Д.

МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии,
г. Москва, fdiurov@gmail.com

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ В КРИОЛИТОЗОНЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

Аннотация. Проведены комплексные полевые исследования, показаны результаты численного моделирования свойств мерзлых грунтов для ряда регионов Арктики (городов Воркута и Норильск, севера Западной Сибири, архипелага Шпицберген) и прогноз состояния транспортной инфраструктуры в изменяющихся условиях. Исследования показали, что в выбранных регионах степень воздействия различных криолитологических факторов на устойчивость транспортных систем имеет разный вес. На архипелаге Шпицберген наибольшую опасность представляют осадки сильнольдистых грунтов при оттаивании, стимулированном за счет антропогенного подтопления. На территории Воркутинского промышленного района, где наблюдается активная деградация исходно «слабой» мерзлоты – осадки грунта, развитие термоэрозии. Для севера Западной Сибири основной опасностью является морозное пучение, заболачивание, термоэрозия. В Норильском промышленном районе активно действуют термокарст, склоновые процессы, и «холодные» криогенные процессы. **Ключевые слова:** транспортная инфраструктура; климатические изменения; деформации; криогенные процессы; устойчивость.

Введение

В условиях современных изменений климата, фиксирующихся в северных регионах, объекты транспортной инфраструктуры (дороги, трубопроводы, инженерно-технические коммуникации и др.) являются наиболее уязвимыми к возникновению деформаций. Это обусловлено, в первую очередь, непрерывностью и значительной протяженностью таких объектов, что не позволяет избежать участков с неблагоприятными условиями при проектировании и строительстве. Кроме того, многие из линейных объектов изменяют условия среды в полосе своего непосредственного воздействия, что также часто является причиной возникновения массовых деформаций.

Объекты исследований

Для исследования региональной специфики устойчивости объектов транспортной инфраструктуры в условиях меняющихся климатических и мерзлотных условий было выбрано четыре «ключевых» региона: о-в Западный Шпицберген (г. Лонгйирбиен), Воркутинский район, Ванкорский комплекс месторождений (в т.ч. трасса магистрального нефтепровода «Ванкор–Пурпе») и Норильский промышленный район.

Результаты и обсуждение

Полевые наблюдения и анализ литературных публикаций позволили определить основные причины деформаций линейных объектов и комплекс опасных экзогенных процессов, угрожающих состоянию литотехнической системы (ЛТС), в выбранных опорных регионах.

Архипелаг Шпицберген является «лидером» по скорости потепления среди выбранных автором районов, тренд к увеличению температуры воздуха в г. Лонгйире за последние 30 лет составил $0,101^{\circ}\text{C}$ в год [4]. Вслед за изменением атмосферных параметров происходит и рост температуры мерзлых толщ на уровне нулевых годовых колебаний, текущий тренд отепления составляет $0,04^{\circ}\text{C}$ в год. Однако, на архипелаге Шпицберген для мерзлоты характерны очень низкие температуры (от $-2,6$ до $-5,2^{\circ}\text{C}$ по данным измерений на стационарах в непосредственной близости от г. Лонгйир), поэтому уровень деформированности линейных систем в настоящее время относительно невысок.

Литотехническая система в г. Лонгйир представлена автомобильными дорогами и санитарно-техническими коммуникациями. Городские коммуникации проложены надземным способом, во избежание помех движению транспорта трубопроводы пропускаются под насыпями дорог через существующие водопропускные сооружения (гофрированные трубы). Основной проблемой для ЛТС на архипелаге Шпицберген является техногенное подтопление вдоль насыпей дорог в период активного снеготаяния (рис. 1, а, б), вызванное неграмотным размещением водопропускных сооружений и совмещением их с пропуском инженерно-технических коммуникаций под насыпями дорог, что еще сильнее затрудняет сток поверхностных вод. Обследование дорожного полотна при помощи лазерного сканирования [6] показало, что в местах подтопления формируются очаги осадок дорожного покрытия и просадок грунтов на обочинах.

а

б

Рис. 1. Подтопление вдоль насыпей дорог на архипелаге Шпицберген, вызванное недостаточной проработанностью водопропускных сооружений. Фото автора, май 2018 г.

На территории Воркутинского района, где тренды к изменению температур воздуха и мерзлых грунтов не велики относительно архипелага Шпицберген и территории Ванкорского месторождения (увеличение температур на 0,026 и 0,018°C для воздуха и грунтов, соответственно) [2, 3], отмечается максимальный уровень деформированности объектов линейной инфраструктуры. На территории города фиксируются обширные просадки грунтов под дорожным покрытием, вызванные деградацией высокотемпературных сильнольдистых суглинистых отложений (наиболее обширные деформации дорожного покрытия наблюдаются на бульваре Пищевиков (рис. 2, а, б)). Помимо деформаций дорожного покрытия, наблюдаются просадки опор надземных трубопроводов (на б-р Пищевиков и в районе шахты Воркутинская), вызванные резким снижением несущей способности оттаивающего грунта.

а

б

Рис. 2. Просадки дорожного покрытия на б-р Пищевиков, г. Воркута. Фото автора, август 2018 г.

Массовые деформации транспортных объектов в г. Воркута не соотносятся с достаточно слабыми трендами к потеплению климата в природных условиях. Это можно объяснить тем, что на территории города ключевым фактором изменения как микроклиматических, так и геокриологических характеристик является антропогенное воздействие. Деградация высокотемпературных мерзлых грунтов в г. Воркута обусловлена изменением естественных условий теплообмена атмосфера–поверхность (удаление растительных покровов, в первую очередь, мохового; перераспределение снега и формирование снегоотвалов при снегоочистке и т.д.) и формированием «острова тепла» на территории города. Еще одной проблемой ЛТС на территории Воркутинского района является использование в качестве материала для насыпей автомобильных дорог перегоревшей породы из отвалов. Этот материал показал себя крайне устойчивым к размыву.

Анализ устойчивости ЛТС Ванкорской группы месторождений и магистрального нефтепровода (МНП) «Ванкор – Пурпе» показал, что, несмотря на достаточно высокие тренды к увеличению температур воздуха и мерзлого грунта, линейные объекты месторождения находятся в стабильном состоянии и не испытывают значительных деформаций. Вдоль трассы МНП, внутрипромысловых трубопроводов и дорог наблюдаются действие экзогенных процессов, представляющих опасность для техногенных объектов: термокарст, морозное пучение, морозобойное растрескивание, заболачивание, подтопление опор трубопровода, эрозионные процессы и т.д. Максимальное развитие заболачивания и подтопления отмечается на участке наземной прокладки МНП «Ванкор–Пурпе». Воздействием эрозионных процессов затронут газопровод «Сузун – Ванкор», сооруженный наземным способом, где защитная обваловка трубы во многих местах полностью размыва.

Тренды к повышению температур воздуха и отеплению мерзлой толщи, фиксирующиеся на данной территории в настоящее время, не оказывают значительного негативного воздействия на устойчивость ЛТС. Это связано, в первую очередь, с активным применением систем термостабилизации грунтов не только на площадках, но и вдоль трасс трубопроводов. Однако, визуальное обследование трассы МНП выявило плохое состояние сезонно-охлаждающих устройств (СОУ) (происходит выпучивание термостабилизаторов, их коррозия, разрыв защитных гильз, на некоторых СОУ отсутствуют защитные колпачки и т.д.). Было проведено численное моделирование несущей способности вмерзшего свайного фундамента, которое показало, что в случае прекращения работы систем термостабилизации современные тренды к увеличению температур воздуха и грунтов могут привести к колоссальным потерям несущей способности (порядка 30%) в ближайшие 30 лет.

В Норильском промышленном районе, где фиксируются наименьшие тренды к увеличению температур воздуха и грунта (0,01 и 0,005°C соответственно), на ЛТС действует целый комплекс опасных процессов. Значительная расчлененность рельефа предрасполагает к развитию целого комплекса склоновых (в т.ч. криогенных) процессов. Один из них – формирование на склонах г. Рудная техногенного каменного глетчера (ТКГ), материалом для которого послужили отвалы рудника «Медвежий ручей». Движение ТКГ вниз по склону привело к разрушению водовода, автомобильной дороги [1, 2]. Грунтовые дороги и откосы насыпей крупных автодорог подвергаются разрушению процессом солифлюкции. В условиях горного рельефа (Талнахский район, рудник «Медвежий ручей») происходит сход лавин, которые негативно влияют на дорожные системы. Особенную опасность представляют сходящие в конце весеннего периода (в апреле-мае) снежно-водо-ледовые лавины.

В силу суровости климата Норильского промышленного района (в первую очередь, низких зимних температур) ЛТС подвергаются воздействию морозобойного растрескивания и морозной деструкции материалов [5]. Эти

процессы можно назвать отчасти техногенно стимулированными, т.к. необходимое для их развития переохлаждение поверхности дорожного покрытия достигается в результате постоянной снегоуборки в зимний период.

Рис. 3. Образование морозобойной трещины на дорожном полотне в районе п.г.т. Купец.
Фото В.А. Толманова, сентябрь 2017 г.

Отмечается широкое развитие термокарста по сильнольдистым отложениям (таким как аллювиальные глины или суглинки) и при вытаивании пластовых льдов. Деформации, возникающие в результате действия этих процессов, могут проявляться как в виде непосредственной просадки дорожного покрытия, так и откосов дорожных насыпей. Наиболее широко распространенные на Вальковской равнине и трассе «Норильск–Дудинка», они представляют опасность для ЛТС на территории Норильского района.

Заключение

В выбранных для исследования регионах воздействие различных факторов на устойчивость ЛТС имеет разный вес. В условиях гористого рельефа и сильнольдистых грунтов архипелага Шпицберген наибольшую опасность для линейных техногенных систем представляют склоновые и нивально-гляциальные процессы, осадки грунтов (в т.ч., стимулированные за счет антропогенного подтопления). В районе г. Воркуты – деградация мерзлых толщ, осадки оттаивающего грунта и, как следствие, неравномерные деформации дорожных покрытий и трасс трубопроводов, развитие термоэрозионных процессов. На Ванкорском месторождении и трассе МНП

«Ванкор–Пурпе» основной проблемой является морозное пучение и активизация опасных природных процессов (заболачивание, термоэрозия и т.д.) в результате изменения природной среды при строительстве и эксплуатации объектов. В Норильском промышленном районе активно действуют термокарст, склоновые процессы, снежно-водно-ледовые потоки, морозная деструкция материалов.

Только исследование и учет региональной специфики позволят правильно выбрать методы обеспечения устойчивости и защиты линейных техногенных систем в условиях криолитозоны.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 20-35-90009 «Особенности воздействия опасных криогенных процессов на транспортную инфраструктуру Арктического региона».

Список литературы

1. Гребенец В.И., Юров Ф.Д., Толманов В.А., Хайрединова А.Г. Формирование техногенных каменных глетчеров из отвалов породы в горнодобывающих районах // Сергеевские чтения, Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии «Эколого-экономический баланс природопользования в горнодобывающих регионах». М.: Изд-во РУДН, 2019. Т. 21. С. 394–400.
2. Павлов А.В. Тренды современных изменений температуры почвы на Севере России // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 3. С. 22–27.
3. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, R.K. Pachauri, L.A. Meyer (eds.). Geneva: IPCC, 2015. 151 p.
4. Climate in Svalbard 2100 – a knowledge base for climate adaptation: NCCS report No. 1/2019 / I. Hanssen-Bauer, E.J. Førland, H. Hisdal, S. Mayer, A.B. Sandø, A. Sorteberg (eds). Oslo: The Norwegian Centre for Climate Services, 2018. 203 p.
5. Grebenets V., Rogov V., Iurov F. Cryogenic weathering (destruction) of construction material in the arctic cities // Proceedings of the International Conference “Solving the puzzles from cryosphere”. Pushchino: No publ., 2019. P. 164–166.
6. Iurov F., Marcheno N. Laser scanning as a tool for monitoring road deformations in Svalbard // Proceedings of the 25th International Conference on port and ocean engineering under Arctic conditions (POAC 2019). Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2019. 166 p.

F.D. Iurov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, fdiurov@gmail.com

REGIONAL FEATURES OF THE BEHAVIOR OF TRANSPORT SYSTEMS IN THE CRYOLITHOZONE UNDER CLIMATE CHANGE

Abstract. Complex field studies, numerical modeling of the properties of frozen soils for a number of regions of the Arctic (Vorkuta, Norilsk, North West Siberia, Svalbard) and a forecast of the state of transport infrastructure in changing conditions were carried out. Studies have shown that in selected regions, the degree of impact of various cryolithological factors on the stability of transport systems has a different weight. On the Svalbard the greatest danger is settlement of heavy-ice soils during thawing, stimulated by anthropogenic flooding. In the Vorkuta – uneven deformation of linear objects during soil settlement, thermal erosion processes. For the North of Western Siberia, the main danger is frost heaving, waterlogging, thermal erosion. Thermal karst, slope processes, and “cold” cryogenic processes are actively operating in the Norilsk industrial region.

Key words: transport infrastructure; climatic changes; deformations; cryogenic processes; sustainability.

Сотникова К.С.¹, Маслаков А.А.¹, Грибовский Г.В.²

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии,
г. Москва, ks.sotnikova25@gmail.com, Alexey.maslakov@geogr.msu.ru

²ООО «НТЦ Симмэйкерс», г. Москва, info@simmakers.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ПОДЗЕМНОГО ХРАНИЛИЩА ВОСТОЧНОЙ ЧУКОТКИ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

Аннотация. Деградация многолетнемерзлых пород (ММП) ухудшает геокриологическую обстановку в районах Крайнего Севера. Подземные хранилища, обустроенные в ММП, находятся в неустойчивом состоянии из-за изменения геокриологической обстановки. Мониторинг и моделирование теплового режима ММП подземных хранилищ поможет оценить влияние прогнозных климатических изменений и эффективность различных профилактических мероприятий по поддержанию устойчивости данных хранилищ.

Ключевые слова: подземные хранилища; многолетнемерзлые породы; геокриологический мониторинг.

Многолетнемерзлые породы (ММП) – один из самых чувствительных к климатическим изменениям компонентов природной среды. В то же время, это ценный ресурс, позволяющий сохранять пищевые продукты длительное время при отрицательных температурах. Коренные жители Севера, проживающие в криолитозоне веками, научились использовать «вечную мерзлоту» в хозяйственных и селитебных целях.

В последние десятилетия идет интенсивное повышение температуры и деградация кровли ММП, что ухудшает геокриологическую обстановку на застроенных территориях. Мониторинг и моделирование геокриологических условий являются эффективными инструментами для обоснования мер по смягчению негативных последствий, связанных с деградацией мерзлоты.

Лёдник – это один из видов сооружений, представляющий собой тоннель и/или помещения, выкопанные в мерзлой толще, которые используются в качестве естественного охлаждения для хранения продуктов [5]. В качестве синонима также используется слово «погреб» [2]. Конструкции лёдников и особенности их эксплуатации варьируются в зависимости от региона, в котором климатические условия и природные ландшафты определяют тип лёдника. Такой способ хранения и ферментации пищевых продуктов широко используется во многих регионах криолитозоны мира, в особенности, на территории Якутии [6], Аляски [8] и Чукотки [5]. На сегодняшний день многие лёдники находятся в неустойчивом состоянии, часть из них разрушается [5]. Существует ряд факторов, которые могут негативно влиять на их устойчивость: глобальное потепление, высокая льдистость и засоленность отложений, близость к разливающимся рекам или побережью, влияние городского развития на местную гидрологию и приближенность к другим типам инфраструктуры [7, 8]. Глобальное потепление климата делает геокриологический прогноз одним

из важных составляющих оценки динамики изменений температуры ММП. Главным последствием потепления является трансформация природно-технических систем криолитозоны [3]. Это может вызвать повышение температуры ММП, что способно стать причиной их деградации. Именно поэтому мониторинг и поддержка, в т.ч. и моделирование тепловых условий пород, играют особую роль в сохранении рабочего состояния подземных хранилищ [1]. Данная работа посвящена созданию компьютерной модели теплового режима мерзлых пород для крупнейшего подземного хранилища пищевых продуктов на Восточной Чукотке (возможно, и во всем регионе) – в селе Лорино Чукотского муниципального района.

Лёдник в с. Лорино был построен в 1950-х гг. для сохранения мяса в помещениях хранилища в течение длительного периода с целью прокорма полярных песцов на местной звероферме. Именно поэтому для данного лёдника разработана специальная конструкция. Подземное хранилище представляет собой тоннель-коридор с боковыми галереями и комнатами, вырытыми в останце морской террасы с относительной высотой 15–20 м. Общая протяженность лёдника составляет 159 м, что делает его примерно на 50 м длиннее знаменитого Permafrost Tunnel на Аляске в окрестностях г. Фэрбанкс [8]. Тоннель прямой, однако в середине делает излом на 130 градусов (рис. 1). Общее количество комнат хранилища – 17, 15 из которых расположены в виде ответвлений тоннелей, а два другие являются тамбурами юго-восточного тоннеля. Размеры комнат варьируются и составляют от 6 до 66 м². Северо-западный коридор оканчивается дверью, которая обеспечивает вентиляцию в зимнее время. Юго-восточный тоннель оканчивается системой двойных дверей, после которых расположена система тамбуров и вспомогательных помещений, которые также разделены дверьми [5].

Рис. 1. Ортофотоплан лёдника с. Лорино в 2020 г. Красная линия – направление главных тоннелей

Одной из особенностей эксплуатации данного типа хранилища являются зимние проветривания помещений для поддержания низких отрицательных температур с помощью вентиляции в январе, феврале и марте [5].

В данной работе для выполнения расчетов и построения компьютерной модели в трехмерном пространстве был использован программный комплекс Frost 3D [9]. Программа позволяет производить расчет нестационарных процессов теплопередачи в ММП с учетом влияния внешних тепловых воздействий. В ходе реализованной математической модели происходит численное решение уравнения теплопроводности с использованием метода конечных разностей [4].

Кроме трехмерной геологической модели, также одними из основных входных данных являются теплофизические свойства пород и граничные условия на поверхности породы и ледника. Необходимые свойства материалов были получены во время полевых наблюдений за последние годы и из двух технических отчетов Чукотского комплексного отдела СевВостТИСИЗ «Корректировка проекта планировки и застройки с. Лорино – центральной усадьбы совхоза им. Ленина Чукотского района» (1979), «Пункт по переработке и утилизации продуктов морских млекопитающих в с. Лорино» (1984). Всего на объекте было выделено пять инженерно-геокриологических элементов (ИГЭ) (рис. 2): торф с супесью (ИГЭ 1); насыпной гравийный грунт (ИГЭ 2); песок среднезернистый сильнольдистый (ИГЭ 3); песок среднезернистый с галькой (ИГЭ 4); глина серая слабольдистая засоленная (ИГЭ 5).

Рис. 2. Трехмерная модель на этапе работы в Редакторе 3D ПО Frost 3D. Выполнила К.С. Сотникова

Для задания граничных условий на границах порода–воздух и тоннель–порода необходимы данные о климатических параметрах. Значения температуры воздуха и высоты снежного покрова были взяты с метеостанции Уэлен, которая находится на северо-востоке Чукотского п-ова в 114 км к

северо-востоку от с. Лорино. Данные были осреднены за период с 2014 по 2019 гг., т.к. на этот временной промежуток имеется ряд непрерывных наблюдений за температурой воздуха внутри ледника [5]. Для описания граничных условий использовались средние значения за каждые две недели для температуры воздуха и высоты снежного покрова.

Внутри подземного хранилища круглогодично находятся несколько логгеров марки Noboware, которые помогают определить его температурный режим. Средняя зимняя температура внутреннего воздуха в погребе колеблется от $-4,8$ до $-6,2^{\circ}\text{C}$. Более холодные температуры происходят ближе к центральной вертикальной шахте в погребе, где температура может упасть до -20°C , когда происходит вентиляция. Средние летние температуры внутри холодильных камер обычно варьируются от $-3,5$ до $-4,0^{\circ}\text{C}$, а иногда достигают $-1,0$ до $-2,0^{\circ}\text{C}$ [5]. Данные о тепловом режиме внутри хранилища использовались для описания граничного условия тоннель-порода.

Размеры расчетной области составляли 143×83 м, а глубина модели была равна 33 м. Размеры конечно-разностной сетки составили 6 млн 350 тыс. узлов. Расчетный период был задан начиная с 2014 по 2019 гг., чтобы произвести стабилизацию термических условий. Результаты моделирования теплового режима сохранялись на 15-е число каждого месяца.

Благодаря правильному подбору граничных условий с учетом проветривания в холодные месяцы (январь, февраль, март) на расчетных областях теплового распределения видно, что температура грунтов помещений и коридоров хранилищ отрицательная в течение всего года и колеблется от -2 до -5°C (рис. 3). Наиболее низкие температуры наблюдаются в месяцы проветривания ледника, наиболее высокие – в осенние месяцы. Температура мерзлых пород, окружающих ледник, но не находящихся под его тепловым воздействием, составляет -3°C , что близко к данным по режиму мерзлых пород моделируемой территории.

Рис. 3. Участки моделирования температурного поля в программе Frost 3D на 15 марта 2019 г.: а – трехмерная модель разреза по длине тоннеля ледника; б – вид сверху, двумерный разрез через помещения ледника

Таким образом, с помощью обработки климатических и геологических данных посредством программного комплекса Frost 3D было выполнено моделирование теплового режима ледника. Полученные данные близки к фактическим данным, собранным на месте расположения объекта, что может говорить о корректности составленной модели, выполнении цели работы и возможности составления дальнейшего прогноза теплового режима такого типа хранилищ с учетом трендов глобального потепления и изменения режимов проветривания ледника.

Список литературы

1. Влияние квазистационарного температурного состояния геотехнических систем дорожных насыпей в криолитозоне на активность криогенных процессов / В.А. Исаков, В.И. Гребенец, В.В. Фуникова, В.А. Бабенко, Д.И. Исакова // Инженерная геология. 2020. Т. 15. № 4. С. 54–67. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2020-15-4-54-67>.
2. Мельников В.П., Федоров Р.Ю. Роль природных криогенных ресурсов в традиционных системах жизнеобеспечения народов Сибири и Дальнего Востока // Вестник Томского государственного университета. 2018. № 426. С. 133–141.
3. Павлов А.В., Перлыштейн Г.З., Типенко Г.С. Актуальные аспекты моделирования и прогноза термического состояния криолитозоны в условиях меняющегося климата // Криосфера Земли. 2010. Т. 14. № 1. С. 3–12.
4. Самарский А.А. Теория разностных схем. 3-е изд. М.: Наука. 1989. 616 с.
5. Community ice cellars in Eastern Chukotka: climatic and anthropogenic influences on structural stability / A.A. Maslakov, K.E. Nyland, N.N. Komova, F.D. Yurov, K. Yoshikawa, G.N. Kraev // Geography, Environment, Sustainability. 2020. Vol. 13, No. 3. P. 49–56. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2020-71>.
6. Shur Y., French H.M., Bray M.T., Anderson D.A. Syngenetic permafrost growth: cryostratigraphic observations from the CRREL tunnel near Fairbanks, Alaska // Permafrost and Periglacial Processes. 2004. Vol. 15. No. 4. P. 339–347.
7. Traditional ice cellars (Lednik, Bulus) in Yakutia: characteristics, temperature monitoring, and distribution / K. Yoshikawa, D. Osipov, S. Serikov, P. Permyakov, J. Stanilovskaya, L. Gagarin, A. Kholodov // Арктика XXI век. Естественные науки. 2016. № 1(4). С. 15–22.
8. Traditional Iñupiat Ice Cellars (SIĠĠUAQ) in Barrow, Alaska: characteristics, temperature monitoring, and distribution / K.E. Nyland, A.E. Klene, J. Brown, N.I. Shiklomanov, F.E. Nelson, D.A. Streletskiy, K. Yoshikawa // Geographical Review. 2017. Vol. 107. No. 1. P. 143–158. <https://doi.org/10.1111/j.1931-0846.2016.12204.x>.

9. Программный комплекс для тепловых расчетов грунтов Frost 3D. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://frost3d.ru/> (дата обращения: 15.11.2021).

K.S. Sotnikova¹, A.A. Maslakov¹, G.V. Gribovskii²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, ks.sotnikova25@gmail.com, Alexey.maslakov@geogr.msu.ru

²Simmakers LLC, Moscow, info@simmakers.ru

MODELING OF THE THERMAL REGIME OF THE ICE CELLARS OF EASTERN CHUKOTKA IN PERMAFROST

Abstract. The degradation of permafrost worsens the geocryological situation in the North regions. Ice cellars located in permafrost are in an unsustainable state due to changes of the geocryological conditions. Monitoring and modeling of the thermal regime of permafrost of ice cellars will help to estimate the impact of forecast climate changes and the effectiveness of various preventive measures to maintain the stability of these ice cellars.

Key words: ice cellars; permafrost; geocryological monitoring.

Петров Б.В.¹, Поляков А.В.², Курбатов А.С.²

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии, г. Москва,
borya.petrov.2016@list.ru

²ООО «Газпром добыча Ямбург», г. Новый Уренгой, a.polyakov@yamburg.gazprom.ru,
as.kurbatov@yamburg.gazprom.ru

**ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ КУСТОВ
ГАЗОВЫХ СКВАЖИН ЯМБУРГСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Аннотация. Приведены результаты длительного наблюдения за температурным режимом оснований площадок кустов газовых скважин в пределах Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения. Ряды температурных наблюдений (1993–2020 гг.) включают в себя данные по двум кустам газовых скважин с низкотемпературным сеноманским газом и двум с высокотемпературным валанжинским газом. Результаты наблюдений показывают отсутствие выраженного техногенного роста температур мерзлых оснований в пределах кустовых площадок с добываемым сеноманским газом. В пределах кустовых площадок с добываемым валанжинским газом наблюдается существенный рост температур оснований на расстоянии 5–10 м от добывающей скважины.

Ключевые слова: температурный режим оснований; температурные наблюдения; куст газовых скважин; добывающая скважина; температура газа на устье газовых скважин.

Строительство и эксплуатация добывающих скважин в пределах криолитозоны осложнено наличием теплового воздействия на вмещающие мерзлые породы. Вытаивание льда с последующим уплотнением оттаявшей массы породы способны приводить к его просадке вокруг добывающей скважины [4]. Просадка грунтов оснований ведет к потере продольной устойчивости ствола скважины в таликовой зоне мерзлоты в связи с исчезновением боковой опоры для крепи скважины [1]. Кроме того, оттаивающие породы «зависают» на стволе скважины и тем самым создают дополнительные осевые нагрузки. Их величина способна достигать значений, ведущих к потере продольной устойчивости крепи при сохранении боковой опоры на оттаявшие породы [3], а также к значительным пластическим деформациям элементов конструкции, приводящим к ее разрушению [2, 5].

Наблюдения за температурным режимом грунтовых оснований кустов газовых скважин Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) ведутся Ямбургской лабораторией мерзлоты филиала «Инженерно-технический центр» ООО «Газпром добыча Ямбург» по кустам сеноманских скважин – № 611 и 506 и валанжинских скважин – № 106В и 110В с 1993 г.

Следует отметить, что данные кусты газовых скважин «спарены» – № 611 и 110В, № 506 и 106В, т.е. примыкают друг другу территориально и схожи по ландшафтно-геологическим условиям. Анализ проводился по температурам на глубине нулевых годовых амплитуд – 10 м.

В пределах кустов сеноманских скважин температура газа на устье газовых скважин на начальном этапе эксплуатации в 1988–1989 гг. составляла от –12 до –15°C, а в последние 10 лет колеблется от –8,9 до +6,0°C.

Температуры мерзлых оснований на глубине нулевых годовых амплитуд в пределах куста газовых скважин № 506 различаются незначительно в зависимости от расстояния от добывающей скважины – по термометрическим скважинам, расположенным на расстоянии от 5 до 47 м от добывающей скважины, температуры колеблются от $-0,7$ до $-1,2^{\circ}\text{C}$ на 2020 г. В пределах куста газовых скважин № 506 температуры по термометрической скважине, расположенной на расстоянии 40 м от добывающей скважины выше, чем на ближайших к термометрическим скважинам, расположенным в 5–10 м от нее – $-0,4^{\circ}\text{C}$ против $-2,3^{\circ}\text{C}$. Такая разница связана с расположением дальней термометрической скважины в прилегающем к откосу понижении, где в зимний период скапливается снег и отепляет мерзлые породы.

Из рассмотрения температур оснований по двум кустам сеноманских газовых скважин не прослеживается отепляющее воздействие добывающих скважин на прилегающие мерзлые основания. Температуры остаются неизменными на протяжении значительного расстояния от добывающей скважины, а выявленные изменения связываются с изменением микроландшафта поверхности – в понижениях, прилегающих к откосам кустовых площадок, где в зимний период накапливается снег, температуры существенно выше, чем на поверхности кустовых площадок.

Рис. 1. Динамика температуры ММП в основании куста газовых скважин № 611.
Обозначения: ТС – термометрическая, ГС – газовая, ГП – фоновая скважины; $T_{\text{ММП}}$ – температура ММП, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{возд}}$ – температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$

В пределах кустов валанжинских скважин температура газа на устье газовых скважин на начальном этапе эксплуатации в 1988–1989 гг. составляла $+34$ до $+39^{\circ}\text{C}$, а в последние 10 лет колеблется от $+14,8^{\circ}\text{C}$ до $+25,7^{\circ}\text{C}$.

Температуры мерзлых оснований на глубине нулевых годовых амплитуд в пределах куста газовых скважин № 106В в 5 м от добывающей скважины положительная, в 2020 г. достигает $+1^{\circ}\text{C}$, в то время как по более отдаленным скважинам (30–40 м) она достигает от $-0,3$ до $-0,2^{\circ}\text{C}$. Аналогично на кусте газовых скважин № 110В температуры оснований в 5 м от добывающей скважины выше, чем в 10 м от нее – $+1,1^{\circ}\text{C}$ в 5 м против от $-0,1$ до $-0,4^{\circ}\text{C}$ в 10 м.

Рис. 2. Динамика температуры ММП в основании куста газовых скважин № 106В

Из рассмотрения температур оснований по двум кустам валанжинских газовых скважин очевидно прослеживается отопляющее воздействие добывающей скважины на породы оснований на расстоянии 5–10 м от нее. С учетом того, что по своим строительным характеристикам (льдистость, коэффициент оттаивания) вмещающие породы Ямбургского НГКМ, залегающие ниже отметки 10–15 м, малопросадочны при оттаивании, негативные воздействия можно считать незначительными, а текущее состояние скважин удовлетворительным.

Список литературы

1. Василевский В.В. Повышение эксплуатационной надежности газовых и нефтяных скважин в многолетнемерзлых породах: дис. ... канд. техн. наук. М., 2002. 163 с.

2. Горелик Я.Б., Солдатов П.В. Метод расчета вертикальной нагрузки на крепь скважины при оттаивании вмещающих мерзлых пород // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII. № 2. С. 50–60.
3. Горелик Я.Б., Солдатов П.В. О нарушении продольной устойчивости крепи эксплуатационных скважин при сохранении боковой опоры на оттаивающие мерзлые породы // Криосфера Земли. 2016. Т. XX. № 4. С. 93–104.
4. СТО Газпром 16-2005 Регламент по проектированию крепи добывающих скважин и их конструкций с учетом свойств мерзлых пород.
5. Hirshberg A.J., Moyer M.C., Rickenbach R.M. Surface-casing strain capacity for North Slope operations // SPE Drilling Engineering. 1988. Vol. 3. No. 3. P. 289–295. <https://doi.org/10.2118/16103-PA>.

B.V. Petrov¹, A.V. Polyakov², A.S. Kurbatov²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, borya.petrov.2016@list.ru

²Gazprom Dobycha Yamburg LLC, Novy Urengoy, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug,
a.polyakov@yamburg.gazprom.ru, as.kurbatov@yamburg.gazprom.ru

TEMPERATURE REGIME OF GAS WELL CLUSTERS' SOIL FOUNDATIONS AT THE YAMBURG FIELD

Abstract. The results of long-term observation of the temperature regime of the gas well clusters' soil foundations within the Yamburg oil and gas condensate field are presented. The temperature series (1993–2020) includes data from two gas well clusters with low-temperature Cenomanian gas and two with high-temperature Valanginian gas. The observation results show the absence of a pronounced anthropogenic increase in the temperatures of permafrost foundations within the cluster plots with the produced Cenomanian gas. Within the cluster plots with the produced Valanginian gas, a significant increase in foundation temperatures is observed at a distance of 5–10 m from the production well.

Key words: temperature regime of foundations; thermometric observations; gas well clusters; production well; gas wellhead temperature.

Гаврилов А.В., Усов А.Н., Минина М.В.

ООО «Инженерная Геология и Геотехника», г. Москва, info@igig.company

ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ г. САЛЕХАРДА

Аннотация. Строительство в пределах территорий распространения многолетнемерзлых грунтов является сложной задачей. Проведение качественных инженерных изысканий квалифицированными кадрами, оценка существующего опыта строительства в данных сложных условиях, качественный и количественный прогнозы изменения инженерно-геокриологических условий позволят обеспечить устойчивость возводимых зданий и сооружений. Опыт проведения изысканий ООО «Инженерная Геология и Геотехника» на территории г. Салехарда выявил ряд проблем локального и регионального уровней. На данный момент требуются: 1) доработка нормативных технических документов, 2) развитие фоновый мониторинга и 3) развитие инженерно-геологической съемки территории каждого крупного арктического населенного пункта.

Ключевые слова: инженерно-геологические изыскания; г. Салехард; изученность; мониторинг; нормативная техническая документация.

Строительство в районах распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) представляет собой сложнейшую задачу. До 80% зданий и сооружений, расположенных в зоне распространения ММГ, подвержены деформациям в различной степени. В частности, в г. Салехарде 40% зданий и сооружений подвержены деформациям (утечки из водонесущих коммуникаций – значительная проблема и фактор, зачастую инициирующий деформации сооружений).

Настоящая публикация посвящена опыту проведения инженерно-геологических изысканий на территории г. Салехарда ООО «Инженерная Геология и Геотехника» (ООО «ИГиГ»).

В первую очередь, необходимо отметить, что геологической съемкой масштаба 1:1 000 000 [7] территория РФ покрыта практически полностью, покрытие съемкой масштаба 1:200 000 [8] значительно меньше.

Для территории г. Салехарда на данный момент отсутствует государственная геологическая карта масштаба 1:200 000.

И, к сожалению, практически отсутствует инженерно-геологическая съемка территории РФ масштаба 1:1 000 000 [5] и 1:200 000 [6].

В результате при проведении инженерно-геологических изысканий единственным фоновым ресурсом для территории г. Салехарда является государственная геологическая карта масштаба 1:1 000 000 [4], что очевидно недостаточно для базового ресурса.

Для характеристики геокриологических условий единственным опубликованным ресурсом является государственная геокриологическая карта масштаба 1:2 500 000 [1]. Специалистами ООО «ИГиГ» для нескольких объектов, расположенных на территории г. Салехарда, были выполнены инженерно-геологические изыскания.

С геоморфологической точки зрения территория г. Салехарда является пологой равниной, представленной супесями, суглинками и песками лимноаллювиального генезиса до глубины 35 м. Мерзлота не сливающаяся, массивно-островная. Зафиксированные в ходе проведения инженерно-геологических изысканий талые зоны были связаны авторами с палеоозерами. Гидрогеологические условия характеризуются одним межмерзлотным водоносным горизонтом.

С 01.07.2021 был введен СП 493.1325800.2020 [3]. Требуемое расстояние между выработками было сокращено практически в два раза. При этом термический каротаж должен производиться в не менее чем половине всех выработок. Опыт свидетельствуют об излишней информации по термометрии, возникающей согласно СП 493.1325800.2020 [3]. Также необходимо отметить, что при бурении были зафиксированы толщи, сложенные исключительно песками мелкими, твердомерзлыми, имеющими значительную мощность. Требование п. 4.3.8.5 СП 493.1325800.2020 [3] по отбору проб из однородных по составу и криогенному строению слоев из кровли, середины и подошвы (с интервалом не более 2 м) является, по мнению авторов, дискуссионным.

В данных условиях ведение буровых работ является сложным процессом, необходимые хранение и транспортировка образцов также являются трудоемкими и зависят от многих факторов. Рационально вести отбор только тех образцов, данные по которым после проведения испытаний в грунтовых лабораториях будут востребованы при проектировании.

Следует подчеркнуть, что аккредитованных грунтовых лабораторий, работающих с мерзлыми грунтами, крайне мало.

Представлен опыт проведения геотехнического мониторинга многокорпусного трехэтажного здания на свайном основании, расположенного в г. Салехарде.

С момента сдачи в эксплуатацию в 2016 г. многокорпусного трехэтажного здания начали развиваться повсеместно деформации основания, вызвавшие неравномерные осадки корпусов здания, образование трещин, неprojektное раскрытие деформационных швов, провисание потолков.

Для достижения требуемой несущей способности свай была предусмотрена стабилизация грунтов при помощи обеспечения мерзлого состояния основания на весь срок эксплуатации. Для этого в здании запроектировано вентилируемое подполье и устройство парожидкостных сезонно-охлаждающих устройств (СОУ).

С целью организации геотехнического мониторинга и принятия решений по стабилизации основания сооружения специалистами ООО «ИГиГ» были решены следующие задачи:

- анализ архивных отчетов;
- оценка инженерно-геологических условий участка строительства;
- оценка эффективности работы СОУ;

- формирование расчетной теплотехнической и геотехнической модели сооружение–основание;
- теплотехнический расчет основания;
- оценка устойчивости основания;
- оценка осадок здания;
- анализ несущей способности свай;
- расчеты несущих конструкций с учетом имеющегося крена отдельных корпусов;
- расширение сети геотехнического мониторинга.

Проведенные инженерно-геологические изыскания ООО «ИГиГ» позволили оценить инженерно-геологические условия участка застройки. Было установлено, что территория для строительства была выбрана крайне неудачно (наличие оврага под корпусом здания, засыпанного строительными и бытовыми отходами, близость водоема, фильтрация из которого направлена в сторону здания). Кроме того, архивные отчеты по проведенным ранее инженерно-геологическим изысканиям не отражали фактические инженерно-геологические условия участка застройки. Теплофизические свойства грунтов, которые в дальнейшем использованы при прогнозе, были приведены по нормативным техническим документам (НТД), лабораторные испытания не проводились. Также в архивных отчетах была допущена грубейшая ошибка: принималась, что переход грунтов в мерзлое состояние происходит при 0°C.

Тепловизионные обследования, проведенные ООО «ИГиГ», свидетельствуют о крайне низкой эффективности эксплуатируемых СОУ.

В результате с момента начала эксплуатации здания начали развиваться неравномерные осадки.

Поскольку при проектировании принят I принцип использования ММГ в качестве основания сооружения, оценка несущей способности свай была выполнена согласно СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» [2].

На основании полученных результатов авторы пришли к заключению:

- несущая способность части имеющихся свай не обеспечена для принятия расчетных нагрузок, указанных в «проектной документации»;
- наличие грунтовых вод оказывает негативное влияние на несущую способность свайного фундамента;
- требуются меры по повышению несущей способности свайного фундамента здания.

Дополнительно были произведены расчеты в программе PLAXIS 2D устойчивости бортов оврага, расположенного в непосредственной близости от сооружения. Результаты расчетов свидетельствует в целом о неустойчивом состоянии бортов оврага.

На основе вышеизложенного были разработаны следующие рекомендации:

- создать дренажную систему по контуру сооружения;

- произвести засыпку оврага;
- исключить складирование мусора и снежных наносов вблизи проветриваемого подполья;
- создать систему принудительного промораживания грунтов.

Выполненные рекомендации позволили стабилизировать деформации. Это подтверждают ежемесячные маршрутные наблюдения, мониторинговые наблюдения по оборудованным термометрическим (рис. 1) и инклинометрическим скважинам (рис. 2), а также установленным деформационным маякам. Геометрическое нивелирование II класса также позволило сделать вывод о, в целом, «стабильном» состоянии литотехнической системы (рис. 3).

Рис. 1. Пример данных мониторинга температур, измеренных в скважине, находящейся под зданием

Рис. 2. Пример данных проведения инклинометрических измерений в скважине, находящейся под зданием

а

б

Рис. 3. Пример результатов выполненного геометрического нивелирования II класса: а – график осадок здания по линии профиля, б – график развития осадок здания во времени

В заключении авторы считают необходимым отметить, что, на данный момент актуальными являются следующие проблемы: недостаточная инженерно-геологическая изученность территории РФ; отсутствие систематизации и развития фонового мониторинга; необходимость доработки НТД.

Решение данных задач позволит повысить качество изыскательских работ и, соответственно, позволит возводить более безопасные здания и сооружения.

Список литературы

1. Геокриологическая карта СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. Масштаб 1:2 500 000. Винница: Винницкая картографическая фабрика, 1996.
2. СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88*».
3. СП 493.1325800.2020 Инженерные изыскания для строительства в районах распространения многолетнемерзлых грунтов.
4. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (Третье поколение). Лист Q-42. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://vsegei.ru/ru/info/pub_ggk1000-3/Zapadno-Sibirskaya/q-42.php (дата обращения: 25.11.2021).
5. Картограмма инженерно-геологической изученности территории Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 по состоянию на 1 сентября 2021 г. М.: Гидроспецгеология, 2021. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://geomonitoring.ru/izuchennost.html> (дата обращения: 25.11.2021).

6. Картограмма инженерно-геологической изученности территории Российской Федерации масштаба 1:200 000 по состоянию на 1 сентября 2021 г. М.: Гидроспецгеология, 2021. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://geomonitoring.ru/izuchennost.html> (дата обращения: 25.11.2021).
7. Схема изученности ГК-1000/3 по состоянию на 01.09.2021 года. СПб.: ВСЕГЕИ, 2021. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://vsegei.ru/ru/info/ggk/izuchennost/SI_GK1000_09-21.pdf (дата обращения: 25.11.2021).
8. Схема изученности ГК-200 по состоянию на 01.09.2021 года. СПб.: ВСЕГЕИ, 2021. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://vsegei.ru/ru/info/ggk/izuchennost/SI_GK200_9-2021.pdf (дата обращения: 25.11.2021).

A.V. Gavrilov, A.N. Usov, M.V. Minina

Engineering Geology and Geotechnics LLC, Moscow, info@igig.company

EXPERIENCE OF ENGINEERING-GEOLOGICAL SURVEYS IN SALEKHARD

Abstract. Building within the permafrost areas is very difficult. High-quality engineering surveys by qualified personnel, assessing the existing experience of building in these difficult conditions, qualitative and quantitative forecasts of geocryological conditions will ensure the stability of the constructions. The experience of Engineering Geology and Geotechnics LLC in engineering surveys in Salekhard revealed a number of local and regional problems. At this moment, the following is required: 1) revision of regulatory documents, 2) development of monitoring and 3) development of regional engineering-geological surveys in the Arctic.

Key words: engineering-geological surveys; Salekhard; state of knowledge; monitoring; regulatory documentation.

Мотенко Р.Г., Зубкова А.В., Давлетова Р.Р.

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геоэкологии,
г. Москва, rmotenko@mail.ru, www.google07@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАСОЛЕНИЯ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ВЛАГИ И ТЕМПЕРАТУРУ НАЧАЛА ЗАМЕРЗАНИЯ (ОТТАИВАНИЯ) МЕРЗЛЫХ ПЕСКОВ, СОДЕРЖАЩИХ ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО

Аннотация. Обсуждаются результаты экспериментальных данных по определению температуры начала замерзания (оттаивания) и содержания незамерзшей воды в мерзлом песке. Рассматривается влияние засоленности и заторфованности на изучаемые параметры и оценивается роль их совместного влияния. Выявлено, что увеличение содержания незамерзшей воды для мерзлых песков при совместном влиянии органической компоненты и засоления близко к сумме увеличения количества незамерзшей воды при влиянии каждого фактора в отдельности.

Ключевые слова: мерзлые грунты; незамерзшая вода; температура начала замерзания; засоленность; содержание органического вещества.

Северные территории криолитозоны характеризуются наличием засоленных и заторфованных грунтов. Засоленные мерзлые дисперсные грунты имеют особые инженерно-геологические свойства, отличаются низкой несущей способностью и неустойчивостью к техногенным воздействиям [1]. Их происхождение связано в Арктике в основном с влиянием моря, хотя есть и другие источники засоления. Засоленные мерзлые грунты представляют собой объект исследования, занимающий по многим своим свойствам положение между мерзлыми и немерзлыми грунтами. Так, они содержат значительно большее количество незамерзшей воды, чем обычные мерзлые грунты, что вместе с другими особенностями их состава и строения определяет их своеобразие [3]. Заторфованные грунты является важнейшим фактором, обуславливающим температурный режим и ход протаивания и промерзания подстилающих мерзлых толщ и широко распространены в криолитозоне. Торф образуется в поверхностном слое почвы в условиях повышенной влажности и затрудненного доступа воздуха в результате отмирания и неполного распада болотных растений. Торфяной покров широко распространен в зоне тундры, где почва постоянно находится в переувлажненном состоянии [4]. Заторфованные грунты также содержат значительно большее количество незамерзшей воды, чем без органического вещества.

Существует ряд территорий, сложенных грунтами, имеющих в своем составе и органическую составляющую и легкорастворимые соли. Важность определения фазового состава влаги таких грунтов – очевидна.

В основном при анализе влияния химико-минерального состава на фазовый состав влаги отдельно оценивается влияние засоленности и заторфованности, которые увеличивают количество незамерзшей воды [2, 4, 11,

12]. Этот факт приводит к изменению практически всех свойств мерзлых, промерзающих и оттаивающих грунтов.

На начальном этапе данной работы проводились исследования природных образцов, отобранных на территориях различных месторождений севера Западной Сибири [5, 9]. Были изучены свойства засоленных и заторфованных грунтов. Оценено раздельно влияние содержания органической компоненты и засоленности. Впервые сделана попытка оценить совместное влияние этих факторов на температуру начала замерзания (оттаивания), теплофизические свойства мерзлых грунтов, фазовый состав влаги в них. Однако был сделан вывод о том, что для корректных количественных оценок совместного влияния содержания органического вещества и засоленности на содержание незамерзшей воды необходимо проведение специальных исследований на модельных грунтах (пастах).

В данной публикации рассматриваются результаты исследований по совместному влиянию органического вещества и засоленности на формирование фазового состава влаги для модельных песчаных грунтов в определенном диапазоне засоления (D_{sal}) и содержания органической компоненты (I_r).

Объект и методика исследований

Объектом исследования являлся песок средней крупности (по ГОСТ 25100-2011) верхнеюрского возраста морского генезиса (mJ_3), отобранный в Московской области (г. Люберцы).

Методы исследования и методика приготовления образцов. Для определения температуры начала замерзания и оценки количества незамерзшей воды применялся криоскопический метод. Температура начала замерзания определялась в цикле «конца плавления» [6–8, 10] с использованием опытного образца претензионного измерителя температур ПИТ-1. Обработка данных проводилась с помощью современного программного обеспечения. Точность измерения температуры составляла $\pm 0,01^\circ\text{C}$.

Определения содержания незамерзшей воды проводились по отработанной экспериментальной методике комбинирования контактного и криоскопического методов [6, 8–10]. Для исследования раздельного влияния засоленности, заторфованности и их совместного влияния было приготовлено девять вариантов грунтовых паст с различными значениями степени засоленности D_{sal} в диапазоне от 0 до 1% и заторфованности I_r в диапазоне от 0 до 10%. Для приготовления заторфованных образцов использовался сильноразложившийся торф, отобранный с Восточно-Мессояхского месторождения. Глубина отбора 2 м. Для приготовления образцов с заданными значениями засоленности и влажности добавлялся раствор NaCl с определенными значениями концентрации.

Для криоскопического метода приготовленная паста уплотнялась в

формы диаметром 3–4 см и высотой 4–6 см до заданного значения плотности. Для определения фазового состава контактным методом использовалась та же паста. Образцы выдерживали неделю в холодильниках при четырех значениях отрицательной температуры (–3, –7, –18, –24°C). Определялись по два параллельных образца с заданными параметрами.

Результаты исследований и их обсуждение

Температура начала замерзания. Для каждого образца песка с заданными значениями влажности, содержания органического вещества и засоленности также была определена температура начала замерзания в цикле оттаивания (t_{bf}) (рис. 1). На графике видно, что температура начала замерзания понижается с увеличением концентрации порового раствора и содержания органического вещества.

Рис. 1. Зависимости температуры (t_{bf}) песка от концентрации порового раствора (C_{ps}) для образцов с различным содержанием органического вещества: 1 – 0%; 2 – 3%; 3 – 10%

Содержание незамерзшей воды. Содержание незамерзшей воды в мерзлых грунтах зависит от таких параметров состава и строения, как величина удельной активной поверхности, геометрия капилляров и пор, концентрация в поровом растворе ионов солей и др. К основным факторам, влияющим на содержание незамерзшей воды в мерзлых грунтах, относятся их температура, гранулометрический состав, засоленность, заторфованность и др.

Влияние температуры. На рис. 2 представлены результаты экспериментальных исследований фазового состава влаги во всех исследуемых образцах песка. Количество незамерзшей воды уменьшается с понижением температуры от 0 до –25°C.

Видно, что графики зависимостей незамерзшей воды от температуры расположились по группам с одной засоленностью (0; 0,5; 1%) и разными значениями содержания органического вещества. Группа 1 (1, 4 и 7 песок) – зависимость содержания незамерзшей воды от температуры для незасоленных образцов песка с различным содержанием торфа, группа 2 (2, 5 и 8) – при

степени засоления $D_{sal} = 0,5\%$ и группа 3 (3, 6 и 9): при $D_{sal} = 1\%$ также с различным содержанием органического вещества. Показан анализ результатов при выбранной фиксированной температуре $t = -6$ и -18°C .

Рис. 2. Зависимости содержания незамерзшей воды (W_w) от температуры для мерзлого песка

Следует остановиться на более подробном рассмотрении влияния отдельно каждого фактора. Рассмотрено влияние содержания органического вещества на количество незамерзшей воды для чистого песка и песка с засоленностью 0,5 и 1% при $t = -6$ и -18°C (рис. 3, а). Для незасоленного песка при $t = -6^\circ\text{C}$ количество незамерзшей воды равно 0,3% и увеличивается до 0,6% при повышении содержания органики до 3%. Увеличение содержания торфа ($I_r = 10\%$) увеличивает содержание незамерзшей воды до $W_w = 2,3\%$.

При $D_{sal} = 0,5\%$ для незаторфованного песка количество незамерзшей воды намного больше, чем для незасоленного и равно 4,8%. Оно изменяется от $W_w = 5,3\%$ до 5,7% при повышении I_r до 3 и 10%, соответственно. При $D_{sal} = 1\%$ для незаторфованного песка количество незамерзшей воды равно 9,5% и растет незначительно до 10,1% при увеличении I_r до 3%. При $I_r = 10\%$, значение W_w увеличивается до 11,1%.

При $t = -18^\circ\text{C}$ аналогичные изменения менее значимы.

Влияние степени засоления (рис. 3, б). При $t = -6^\circ\text{C}$ у незаторфованного песка количество незамерзшей воды увеличивается от $W_w = 0,3$ до 4,8% при $D_{sal} = 0,5\%$. При повышении D_{sal} до 1% содержание незамерзшей воды увеличивается до 9,5%. При $I_r = 3\%$ – увеличивается от $W_w = 0,6\%$ у незасоленного до $W_w = 5,3\%$ при повышении D_{sal} до 0,5% и продолжает увеличиваться при $D_{sal} = 1\%$ до $W_w = 10,1\%$. При $I_r = 10\%$ – $W_w = 2,3\%$ у незасоленного песка и 5,7% при $D_{sal} = 0,5\%$. При $D_{sal} = 1\%$ W_w возрастает до 11,1%.

При $t = -18^\circ\text{C}$ для незаторфованного песка (см. рис. 3, б) $W_w = 0,1\%$ у незасоленного и увеличивается до $1,7\%$ при изменении D_{sal} до $0,5\%$. При $D_{sal} = 1\%$ – $W_w = 2,5\%$.

Рис. 3. Зависимости содержания незамерзшей воды в мерзлом песке при $t = -6^\circ\text{C}$ (точки) и $t = -18^\circ\text{C}$ (пунктир): а – от содержания органического вещества при разных значениях степени засоления, б – от степени засоления при разных значениях содержания органического вещества

Таким образом, в исследуемом диапазоне изменения засоления и содержания органического вещества для незасоленного песка увеличение количества органического вещества вызывает увеличение содержания незамерзшей воды в пять раз при $t = -6^\circ\text{C}$. В то же время увеличение засоленности увеличивает содержание незамерзшей воды в десятки раз.

Итак, для песков при совместном влиянии органической компоненты и засоления увеличение содержания W_w практически равняется сумме увеличения количества незамерзшей воды при влиянии каждого факторов в отдельности.

Выводы

Проведены экспериментальные исследования температуры начала замерзания и содержания незамерзшей воды для песчаных грунтов в диапазоне изменения содержания органического вещества (I_r) от 0 до 10% и степени засоления (D_{sal}) от 0 до 1%, и выявлены закономерности изменения количества незамерзшей воды от засоления и наличия органического вещества в диапазоне отрицательных температур. Получено:

- температура начала замерзания t_{bf} понижается с увеличением концентрации порового раствора и содержания органического вещества; например, при $I_r = 10\%$ в засоленном песке ($C_{ps} = 0,5$) значение t_{bf} снизилось более, чем на 1°C ;

– содержания незамерзшей воды пропорционально растет с ростом засоления и с увеличением содержания органического вещества: например, при $I_r = 0\%$, и $t = -6^\circ\text{C}$ с увеличением D_{sal} до 1% количество незамерзшей воды увеличивается в 32 раза;

– в мерзлых засоленных песках при $D_{sal} = 1\%$ при увеличении I_r до 10% W_w увеличивается на 1,6% при -6°C ;

– в мерзлых грунтах, содержащих органическое вещество при $I_r = 10\%$ с ростом засоления до $D_{sal} = 1\%$ при -6°C W_w увеличивается от 2,3 до 11,1% (на 8,8%) и при -18°C – от 1,1 до 3,1% (на 2%);

– при совместном влиянии органического вещества и засоления изменение W_w практически равняется сумме изменений количества незамерзшей воды при влиянии каждого фактора в отдельности, однако, при -6°C изменение W_w оказалось ниже, но это нуждается в уточнении.

Для корректных выводов по количественной оценке и совместному влиянию содержания органического вещества и засоленности на содержание незамерзшей воды авторы планируют проведение дальнейших исследований на мерзлых грунтах разного гранулометрического состава в расширенном диапазоне заторфованности и засоленности.

Список литературы

1. Аксенов В.И. Засоленные мерзлые грунты Арктического побережья как основание сооружений. М.: Все о мире строительства, 2008. 340 с.
2. Алексютина Д.М., Мотенко Р.Г. Оценка влияния засоления и содержания органического вещества в мерзлых породах западного побережья Байдарацкой губы на их теплофизические свойства и фазовый состав влаги // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2016. № 2. С. 59–63.
3. Брушков А.В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства. М.: Изд-во МГУ, 1998. 332 с.
4. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 146 с.
5. Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 454 с.
6. Ершов Э.Д., Мотенко Р.Г., Комаров И.А. Экспериментальное исследование теплофизических свойств и фазового состава влаги засоленных мерзлых грунтов // Геоэкология. 1999. № 3. С. 232–242.
7. Методы геокриологических исследований / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 2004. 512 с.
8. Мотенко Р.Г. Теплофизические свойства и фазовый состав влаги мерзлых засоленных пород: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 1997.
9. Мотенко Р.Г., Гречищева Э.С., Зубкова А.В. Экспериментальная оценка влияния содержания органического вещества на фазовый состав воды в

мерзлых засоленных песчаных грунтах севера Западной Сибири // Сборник докладов расширенного заседания научного совета по криологии Земли РАН «Актуальные проблемы геокриологии». Т. 2. М.: КДУ, Университетская книга, 2018. С. 204–210.

10. Мотенко Р.Г., Комаров И.А. Результаты экспериментальных исследований фазового состава влаги засоленных мерзлых грунтов // Материалы I конференции геокриологов России. Кн. 2. М., 1996. С. 287–292.
11. Роман Л.Т. Мерзлые торфяные грунты как основания сооружений. Новосибирск: Наука, 1987. 224 с.
12. Фазовый состав влаги в мерзлых породах / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 1979. 192 с.

R.G. Motenko, A.V. Zubkova, R.R. Davletova

Lomonosov Moscow State University, Moscow, rmotenko@mail.ru, www.google07@mail.ru

**EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF SALINITY
ON THE PHASE COMPOSITION OF MOISTURE
AND THE TEMPERATURE OF THE ONSET OF FREEZING (THAWING)
OF FROZEN SANDS CONTAINING ORGANIC MATTER**

Abstract. The results of experimental data on determining the temperature of the onset of freezing (thawing) and the content of unfrozen water in frozen sand are discussed. The influence of salinity and peat content on the studied parameters is considered and the role of their joint influence is estimated. It was revealed that the increase in the content of unfrozen water for frozen sands under the combined influence of organic matter and salinity is close to the sum of the increase in the amount of unfrozen water under the influence of each factor separately.

Key words: frozen ground; unfrozen water; freezing onset temperature; salinity; organic matter content.

Бровка А.Г., Дедюля И.В., Мурашко А.А.

Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси,
г. Минск, andrew_brovka@rambler.ru, dedyulyaivan@yandex.by, amurbmw@tut.by

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МЕРЗЛЫХ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД ОТ СОДЕРЖАНИЯ НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ

Аннотация. В публикации приведены результаты исследования прочности на одноосное сжатие глины аргиллитоподобной различной степени засоления от количества незамерзшей воды. Исследования проведены на автоматизированном испытательном комплексе «АСИС» производства ООО НПП «Геотек» (г. Пенза, РФ) с модернизированным приспособлением одноосного сжатия и на калориметрической установке, разработанной в Институте природопользования НАН Беларуси. В результате проведенных исследований установлено, что условно-мгновенная прочность на одноосное сжатие глины аргиллитоподобной нелинейно зависит от температуры и наличия соли в поровом растворе. Проведено сопоставление зависимостей прочности на одноосное сжатие и количества незамерзшей воды от температуры для образцов одинакового влагосодержания при различной степени засоления. При этом показано, что прочностные характеристики исследуемой породы при отрицательных температурах в основном определяются количеством незамерзшей воды, независимо от того, чем оно обусловлено: изменением температуры или совместным влиянием температуры и концентрации соли в расчете на сухое вещество.

Ключевые слова: условно-мгновенные значения пределов прочности пород; одноосное сжатие; глина аргиллитоподобная; количество незамерзшей воды; поровые растворы солей.

Авторами ранее выполнена работа [1], в которой рассмотрены зависимости теплоемкости, теплопроводности и временного сопротивления одноосному сжатию от температуры в диапазоне от -5 до -38°C для нескольких разновидностей дисперсных грунтов. При этом вопросы о наличии солей в поровой влаге и непосредственное влияние количества незамерзшей воды на прочность мерзлых пород не рассматривались. В тоже время в литературе [2, 4] имеются отдельные данные о влиянии количества незамерзшей воды на деформационно-прочностные характеристики пород без учета сформировавших ее факторов. Целью работы являлось исследование зависимости условно-мгновенных значений пределов прочности глины аргиллитоподобной при одноосном сжатии от температуры при различной концентрации хлорида натрия в поровой влаге в диапазоне температур от точки начала заморозания до -25°C .

Определение условно-мгновенных значений пределов прочности образцов глины аргиллитоподобной при одноосном сжатии проводилось на модернизированном автоматизированном испытательном комплексе «АСИС» (АИК «АСИС») производства ООО «НПП «Геотек»» согласно ГОСТ 12248-2010 [5]. Все испытания проведены при постоянной скорости деформирования 3 мм/мин в морозильной камере НКР-1 в диапазоне температуры $-2 \div -25^{\circ}\text{C}$.

Исследования температуры начала замерзания и зависимости количества незамерзшей воды от температуры глины аргиллитоподобной проведены на калориметрической установке, разработанной в Институте природопользования НАН Беларуси. Базовый вариант установки описан в работе [3]. Ее особенностью является возможность проведения исследований в режимах контролируемого теплообмена, включающего стадии охлаждения, нагревания и в адиабатических условиях. В конструкции рабочей камеры калориметра предусмотрен инициатор кристаллизации, что позволяет более точно определять температуру начала замерзания воды в горных породах за счет минимального переохлаждения, которое как правило предшествует началу замерзания. Рабочая камера калориметра представлена на рис. 1.

Рис. 1. Рабочая камера калориметра перед сборкой

Контролирование температурного режима калориметра, регистрация и обработка результатов эксперимента осуществлялись с помощью 4-канального компьютерного порта В-381Б по разработанной программе.

Исследования проводились последовательно в стадии промерзания и оттаивания в диапазоне от начала замерзания воды в породе до температуры -25°C . При этом в стадии промерзания по специальной разработанной методике определялась температура начала замерзания.

Исследования прочностных свойств проводились на образцах нарушенного сложения глины аргиллитоподобной, темно-серой, массивной, плотной, известковой слабоводоносного полесского терригенного комплекса (D_{2pl}) Нежинского (восточная часть) участка Старобинского месторождения калийных солей. Глубина залегания исследуемой породы 178–183 м.

В целях получения серии идентичных по составу и строению образцов опытный материал был измельчен с помощью лабораторной мельницы и просеян через сито с диаметром ячейки 5 мм, а затем тщательно перемешан, помещен в герметичную упаковку и выдержан в течение семи дней. Предварительные опыты показали, что этого времени достаточно для равномерного распределения влаги по всему объему образца. Затем

определялось влагосодержание материала, которое принималось за исходное (W_0). Далее из подготовленной таким образом глины приготовлены девять образцов с влагосодержаниями $W_1 = 0,17$ кг/кг; $W_2 = 0,22$ кг/кг и $W_3 = 0,26$ кг/кг. Три образца без содержания соли в поровой влаге. Температура начала замерзания поровой влаги в них соответствовала температуре начала замерзания идентичных образцов ненарушенной структуры с соответствующими влагосодержаниями. В оставшиеся шесть образцов внесена соль NaCl в количестве, необходимом для понижения температуры замерзания поровой влаги на $\Delta t = 2^\circ\text{C}$ и $\Delta t = 4^\circ\text{C}$ согласно справочным данным [6].

Помимо указанных, дополнительно подготовлены еще шесть образцов с влагосодержаниями 0,17, 0,22 и 0,26 кг/кг с двумя одинаковыми концентрациями соли, рассчитанными на сухое вещество: 0,57 и 1,173 г на 100 г сухого вещества.

Образцы для испытаний диаметром 70 мм и высотой приблизительно 150 мм, что соответствовало ГОСТ 12248-2010 [5], сформованы в металлических кассетах на испытательном комплексе «АСИС».

На рис. 2 представлены результаты первого этапа исследований зависимости условно-мгновенной прочности на одноосное сжатие глины аргиллитоподобной при различных влагосодержаниях и различной концентрации в поровом растворе хлористого натрия.

Рис. 2. Зависимость условно-мгновенной прочности на одноосное сжатие от температуры глины аргиллитоподобной при влагосодержании 0,17 кг/кг (а); 0,21 кг/кг (б), и 0,26 кг/кг (в) с различной концентрацией NaCl в поровом растворе

Из приведенных данных видно, что прочностные характеристики глины аргиллитоподобной увеличиваются в несколько раз в диапазоне температуры $-2 \div -25^\circ\text{C}$. Видно, что зависимость прочностных характеристик от общего влагосодержания не монотонна. Максимальное значение указанной характеристики получено при влагосодержании 0,21 кг/кг. Снижение прочности при уменьшении влагосодержания до 0,17 кг/кг можно объяснить

уменьшением относительного количества льда в мерзлой породе. При увеличении влагосодержания до 0,26 кг/кг снижение прочностных характеристик можно объяснить увеличением количества незамерзшей воды за счет повышения концентрации соли в поровом растворе.

С целью детальной оценки влияния отдельных факторов на прочностные характеристики породы одинакового общего влагосодержания и количества незамерзшей воды проведены испытания на одноосное сжатие образцов глины с различными концентрациями соли в поровом растворе в расчете на сухое вещество горной породы.

Кроме этого, на калориметрической установке проведены исследования зависимости количества незамерзшей воды от температуры во всех образцах, прошедших испытания на одноосное сжатие. Полученные данные представлены на рис. 3, 4. Их анализ показывает, что общее влагосодержание практически не оказывает влияния на зависимость количества незамерзшей воды от температуры (рис. 3, а). При этом наблюдается гистерезис в циклах промерзание-оттаивание (во всех легендах к рисункам режим замораживания указан как «зам.», а оттаивания — «отт.»).

Рис. 3. Зависимость количества незамерзшей воды от температуры для глины аргиллитоподобной различного влагосодержания: а – незасоленной; б – с концентрацией NaCl в поровой влаге 6,90 г/100 г воды; в – с концентрацией NaCl 1,173 г/100 г сухого вещества

Наличие в поровом растворе соли при постоянной ее концентрации в расчете на поровую влагу с увеличением общего влагосодержания, как и следовало ожидать, увеличивает количество незамерзшей воды. На рис. 3, б представлена зависимость количества незамерзшей воды от температуры при концентрации соли в поровой влаге 6,90 г на 100 г Н₂O, что соответствует понижению температуры замерзания порового раствора на $\Delta t = 4^\circ\text{C}$. Такая же зависимость получена для концентрации хлорида натрия 3,46 г/100 г Н₂O ($\Delta t = 2^\circ\text{C}$). В то же время при постоянной концентрации солей в расчете на сухое вещество общее влагосодержание практически не оказывает влияния на

зависимость количества незамерзшей воды от температуры. На рис. 3, в такая зависимость представлена для глины аргиллитоподобной при влагосодержаниях 0,17 кг/кг и 0,26 кг/кг с концентрацией хлористого натрия 1,173 г/100 г сухого вещества.

Зависимости условно-мгновенной прочности на одноосное сжатие от количества незамерзшей воды, обусловленного комплексом факторов ее формирования приведены на рис. 4. Полученные экспериментальные данные показали, что для всех серий образцов с одинаковыми влагосодержаниями значения прочности на одноосное сжатие с небольшим разбросом ложатся на одну кривую независимо от того чем обусловлено определенное количество незамерзшей воды: температурой, концентрацией соли или совместным их влиянием. При этом следует отметить, что общее влагосодержание также оказывает влияние на прочностные характеристики. Так, с увеличением влагосодержания от 0,17 до 0,21 кг/кг происходит более чем в 1,5 раза увеличение прочности на одноосное сжатие. Однако, с увеличением влагосодержания в диапазоне от 0,21 до 0,26 кг/кг прочность несколько снижается (рис. 4, б, в) Вероятно, это связано с влиянием изменения структуры и плотности скелета глины аргиллитоподобной на ее прочностные свойства при отрицательных температурах или более хрупким разрушением с увеличением влагосодержания до предельной водонасыщенности. Более детально это можно будет выяснить в дальнейших экспериментальных исследованиях.

Рис. 4. Зависимость условно-мгновенной прочности на одноосное сжатие глины аргиллитоподобной от количества незамерзшей воды при влагосодержании: а – 0,17 кг/кг; б – 0,21 кг/кг; в – 0,26 кг/кг и различной концентрации в поровом растворе хлористого натрия

Для выявления аналитической зависимости условно-мгновенной прочности на одноосное сжатие от количества незамерзшей воды глины аргиллитоподобной была проведена статистическая обработка экспериментальных результатов и получены параметры указанной зависимости. При этом установлено, что наиболее адекватно можно аппроксимировать эту зависимость с помощью степенной функции вида

$$P = \frac{A}{W_n^n},$$

где P – прочность, МПа, W_n – количество незамерзшей воды, кг/кг, n – показатель степени, A – постоянная, зависящая от общего влагосодержания глины аргиллитоподобной, МПа.

На рис. 5 представлена сплошной линией анализируемая зависимость и экспериментальные точки, полученные при различных параметрах засоления и температуры, для глины аргиллитоподобной при влагосодержании 0,26 кг/кг.

Рис. 5. Аппроксимация зависимости условно-мгновенной прочности на одноосное сжатие от количества незамерзшей воды для глины аргиллитоподобной при влагосодержании 0,26 кг/кг: $n = 1,47$; $A = 0,134$ МПа

Аналогичные зависимости получены для глины аргиллитоподобной при значениях влагосодержания 0,17 кг/кг ($n = 1,76$; $A = 0,039$ МПа) и 0,21 кг/кг ($n = 1,35$; $A = 0,213$ МПа).

Таким образом, в результате выполненных экспериментальных исследований и их анализа установлено, что определяющим фактором условно-мгновенной прочности глины аргиллитоподобной при отрицательных температурах является содержание соответствующего количества незамерзшей воды не зависимо от того, чем оно обусловлено; температурой, концентрацией солей в поровом растворе или их совместным влиянием. Если учесть, что понижение температуры замерзания растворов относится к его коллигативным свойствам, то при определении прочностных свойств пород можно принимать во внимание только общую зависимость количества незамерзшей воды от температуры, не акцентируя внимания на химическом составе поровой влаги. Такой подход позволяет оптимизировать многофакторные экспериментальные исследования прочности на одноосное сжатие мерзлых глинистых пород, уменьшая трудоемкость проводимых исследований без снижения их точности и достоверности.

Список литературы

1. Бровка Г.П. Взаимосвязанные процессы тепло-и массопереноса в природных дисперсных средах. Минск: Беларуская навука, 2011. 363 с.
2. Бровка Г.П., Агутин К.А., Бровка А.Г., Дедюля И.В. Зависимость теплофизических и прочностных характеристик мерзлых грунтов от температуры // Природопользование. Вып. 31. 2017. С. 45–49.
3. Бровка А.Г., Романенко И.И. Приборы и методы исследования теплофизических характеристик и фазового состава воды горных пород при отрицательных температурах // Горная механика. 2009. № 1. С. 71–79.
4. Бровка Г.П., Романенко И.И. Сопротивление сдвигу мерзлых засоленных грунтов // Известия вузов. Горный журнал. 1989. № 4. С. 30–33.
5. ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
6. Справочник химика. / Под ред. Б.П. Никольского. М.: Химия, 1984. Т. III. 1008 с.

A.G. Brovka, I.V. Dedyulya, A.A. Murashko

Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, andrew_brovka@rambler.ru, dedyulyaivan@yandex.by, amurbmw@tut.by

REGULARITIES OF CHANGE IN STRENGTH PROPERTIES OF FROZEN CLAY SOILS FROM THE CONTENT OF UNFROZEN WATER

Abstract. The publication presents the results of a study of the uniaxial compressive strength of argillite-like clay with varying degrees of salinity depending on the amount of unfrozen water. The studies were carried out on an automated test complex “ASIS” manufactured by Scientific Production Enterprise Geotek LLC (Penza, Russia) with a modernized device for uniaxial compression and on a calorimetric unit developed at the Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus. As a result of the studies, it was found that the conditionally instantaneous uniaxial compressive strength of argillite-like clay nonlinearly depends on the temperature and the presence of salt in the pore solution. A comparison was made of the dependences of the uniaxial compression strength and the amount of unfrozen water on temperature for samples of the same moisture content at different degrees of salinity. It was shown that the strength characteristics of the rock under study at negative temperatures are mainly determined by the amount of unfrozen water, regardless of what it is caused by: a change in temperature or the combined effect of temperature and salt concentration per dry matter.

Key words: conditional-instantaneous values of the soil ultimate strength; uniaxial compression; mudstone-like clay; amount of unfrozen water; pore solutions of salts.

Агутин К.А., Бровка Г.П., Мурашко А.А.

Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси,
г. Минск, kirill_agutin@gmail.com, brovka_gp@tut.by, amurbmw@tut.by

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Аннотация. В публикации приводится обоснование методов определения характеристик переноса влаги, обуславливающего морозное пучение при промерзании горных пород. В основу этих методов полагаются теоретические и экспериментальные исследования, подтверждающие пропорциональность потока влаги из талой зоны в мерзлую градиенту температуры в мерзлой зоне на границе с талой. Разработаны методики определения характеристик переноса влаги при промерзании горных пород в открытой и закрытой системах. Основное внимание уделяется впервые представляемой новой методике экспериментального исследования характеристик морозного пучения горных пород в закрытой системе, которая может использоваться при оценке напряженно-деформированного состояния внутри цилиндрического контура заморозки образца для проходки шахтных стволов с применением искусственного замораживания.

Ключевые слова: морозное пучение; коэффициент термовлагопроводности мерзлой зоны; влагоперенос; напряженно-деформированное состояние.

При проектировании инженерных сооружений, контактирующих с промерзающими горными породами, необходимо учитывать процессы морозного пучения, обусловленного фазовыми переходами воды в лед и миграции влаги к фронту промерзания.

Следует отметить, что в нормативных технических документах, касающихся проектированию инженерных сооружений на промерзающих горных породах, основное внимание обращается на оценку степени пучинистости и не указываются характеристики процессов пучения. Во многих случаях этого бывает недостаточно для оценки деформаций и напряжений, возникающих при промерзании влажных горных пород в конкретных температурно-влажностных условиях. При этом следует, прежде всего, исходить из того, что морозное пучение – это процесс, который определяется физико-математической моделью, характеристиками переноса и деформации, а также начальными и граничными условиями.

Несмотря на достаточно большой объем публикаций по вопросам переноса влаги при промерзании пород и почв, в настоящее время остаются дискуссионными вопросы переноса влаги, водорастворимых соединений и формирования сил морозного пучения в промерзающих породах.

По мнению авторов, отправной точкой при математическом описании процессов переноса влаги в промерзающих средах, обуславливающих морозное пучение, следует взять работы Б.В. Дерягина и Н.В. Чураева, где термодинамическими методами обосновывается уравнение переноса влаги в мерзлых средах [5]:

$$q_w = -\alpha_w \rho_w \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\rho_L L}{T} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

где q_w – плотность потока влаги; α_w – коэффициент гидродинамической проводимости незамерзающих прослоек; ρ_w – плотность воды; ρ_L – плотность льда; P – гидростатическое давление; T – температура по шкале Кельвина; L – удельная теплота фазового перехода «вода – лед».

Развивая это направление, экспериментально было показано [3, 4], что поток влаги из талой зоны в мерзлую при отсутствии избыточного давления пропорционален градиенту температуры. На основании этого факта было предложено использовать уравнение:

$$q_w = -K_M(U_{\chi=\xi+0}) \cdot \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2)$$

где $K_M(U_{\chi=\xi+0})$ – коэффициент термовлагопроводности мерзлой зоны, являющийся функцией влагосодержания талой зоны на границе с мерзлой.

Используя коэффициент теплопроводности мерзлой зоны, была решена задача для полуограниченной среды с однородным начальным распределением влажности и положительной температуры [2]. Это можно использовать для экспериментального определения характеристик тепло- и массопереноса при промерзании породы, в частности коэффициента термовлагопроводности мерзлой зоны и коэффициента влагопроводности талой зоны. Для реализации такой возможности создана экспериментальная установка, позволяющая проводить исследование морозного пучения в открытой системе. Конструкция установки и соответствующая методика подробно описана в работе [1].

Практика исследований процессов морозного пучения мерзлых пород показала, что в определенных ситуациях возникает необходимость оценки морозного пучения в закрытых системах. Например, при обосновании проектов заморозки горных пород для проходки шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях. При этом внутри цилиндрического контура заморозки образуется закрытая система, внутри которой может создаваться напряженно-деформационное состояние за счет фазовых переходов воды в лед в замораживаемой горной породе и перераспределения влаги в замкнутом объеме контура замораживания. Кроме этих факторов следует учитывать возможную усадку не промерзшей породы, которая в различных горных породах будет зависеть от степени деформации скелета породы. Для глинистых пород с легкодеформируемым скелетом усадка не промерзшей зоны будет близка к количеству переместившейся влаги из талой в мерзлую породу. Для песчаных пород с жестким скелетом напротив независимо от количества переместившейся влаги усадка не промерзшей зоны будет близко к нулю.

С учетом изложенных факторов создана лабораторная установка, предназначенная для исследования процессов морозного пучения при

промерзании влажных пород в закрытой системе. Особенностью данной установки является возможность испытаний либо одновременно трех идентичных образцов, что обеспечивает наибольшую достоверность получаемых данных, либо трех образцов различного состава для сравнительного экспресс анализа тенденции развития пучения.

На рис. 1 схематично показана разработанная установка с одной цилиндрической кассетой 1 с внутренним диаметром 50 мм и высотой 100 мм.

Рис. 1. Лабораторная установка для исследования морозного пучения дисперсных пород в закрытой системе. Обозначения: 1 – цилиндрическая кассета из эбонита, 2 – нижний теплоизоляционный слой, 3 – демпферный стакан с мерной емкостью и эластичной мембраной 4, 5 – верхний теплоизоляционный слой, 6 – нижний жидкостный теплообменник, 7 – верхний воздушный теплообменник, 8 – боковая теплоизоляция из пенополистирола, 9 – боковое жидкостное термостатирование, 10 – термопара для измерения температуры нижней части образца, 11 – батарея термпар для измерения перепада температуры в нижнем теплоизолирующем слое, 12 – термопара для измерения температуры верхней части образца, 13 – исследуемый образец, 14 – фронт промерзания

Кассеты устанавливаются на нижний теплоизоляционный слой 2 из эбонита толщиной 20 мм. Каждая кассета с образцом породы оснащена демпферным герметичным стаканом 3 с эластичной мембраной 4, имеющей возможность свободного деформирования в процессе промораживания исследуемого образца. Стаканы с мембраной заполнены химически нейтральной незамерзающей жидкостью и через отводные рукава малого диаметра соединены с мерными емкостями, фиксирующими изменение объема жидкости в стакане в процессе морозного пучения породы. Сверху демпферные

стаканы погружены в теплоизоляционный слой из пенополистирола 5. Кассеты через указанные теплоизоляционные слои контактируют с теплообменниками. При этом нижний теплообменник 6 является жидкостным и термостатируется с помощью криостата, а верхний теплообменник 7 является воздушным и термостатируется воздушным потоком комнатной температуры. От внешней среды вся конструкция изолирована кожухом низкой теплопроводности из пенополистирола 8 и боковым термостатированием 9.

Для контроля температурного режима промораживания образцов используются температурные датчики 10–12. С помощью датчиков 10 и 12 контролируется температура нижнего и верхнего торцов образца. Батарея термопар 11 используется для контроля градиента температуры в нижнем теплоизоляционном слое.

С помощью задания температуры термостатирования нижнего и верхнего теплообменников, а также подбора толщины и коэффициентов теплопроводности теплоизоляционных слоев можно в промораживаемых образцах создавать динамичное температурное поле с постоянной скоростью продвижения фронта промерзания по высоте кассеты. При этом толщина верхнего и нижнего слоев теплоизоляции выбираются из расчета равновесного положения фронта промерзания в районе верхней границы образца. Для этого используется формула

$$(T_{\text{в}} - T_{\text{нз}}) \left(\frac{h_{\text{ив}}}{\lambda_{\text{ив}}} \right) = (T_{\text{нз}} - T_{\text{н}}) \left(\frac{h_{\text{ин}}}{\lambda_{\text{ин}}} + \frac{h_{\text{обр}}}{\lambda_{\text{обр}}} \right), \quad (3)$$

где $h_{\text{обр}}$, $h_{\text{ив}}$, $h_{\text{ин}}$ – соответственно высота образца, толщина верхнего и нижнего теплоизолирующих слоев; $\lambda_{\text{обр}}$, $\lambda_{\text{ив}}$, $\lambda_{\text{ин}}$ – соответственно коэффициент теплопроводности образца, коэффициенты теплопроводности верхнего и нижнего теплоизолирующих слоев; $T_{\text{нз}}$, $T_{\text{в}}$, $T_{\text{н}}$ – соответственно значения температуры начала замерзания воды в образце и температуры термостатирования верхнего и нижнего теплообменников по шкале Цельсия.

С учетом того, что верхний слой изоляции из пенопласта, толщиной порядка 10 мм имеет коэффициент теплопроводности 0,05 Вт/(м К), а нижний слой толщину 20 мм и коэффициент теплопроводности 0,15 Вт/(м К) при вариации коэффициента теплопроводности грунта в пределах 1–3 Вт/(м К) равновесное положение границы промерзания будет находиться в области демпферного стакана с вариацией не более 0,2 см. Это обеспечивает минимальный градиент температуры в непромерзшей зоне в процессе промерзания образца до половины его высоты. Разработанная методика позволяет вести промораживание образца с достаточно медленной скоростью, при которой влагосодержание в талой зоне образца успевает равномерно распределиться по высоте. На основании этого условия получены расчетные формулы для определения коэффициента термовлагопроводности мерзлой зоны $K_{\text{м}}$ на различных стадиях промораживания, в которых непрерывно

происходит изменения влагосодержания талой зоны за счет переноса в мерзлую и ограниченного притока влаги. Такой режим промораживания дает возможность из одного опыта получить значения K_m при различных значениях влагосодержания талой зоны на границе с фронтом промерзания.

Подготовка образцов для определения коэффициента термовлагопроводности мерзлой зоны K_m осуществляется методом формования образцов грунта заданной влажности под давлением, равным бытовому давлению на глубине отбора исходного материала.

Контроль режима промерзания с помощью термопары для измерения температуры нижней части образца 10 и батарея термопар для измерения перепада температуры в нижнем теплоизоляторе 11 позволяет в первом приближении оценить положение фронта промерзания и время окончания опыта, когда положение фронта промерзания достигнет половины высоты образца. Для этого используется формула

$$\xi = \frac{(T_n - T_{нз}) \cdot \lambda_{обр}}{\Delta T_n \cdot \lambda_{ин}} \cdot h_{ин}, \quad (4)$$

где ΔT_n – перепад температуры в нижнем теплоизоляционном слое.

После окончания проведения опыта образец извлекают из обоймы, разрезают вдоль вертикальной оси, измеряют фактическую толщину промерзшего слоя и исследуют его криогенную текстуру. Мерзлая и талая зоны разрезаются через 5–10 мм параллельно фронту промерзания и производится послойное определение влагосодержания образца породы методом термостатной сушки. На рис. 2 представлено типичное распределение влагосодержания в замороженном до половины высоты образце.

Рис. 2. Типичное распределение влагосодержания при промерзании влажного грунта в закрытой системе. Обозначения: 1 – исходное распределение влагосодержания, 2 – распределение влагосодержания после промораживания

Расчетные формулы для определения коэффициента термовлагопроводности мерзлой зоны K_M имеют вид:

$$W_{mi} = \frac{K_M \cdot \frac{\partial T}{\partial x}}{\frac{d\xi}{d\tau} \cdot \rho_{ск}} + W_{Ti}, \quad (5)$$

$$W_{Ti} = \left(\frac{W_{обр} \cdot m_{обр}}{1 + W_{обр}} - \sum_1^{n_m} \frac{W_{mi} \cdot m_{mi}}{1 + W_{mi}} \right) / \sum_{n_m+1}^{n_k} m_{ci}, \quad (6)$$

$$K_{Mi} = \frac{(W_{mi} - W_{Ti}) \cdot \frac{d\xi}{d\tau} \cdot \rho_{ск}}{\frac{\partial T}{\partial x}} = \frac{(W_{mi} - W_{Ti}) \rho_{ск}}{(T_{нз} - T_n) \cdot \tau_n} \cdot \xi_n^2. \quad (7)$$

где $W_{обр}$ – исходное влагосодержание образца; W_{mi} – влагосодержание i -го слоя в мерзлой зоне; W_{Ti} – влагосодержание i -го слоя в талой зоне; m – масса образца, кг; m_{mi} – масса i -го слоя в мерзлой зоне, кг; m_{ci} – масса i -го слоя в талой зоне, кг; n_k – общее число слоев разделки образца; n_m – число слоев разделки образца в мерзлой зоне; ξ – текущая координата фронта промерзания, м; ξ_n – координата фронта промерзания в конце промораживания, м; $\rho_{ск}$ – плотность скелета грунта, кг/м³; τ_n – время промораживания образца, с; $\partial T / \partial x$ – градиент температуры в мерзлой зоне, °С/м; $d\xi / d\tau$ – скорость продвижения фронта промерзания, м/с; K_{Mi} – коэффициент термовлагопроводности мерзлой зоны i -го слоя, кг/(К·м·с).

Кроме данных по коэффициенту термовлагопроводности мерзлой зоны на разработанной установке фиксируются данные по фактической деформации замороженного образца в закрытой системе с помощью демпферного стакана с мерной емкостью. Используя данные по перераспределению влаги после частичного промерзания образца, а также дополнительные данные по количеству незамерзшей воды в его промерзшей зоне можно дифференцированно оценить деформацию морозного пучения промерзшей части и усадку непромерзшей части. Такие данные являются необходимыми при оценке напряженно-деформированного состояния внутри цилиндрического контура заморозки горных пород для проходки шахтных стволов с применением искусственного замораживания.

Список литературы

1. Агутин К.А., Бровка Г.П., Романенко И.И. Установка для комплексного исследования криогенного пучения и процессов тепло- и массопереноса в промерзающих грунтах // Природопользование. 2011. Вып. 20. С. 129–133.
2. Бровка Г.П. Тепло- и массоперенос в природных дисперсных системах при промерзании. Минск: Навука і тэхніка, 1991. 191 с.

3. Бровка Г.П., Дедюля И.В., Лиштван И.И., Чураев Н.В. К вопросу о характеристиках массопереноса при промерзании торфа // Сборник научных трудов Всесоюзной конференции «Криология почв». Пушкино: Изд-во Пушкинского научного центра, 1991. С. 51–56.
4. Бровка Г.П., Дедюля И.В., Чураев Н.В. Термокристаллизационное течение тонких прослоек незамерзающей воды // Коллоидный журнал. 1990. Т. 52. № 2. С. 345–348.
5. Дерягин Б.В., Чураев Н.В. Течение незамерзающих прослоек воды и морозное разрушение пористых тел // Коллоидный журнал. 1980. Т. 42. № 5. С. 842–852.

K.A. Agutin, G.P. Brovka, A.A. Murashko

Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, kirill_agutin@gmail.com, brovka_gp@tut.by, amurbmw@tut.by

METHODS OF EXPERIMENTAL STUDY OF ROCK FROST UPHEAVAL CHARACTERISTICS

Abstract. The publication provides the substantiation of methods for determining the characteristics of moisture transfer, which causes frost upheaval during freezing of rocks. These methods based on theoretical and experimental studies that confirm the proportionality of the moisture flow from the thawed zone to the frozen one to the temperature gradient in the frozen zone at the border with the thawed one. Methods have been developed for determining the characteristics of moisture transfer during freezing of soils and rocks in open and closed systems. The report focuses on the new methodology presented for the first time for the experimental study of the characteristics of frost upheaval of rocks in a closed system, which can be used to assess the stress-strain state inside a cylindrical freezing circuit of rocks for driving mine shafts using artificial freezing.

Key words: frost upheaval; coefficient of thermal conductivity of frozen zone; moisture transfer; stress-strain state.

Фролов Д.М., Кошурников А.В., Гагарин В.Е., И.А. Набиев, Додобоев Э.И.

МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, denisfrolov@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ПОРОДЫ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ О ТЕМПЕРАТУРЕ ВОЗДУХА И ТОЛЩИНЕ СНЕЖНОГО ПОКРОВА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА АНЗОБСКОМ ПЕРЕВАЛЕ (ТАДЖИКИСТАН)

Аннотация. В контексте изменения климата нестабильность устойчивости состояния мерзлых пород в высокогорных районах является важным фактором риска для хозяйственной деятельности и инфраструктуры. Поскольку снижение прочности оснований сооружений из-за фазового перехода из мерзлого состояния в талое имеет большое влияние на устойчивость последних, в работе предлагается модель и численный метод для оценки глубины промерзания горных пород на основе данных о толщине снежного покрова и температуре воздуха. В работе также производится оценка влияния снежного покрова и температуры воздуха на глубину промерзания горных пород по предложенной расчетной схеме за зимние сезоны 2010/2011–2019/2020 гг. на Анзобском перевале в Таджикистане. Расчетная схема строилась на основе задачи теплопроводности трехслойной среды (снег, талая и мерзлая порода) с фазовым переходом на границе. Уравнение теплового баланса включало энергию фазового перехода, приток тепла из талой и отток в мерзлую породу и при наличии снежного покрова через него в атмосферу.

Ключевые слова: температура воздуха; снежный покров; промерзание горных пород; горные районы; Таджикистан.

Одним из факторов устойчивости селе- и лавиноудерживающих сооружений при строительстве в горных территориях на склонах является промерзание подстилающего основания, т.к. в этих районах породы могут находиться в мерзлом состоянии в течение восьми и более месяцев. Однако, происходящее последнее время изменение температуры воздуха и количества осадков (в первую очередь в виде снега) ведут к изменению глубины и длительности промерзания горной породы и как следствие снижение его прочностных свойств. Модельное исследование промерзания пород в горах представлено в работе [5]. В данной публикации на основе разработанной расчетной схемы производится оценка глубины промерзания пород для нескольких последних зимних сезонов на основе данных о толщине снежного покрова и температуре воздуха для Анзобского перевала в Таджикистане. Анзобский перевал находится на широте $39,07^\circ$ и долготе $68,88^\circ$ с высотой 3373 м н.у.м. Среднегодовая температура на перевале составляет $-2,7^\circ\text{C}$, но из-за сильного снегонакопления многолетнее промерзание отсутствует и наблюдается лишь сезонное. Расчеты изменения глубины сезонного промерзания породы производились по предложенной расчетной схеме [5] по данным о толщине снежного покрова и температуре воздуха на основании трехслойной модели среды (снег, талая и мерзлая порода) и при предположении

линейного изменения температуры в средах и тепловому потоку согласно закону Фурье.

В работе были рассмотрены располагаемые в открытом доступе на сайте «Погода и климат» архивные метеорологические данные по метеостанции «Анзобский перевал». И уже на основе выбранных из них данных по температуре воздуха и толщине снежного покрова за зимние сезоны 2010/2011–2019/2020 гг. (рис. 1) были произведены расчеты влияния толщины снежного покрова и температуры воздуха на глубину промерзания породы по предложенной авторами расчетной схеме.

Рис. 1. Изменения температуры воздуха и толщины снежного покрова по архивным данным метеонаблюдений для метеостанции «Анзобский перевал» для зимних периодов 2010/2011–2019/2020 гг.

Расчетная схема строилась на основе задачи теплопроводности трехслойной среды (снег, талая и мерзлая порода) с фазовым переходом на границе мерзлой и талой породы. Уравнение теплового баланса включало энергию фазового перехода, приток тепла из талой породы и отток в мерзлую породу, и при наличии снежного покрова через него в атмосферу. Поток тепла рассчитывался по закону Фурье, как произведение теплопроводности и градиента температуры. Предполагалось, что температура в каждой из сред изменяется линейно (например, [4]). Для снежного покрова и мерзлой породы использовалась формула теплопроводности двухслойной среды.

Расчет промерзания породы на основе данных о температуре воздуха, толщине и теплопроводности снежного покрова в течение зимнего периода

позволял оценить интенсивность движения фронта промерзания в этот период времени. Зависимость скорости движения фронта промерзания находилась по расчетной схеме. Схема учитывала примерзание породы снизу к мерзлому массиву в зимний период на основе данных о ежедневной температуре воздуха (а также толщине и теплопроводности снежного покрова).

Уравнение теплового баланса записывалось как $F_1 = cLV + F_2$ или как:

$$Dh_{\text{мг}}/d\tau = V = (F_1 - F_2)/cL, \quad (1)$$

где F_1 – отток тепла через замерзшую породу (и снежный покров) от фронта промерзания (Вт/м^2) в атмосферу; $cLV = cLdh_{\text{мг}}/d\tau$ – расход тепла на фазовый переход с влагосодержанием породы ($1\text{--}4 \text{ кг/см}^3$), (последнее значение соответствует полному заполнению пор водой у легкой глины с плотностью 2000 кг/м^3 и коэффициентом пористости $0,617$ [1]); L – энергия фазового перехода (335 кДж/кг); $V = dh_{\text{мг}}/d\tau$ – скорость движения фронта промерзания (см/с); F_2 – отток тепла на охлаждение талой породы перед фронтом промерзания (Вт/м^2).

Тепловой поток выражался по закону Фурье: $F = -\lambda \text{grad}T$. Тепловой поток через замерзшую горную породу от фронта промерзания в атмосферу в случае наличия снежного покрова выражался через теплопроводность и тепловой поток комбинации из двух сред (снежный покров и мерзлая порода) согласно данным справочника [2] как:

$$F_1 = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} = -\frac{\Delta T}{\frac{\Delta x_{\text{с}}}{\lambda_{\text{с}}} + \frac{\Delta x_{\text{мг}}}{\lambda_{\text{мг}}}} = \frac{-T_{\text{возд}}}{\frac{h_{\text{с}}}{\lambda_{\text{с}}} + \frac{h_{\text{мг}}}{\lambda_{\text{мг}}}}. \quad (2)$$

Здесь $T_{\text{возд}}$ – температура воздуха, $h_{\text{с}}$ и $h_{\text{мг}}$ – толщина снега и глубина промерзания, а $\lambda_{\text{с}}$ и $\lambda_{\text{мг}}$ – теплопроводность снега и мерзлой породы.

Предполагалось, что на глубине 10 м в горной породе находится точка нулевых годовых колебаний температуры T_0 со среднегодовым значением около $2,42^\circ\text{C}$. Поэтому

$$F_2 = -\lambda_{\text{тг}} \frac{\Delta T}{\Delta x} = \lambda_{\text{тг}} \frac{T_0}{10 - h_{\text{мг}}}, \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{тг}}$ – теплопроводность талого грунта. Вычисления производились с шагом в один день. На первый момент предполагалось, что толщина мерзлой породы $h_{\text{мг}}$ равнялась $0,5 \text{ см}$. На каждом шаге по времени (каждый день) вычислялась (рассчитывалась) скорость промерзания V и значение толщины мерзлой породы $h_{\text{мг}}$ для следующего дня (шага по времени). Согласно [1], средняя теплопроводность талой и мерзлой глинистой породы могла быть взята как $1,4$

и 1,8 Вт/м°C. Средняя теплопроводность снега λ_c рассчитывалась относительно плотности по формуле А.В. Павлова [3] и бралась равной 0,18 Вт/м°C. В работе для выведенного дифференциального уравнения по времени первого порядка для изменения глубины промерзания горной породы была построена разностная схема посредством аппроксимации этого дифференциального уравнения явным методом Эйлера: $h_{\text{мг}}(t_{n+1}) = h_{\text{мг}}(t_n) + \Delta t V(t_n)$. По полученной разностной схеме для каждого зимнего сезона 2010/2011–2019/2020 гг. были произведены расчеты изменения глубины промерзания суглинистых разностей. Примеры результатов расчета для зимних сезонов 2017/2018 и 2018/2020 гг. приведены на рис. 2 и 3.

Рис. 2. Изменения температуры воздуха (а), толщины снежного покрова и глубины промерзания верхней части разреза (б) по данным расчетов и наблюдений для метеостанции «Анзобский перевал» для зимнего периода 2017/2018 гг.

Рис. 3. Изменения температуры воздуха (а), толщины снежного покрова и глубины промерзания (б) верхней части разреза по данным расчетов и наблюдений для метеостанции «Анзобский перевал» для зимнего периода 2019/2020 гг.

Расчетное моделирование показало наличие сезонного мерзлого слоя на склоне северной экспозиции на глубине до 1,5 м. Так, в зимний период 2018 г. на склонах северной экспозиции глубина сезонного промерзания верхней части разреза составила 1,5 м (см. рис. 2).

В зимний период 2020 г. на склонах северной экспозиции глубина сезонного промерзания верхней части разреза составила 1,2 м при среднегодовой температуре горных пород $2,42^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 3).

Примененный метод расчета является физически достаточно обоснованным. Решение по методу хорошо описывает процесс изменения глубины промерзания в течение зимнего сезона. Важным для успешной работы метода является наиболее возможно точное задание начальных данных.

Согласно расчетам, верхняя часть разреза, состоящая в большей части из суглинков, под снежным покровом остается мерзлой на Анзобском перевале с декабря по апрель. Мощность накапливаемого снежного покрова может достигать при этом полутора метров и более. При этом верхняя часть разреза

под покрытой снежным покровом поверхностью промерзает согласно расчетам в среднем до 1,5 м. Таким образом, предложенный метод расчета динамики глубины промерзания горных пород на основе данных о температуре воздуха и толщине снежного покрова позволяет оценить их способность к упрочнению для достижения целей устойчивости при строительстве селе- и лавинозащитных сооружений.

Работа выполнена по теме государственного задания «Опасность и риск природных процессов и явлений» (№ 121051300175-4) и «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» (№ 121051100164-0).

Список литературы

1. Грунтоведение / В.Т. Трофимов, В.А. Королев, Е.А. Вознесенский, Г.А. Голодковская, Ю.К. Васильчук, Р.С. Зиангиров; под ред. В.Т. Трофимова. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во Московского университета, 2005. 1024 с.
2. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. 2-е изд. М.: Энергия, 1977. 344 с.
3. Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 284 с.
4. DeGaetano A.T., Cameron M.D., Wilks D.S. Physical simulation of maximum seasonal soil freezing depth in the United States using routine weather observation // Journal of Applied Meteorology. 2001. Vol. 40. No. 3. pp. 546–555.
5. Distributed snow and rock temperature modeling in steep rock walls using Alpine3D / A. Haberkorn, N. Wever, M. Hoelzle, M. Phillips, R. Kenner, M. Bavay, M. Lehning // The Cryosphere. 2017. No. 11. P. 585–607. <https://doi.org/10.5194/tc-11-585-2017>.

D.M. Frolov, A.V. Koshurnikov, V.E. Gagarin, I.A. Nabiev, E.I. Dodoboev

Lomonosov Moscow State University, Moscow, denisfrolov@mail.ru

APPLICATION OF THE CALCULATING SCHEME FOR GROUND FREEZING DEPTH BASED ON DATA ON AIR TEMPERATURE AND SNOW COVER THICKNESS DURING GEOTECHNICAL MONITORING ON THE ANZOB PASS (TAJIKISTAN)

Abstract. Rock instability in high-altitude areas is an important risk factor for humans and infrastructure, especially in the context of climate change. The presence of water in the rock leads to a clear increase in the strength of the rock, the effect is enhanced at lower temperatures and a higher degree of saturation. Since the decrease in rock strength due to the phase transition from frozen to thawed state has a great impact on the strength and stability of the rock, the publication proposes a model and a numerical method for estimating the depth of soil freezing based on data on

the thickness of the snow cover and air temperature. It is also evaluated the effect of snow cover and air temperature on the depth of freezing and rock stability according to the proposed calculation scheme for the winter seasons 2010/2011–2019/2020 at the Anzob pass in Tajikistan. The calculating scheme is based on the problem of thermal conductivity of a three-layer medium (snow, frozen and thawed rock) with a phase transition on the boundary. The heat balance equation included the energy of the phase transition, the heat inflow from the thawed rock and the outflow into the frozen ground and, in the presence of snow cover, through it into the atmosphere.

Key words: air temperature; snow cover; rock freezing; mountain regions; Tajikistan.

Белкова Е.А., Мотенко Р.Г., Гречищева Э.С.

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии,
г. Москва, ekatbelk@gmail.com, rmotenko@mail.ru
НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ “Строительство”», г. Москва, cryocrika@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НА ТЕМПЕРАТУРУ НАЧАЛА ЗАМЕРЗАНИЯ ГРУНТОВ РАЗНОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРИ ЕЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ

Аннотация. Развитие методологической базы по определению температуры начала замерзания открывает перспективы для оптимизации проектирования и строительства в криолитозоне зданий и сооружений разных классов ответственности. В криолитозоне в инженерно-строительных целях особое внимание уделяется прогнозу теплового режима грунтового массива, для которого необходима информация о температуре его замерзания или оттаивания. Главным и пока самым надежным способом в этом вопросе остается эксперимент.

Ключевые слова: температура начала замерзания; мерзлые грунты; температурный режим; экспериментальное исследование.

Дисперсные грунты – сложные многокомпонентные системы, в которых влага находится в нескольких энергетических состояниях, поэтому они замерзают в диапазоне отрицательных температур. Температура начала замерзания грунта в значительной степени определяет его состояние, глубину сезонного промерзания (протаивания) и другие теплофизические процессы и их длительность, а в конечном счете – надежность и долговечность эксплуатации зданий и сооружений. Существуют как экспериментальные, так и расчетные методы оценки температуры начала замерзания [6, 9]. Основными экспериментальными методами определения температуры начала замерзания остаются калориметрический, потенциометрический, криоскопический и другие методы, которые активно модифицируются и совершенствуются разными специалистами [3–5, 8, 13].

Объект исследования

Объектом исследования выступают грунты различного гранулометрического состава: песок, супесь, суглинок и глина. Физические свойства грунтов и их наименование по ГОСТ 25100-2020 [2] приведены в табл. 1. Песок и глина были отобраны в Подмоскowie, супесь и суглинок – в Тазовском районе Ямало-Ненецкого автономного округа в районе р. Мессояхи.

Методика приготовления образцов

Были приготовлены образцы, имеющие следующие значения суммарной влажности: для песка $W = 18,8\%$, супеси – $W = 19,3\%$, суглинка – $W = 21,7\%$ и

для глины $W = 53,1\%$. Выбор значений обусловлен водно-физическими свойствами грунтов – песок увлажнялся до степени, близкой к степени полного водонасыщения; супесь, суглинок и глина имели значения влажности, близкие к влажности на границе текучести.

Подготовка трех образцов каждого грунта осуществлялась путем приготовления пасты с заданными значениями влажности. В сухой грунт добавлялся необходимый объем дистиллированной воды, смесь перемешивалась до состояния однородной пасты. Полученная грунтовая смесь закладывалась и уплотнялась в формы (по 150 мл), в которых проводилось далее испытание. Полученный образец подписывался и нумеровался, накрывался 2–3 слоями полиэтилена и выстаивался более 2 ч до проведения исследования.

Таблица 1

Физические свойства исследуемых грунтов

Название образца	Содержание частиц, %							Гигроскопическая влажность, %	Плотность частиц грунта, г/см ³	Влажность на границе текучести, %	Влажность на границе раскатывания, %	Число пластичности	Относительное содержание органического вещества	Наименование по ГОСТ 25100-2020
	1-0,5 мм	0,5-0,25 мм	0,25-0,1 мм	0,1-0,05 мм	0,05-0,01 мм	0,01-0,002 мм	меньше 0,002 мм							
	A _{0,5}	A _{0,25}	A _{0,1}	A _{0,05}	A _{0,01}	A _{0,002}	A ₀							
Песок	0,7	4,7	62,8	25,2	4,7	1,9	0	0,6	2,65	-	-	-	-	Песок пылеватый однородный без органики
Супесь	6,1	10,3	30,2	27,3	15	5,7	5,4	1,2	2,67	19,8	16,1	3,7	-	Супесь песчаная без органики
Суглинок	6,8	10,5	19,6	14,8	21,5	11,7	15,1	1,8	2,69	22,9	13,9	9	-	Суглинок песчаный легкий без органики
Глина	1,1	2,8	5,6	11,9	28,6	32,9	17,1	3,9	2,68	55,6	34,6	21	0,07	Глина пылеватая легкая с примесью торфа

Методика исследований

В исследованиях был применен криоскопический метод, который считается традиционным и является наиболее удобным при определении температуры начала замерзания грунта [1].

Метод основан на том, что при фазовом переходе происходит выделение или поглощение избытка энергии в виде теплоты кристаллизации [6, 7, 12]. Выделяющееся тепло компенсируется теплоотводом, что приводит к закреплению в грунте температуры, принимаемой за температуру начала замерзания.

В проведенных испытаниях температура начала замерзания измерялась цифровыми датчиками. Цифровые датчики или аналого-цифровые преобразователи (АЦП) – современное изобретение, чувствительным элементом в которых является проводник или полупроводник. АЦП имеет

маленькие размеры и находится рядом с чувствительным элементом, что способствует прямому подключению без дополнительных проводов. В этом качестве АЦП есть следующие плюсы: снижается погрешность измерения за счет расположения чувствительного элемента и его работы при близкой температуре, также снижается потребление тока из-за отсутствия дополнительных проводов [9].

При проведении экспериментальных исследований был использован комплекс для определения температуры начала замерзания грунта – «Kriolab Tbf8» [10], позволяющий осуществлять измерения для восьми образцов за одно испытание.

Устройство комплекса включает в себя:

1. ИРК «KrioLab» в комплектации «Tbf»:

– термокоса (ТК), состоящая из группы датчиков температуры (до 4 шт.). Датчики загерметизированы в стальных игольчатых гильзах. Каждый датчик на отдельном кабеле, объединены в группу на одном разъеме (рис. 1, а);

– считывающее устройство (TKL мод. USB). Позволяет подключать термокосы производства KrioLab к персональному компьютеру посредством USB-кабеля (рис. 1, б);

– коммутатор, который позволяет подключать до четырех термокос (и других датчиков) к считывающему устройству (рис. 1, в).

2. Мобильную морозильную камеру с установленным коммутатором.

3. Программное обеспечение (ПО) «Kriolab Tbf» (рис. 1, г) [10].

Рис. 1. Устройство комплекса: а – термокоса, б – считыватель TKL (мод. USB),
в – коммутатор, г – ПО KrioLab Tbf [10]

Методика проведения испытания

1. В центр каждого готового образца помещался датчик на глубину геометрического центра (около 40 мм). Образцы выдерживались в таком положении 10–15 мин до устранения разницы температуры между датчиком и грунтовой пастой.

2. После производился запуск записи на ПО, а образцы помещались в морозильную камеру с заданной постоянной температурой: -2 , -6 , -10 , -20°C , производилось замораживание образцов.

3. Образцы грунта выдерживались в морозильной камере до тех пор, пока температура в образце не принимала температуру, заданную в морозильной камере. Время выдержки составляло от 5 до 14 ч, после чего грунт доставался из камеры для дальнейшего оттаивания.

4. Оттаивание производилось при комнатной температуре (18 – 23°C).

5. По завершении записи данные сохранялись, датчики извлекались, очищались и использовались в следующих испытаниях. После эксперимента образцы разделялись на три части для контрольного определения суммарной влажности.

В результате испытания были получены термограммы. Температура начала замерзания определялась как наиболее высокая и устойчивая ее характеристика, наступающая вслед за температурным скачком после температуры переохлаждения. Температура оттаивания определялась графически с помощью построения касательных, проведенных к участку слабо меняющейся температуры и участку резкого изменения температуры после фазовых переходов. Если график замерзания образцов представлял собой монотонную кривую линию, то температура начала замерзания определялась так же, как и в случае оттаивания, при помощи построения касательных.

Результаты экспериментальных исследований

Для выявления влияния режима замораживания на определение температуры начала замерзания было исследовано 144 образца грунтов разного гранулометрического состава. По данным, полученным в ходе исследования в циклах замерзания-оттаивания, были получены термограммы (рис. 2) путем осреднения результатов испытаний трех параллельных образцов. Проанализированы термограммы для песка ($W = 18,8\%$), супеси ($W = 19,3\%$), суглинка ($W = 21,7\%$) и глины ($W = 53,1\%$) при всех значениях температуры, заданной в морозильной камере (-2 , -6 , -10 и -20°C).

При анализе термограмм получены значения температуры начала замерзания ($t_{\text{нз}}$), оттаивания ($t_{\text{отт}}$), температуры переохлаждения ($t_{\text{пр}}$) (табл. 2).

Рис. 2. Термограммы заморзания и оттаивания при различных температурных режимах:
а – песок; б – супесь; в – суглинок; г – глина

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований песка, супеси, суглинка и глины при различных температурных режимах (температура начала заморзания ($t_{нз}$), оттаивания ($t_{отт}$), переохлаждения ($t_{пр}$))

Температура среды, °C	-2			-6			-10			-20		
Разновидность грунта	tнз	tотт	tпр	tнз	tотт	tпр	tнз	tотт	tпр	tнз	tотт	tпр
Песок (W=18,8%)	-0,10°C		-1,92°C	-0,10°C		-1,23°C	-0,10°C		-0,85°C	-0,04 °C		-0,67°C
Супесь (W=19,3%)	-0,17°C		-2,28°C	-0,17°C		-1,72°C	-0,17°C		-1,22°C	-0,15°C	-0,11°C	-0,70°C
Суглинок (W=21,7%)	-0,09°C	-0,04°C	-2,10°C	-0,09°C	-0,04°C	-0,97°C	-0,09°C	-0,04°C	-0,47°C	-0,09°C		-0,16°C
Глина (W=53,1%)	-0,09°C	-0,16°C	-1,97°C	-0,12°C	-0,16°C	нет	-0,13°C	-0,16°C	нет	-0,16°C		нет

Закономерности, обнаруженные в ходе эксперимента:

1. Температуры начала заморзания (оттаивания) исследуемых грунтов в общем виде мало зависят от температуры окружающей среды.

2. В испытаниях с песком, супесью и суглинком наблюдается общая тенденция к повышению температуры переохлаждения с понижением температуры окружающей среды. Однако в испытании с супесью

прослеживается длительное переохлаждение, связанное с высокой температурой испытания. При исследовании глины переохлаждение при -6 , -10 и -20°C не было зафиксировано, что связано вероятно с большой скоростью промерзания.

3. Длительность кристаллизация уменьшается с понижением температуры окружающей среды за исключением замерзания при -20°C , которое занимает больше времени, чем при -10°C и практически сопоставимо с результатами при -6°C . Оттаивание при -2 , -6 и -10°C одинаково, а при -20°C проходит дольше.

В табл. 3 представлены полученные лабораторные результаты в сопоставлении с данными, рекомендованными СП 25.13330.2012 [11].

Таблица 3

Экспериментальные и расчетные значения температуры начала замерзания грунтов

Температура среды, $^{\circ}\text{C}$	-2	-6	-10	-20	-
Разновидность грунта	Температура начала замерзания по экспериментальным исследованиям, $^{\circ}\text{C}$				Температура начала замерзания по СП 25.13330.2012, $^{\circ}\text{C}$
Песок ($W=18,8\%$)	$-0,10^{\circ}\text{C}$	$-0,10^{\circ}\text{C}$	$-0,10^{\circ}\text{C}$	$-0,04^{\circ}\text{C}$	$-0,15$
Супесь ($W=19,3\%$)	$-0,17^{\circ}\text{C}$	$-0,17^{\circ}\text{C}$	$-0,17^{\circ}\text{C}$	$-0,15^{\circ}\text{C}$	$-0,15$
Суглинок ($W=21,7\%$)	$-0,09^{\circ}\text{C}$	$-0,09^{\circ}\text{C}$	$-0,09^{\circ}\text{C}$	$-0,09^{\circ}\text{C}$	$-0,20$
Глина ($W=53,1\%$)	$-0,09^{\circ}\text{C}$	$-0,12^{\circ}\text{C}$	$-0,13^{\circ}\text{C}$	$-0,16^{\circ}\text{C}$	$-0,25$

Таким образом, данные из СП 25.13330.2012 [11] не в полной мере согласуются с экспериментальными значениями температуры начала замерзания. Следует отметить, что в нормативном техническом документе не учитывается влажность, особенности состава и свойств грунтов, а приведенные значения являются осреднением и обобщением большого количества экспериментальных данных. Многообразие природных грунтов обуславливает широкий диапазон изменения гранулометрического, химического и минерального состава, а также влажности грунта, которая в значительной степени влияет на температуру начала замерзания [12].

Заключение

Авторами проведены экспериментальные исследования по определению температуры начала замерзания грунтов разного гранулометрического состава с использованием комплекса – «Kriolab Tbf8» при выбранных значениях влажности.

Получены следующие результаты:

– температура окружающей среды практически не оказывает влияния на температуру начала замерзания (оттаивания) песка, а значения для супеси, суглинка и глины имеют тенденцию к уменьшению при понижении

температуры окружающей среды; при -6°C и -10°C получены наиболее близкие значения температур начала замерзания (оттаивания);

– температурный режим экспериментов отразился на температуре переохлаждения: в испытаниях с песком, супесью и суглинком температура переохлаждения с понижением температуры окружающей среды растет; для глинистых грунтов при высоких температурах окружающей среды может возникнуть длительное переохлаждение, а может не быть зафиксировано вовсе, как в испытаниях с глиной;

– длительность кристаллизация уменьшается с понижением температуры окружающей среды за исключением замерзания при -20°C , которое практически сопоставимо по времени с результатами при -6°C , это вероятно объясняется тем, что при такой низкой температуре начинает замерзать часть прочносвязанной воды. Длительность оттаивания одинакова для всех исследований, кроме испытаний при -20°C .

Выводы

Таким образом, на основании полученных результатов при использовании описанной выше методики показано, что оптимальной температурой окружающей среды при проведении испытаний на грунтах разного гранулометрического и минерального состава является температура в диапазоне от -6 до -10°C . При высокой отрицательной температуре значение температуры начала замерзания может быть искажено из-за отсутствия переохлаждения.

Для уточнения значений температуры начала замерзания глины и оценки влияния влажности, засоленности и заторфованности на грунты разного гранулометрического и минерального состава необходимы дополнительные исследования.

Для подтверждения корректности полученных данных по температуре начала замерзания грунтов необходимо сопоставление результатов с данными, установленными с помощью других апробированных методик.

Список литературы

1. Андрианов П.И. Температура замерзания грунтов. М.: Изд-во АН СССР, 1936. 16 с.
2. ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация.
3. Григорьев Б.В., Шабаров А.Б. Экспериментальное исследование промерзания – оттаивания грунтов в неравновесных условиях // Вестник Тюменского государственного университета. 2012. № 4. С. 53–60.
4. Истомин В.А., Чувилин Е.М., Махонина Н.А., Буханов Б.А. Определение температурной зависимости содержания незамерзшей воды в грунтах по потенциалу влаги // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 2. С. 35–43.

5. Колунин В.С., Ишкова З.А. Метод «начала кристаллизации» воды для определения температуры начала замерзания грунтов // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 6. С. 3–7. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-6\(3-7\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-6(3-7)).
6. Методы геокриологических исследований / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 2004. С. 507.
7. Мотенко Р.Г. Теплофизические свойства и фазовый состав влаги мерзлых засоленных пород. Автореф. дис. ... канд. геол-мин. наук. М.: МГУ, 1997. 24 с.
8. Определение температуры начала замерзания грунтов на основе измерения потенциала поровой воды / Е.М. Чувилин, Н.С. Соколова, Б.А. Буханов, В.А. Истомин, Г.Р. Мингареева // Криосфера Земли. 2020. Т. XXIV. № 6. С. 11–20. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-6\(11-20\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-6(11-20)).
9. Пособие по определению физико-механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов / Л.Т. Роман, М.Н. Царапов, П.И. Котов, С.С. Волохов, Р.Г. Мотенко, А.М. Черкасов, А.М. Штейн, А.И. Костоусов. М.: КДУ, Университетская книга, 2018. 188 с.
10. Руководство по эксплуатации. Комплекс для определения начала замерзания грунта «Kriolab Tbf» 4211-001-62766184-2019. М.: Криолаб, 2019. 11 с.
11. СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах.
12. Фазовый состав влаги в мерзлых породах / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 1979. С. 188.
13. Campbell G.S., Smith D.M., Teare B.L. Application of a dew point method to obtain the soil water characteristic // Experimental unsaturated soil mechanics. Springer Proceedings in Physics. Vol. 112. Berlin – Heidelberg: Springer, 2007. P. 71–77. https://doi.org/10.1007/3-540-69873-6_7.

E.A. Belkova¹, R.G. Motenko¹, E.S. Grechishcheva²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, ekatbelk@gmail.com, rmotenko@mail.ru

²Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP), Research Center of Construction JSC, Moscow, cryoerika@mail.ru

INFLUENCE OF THE TEMPERATURE REGIME ON THE TEMPERATURE OF THE BEGINNING OF FREEZING OF SOILS OF DIFFERENT GRANULOMETRIC COMPOSITION DURING TEMPERATURE EXPERIMENTAL DETERMINATION

Abstract. The development of a methodological basis for determining the freezing point opens up prospects for optimizing the design and construction of buildings and structures of different classes of responsibility in the cryolithozone. In the cryolithozone, for engineering and construction purposes, special attention is paid to the forecast of the thermal regime of the soil massif, for which information about its freezing or thawing temperature is needed. The experiment remains the main and, so far, the most reliable way in this matter.

Key words: freezing point; frozen soils; temperature regime; experimental study.

Шестернев Д.Д.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, shdd@inbox.ru

**ОСОБЕННОСТИ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ТЕРРИТОРИИ
ОБЪЕКТА АВИАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ
В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ**

Аннотация. Рассмотрены особенности геокриологических условий территории, принадлежащей к объектам авиационной инфраструктуры, расположенной в г. Якутске. Для изучения геокриологических условий на площадке исследования был выполнен комплекс различных видов работ. По полученным результатам было выделено три типа участков, которые характеризуются разным температурным режимом. На участках первого типа температура грунтов составляет $-0,5^{\circ}\text{C}$. Здесь температурный режим грунтов находится в стадии «становления». К участкам второго типа относятся такие участки, где температурный режим соответствует «естественным» условиям криолитозоны. Температура грунтов составляет $-1,9^{\circ}\text{C}$. На участках третьего типа в силу тех или иных причин происходит охлаждение грунтов. Средняя температура составляет $-5,9^{\circ}\text{C}$. На основе выполненных работ сформулированы выводы и рекомендации.

Ключевые слова: температура грунтов; геокриологические условия; криолитозона; мониторинг; термометрические наблюдения.

Объекты авиационной инфраструктуры – это важные и на настоящий момент единственные оперативные транспортные артерии, связывающие Республику Саха (Якутия) с центральными регионами России. Для обеспечения устойчивости данных сооружений, расположенных в криолитозоне, необходимо детальное изучение инженерно-геокриологических условий. Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН выполнил работы на территории одного из таких объектов.

Строительство и инженерное освоение территории аэропорта в г. Якутск началось в 1930-е гг. и продолжается до настоящего времени. Наиболее интенсивно этот процесс протекал во второй половине XX в., что объясняется развитием авиастроения в стране, появлением новых типов воздушных судов, что в свою очередь привело к необходимости модернизации существующих аэродромов.

Несмотря на большой объем фактического материала по данной территории, в целом геокриологическая ситуация не изучена. Существенными недостатками работ, которые были выполнены в предшествующие годы, на взгляд автора являются:

- материалы инженерных изысканий охватывали только локальные участки территории аэропорта, в пределах проектирования и строительства конкретных зданий и инженерных сооружений. Сопредельные территории не затрагивались;

- не выполнялся в достаточной степени анализ материалов предшествующих исследований;

– выполнялись только разовые замеры температур в период выполнения инженерно-геологических изысканий. Не было наблюдений за температурным режимом грунтов, как в процессе строительства, так и при эксплуатации инженерных сооружений;

– не была создана база данных по инженерно-геологическим условиям территории для контроля и отслеживания возникающих изменений.

В связи с этим появилась необходимость в оценке инженерно-геокриологических условий территории аэропорта для обеспечения устойчивости зданий и инженерных сооружений, которые входят в состав объекта, а также для проектирования и строительства зданий и инженерных сооружений в будущем.

Для изучения особенностей мерзлотно-гидрогеологического строения территории в аэропорту г. Якутска были выполнены следующие виды работ:

- изучение фондовых материалов;
- инженерно-геологическая рекогносцировка;
- бурение инженерно-геологических скважин;
- статическое зондирование грунтов непрерывным вдавливанием зонда;
- разовые замеры температур грунтов по всей территории;
- оборудование части скважин автоматизированными системами за температурным режимом грунтов;
- определение физико-механических свойств грунтов;
- геофизические работы методами сплошного электропрофилирования и георадиолокации.

В ходе выполнения геокриологических исследований на территории аэропорта, автором с коллегами было установлено, что криолитозона, особенно в верхней толще имеет довольно сложное строение. Это обусловлено, как техногенными, так и естественными природными факторами.

Данные об инженерно-геокриологических условиях площадки до начала строительства аэропорта отсутствуют, поэтому понятие о естественном строении криолитозоны было принято по аналогии с другими участками города, схожими по своим геоморфологическим, геологическим и другим природным факторам.

В 1930–1950-е гг. на территории г. Якутска и его окрестностей массовые измерения температуры грунтов были проведены в специально оборудованных термометрических скважинах. Термометрические исследования в этих скважинах показали, что можно считать температуру грунта практически постоянной уже с глубины 10–12 м. Такая глубина подтверждается многочисленными температурными исследованиями в годичном цикле в публикациях [1–3] и заключительным отчетом Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН «Организация и проведение геокриологического мониторинга на территории муниципального образования “Город Якутск”. Система геокриологического мониторинга» (ответственные исполнители В.В. Куницкий, И.В. Дорофеев, Я.И. Торговкин, 2011). Результаты термометрических

измерений показали, что мерзлые грунты застроенной части г. Якутска имеют температуру существенно ниже их температуры на ненарушенных участках той же территории.

Всю площадь исследования аэропорта по результатам термометрии на глубине нулевых годовых амплитуд температур, можно условно разделить на три участка:

1. Участки, отнесенные к первому типу – это участки, на которых происходит формирование криолитозоны после техногенного изменения природных условий (перекрыты насыпными грунтами при планировочных работах) в пределах подозерных таликовых зон. На данных участках температурный режим грунтов находится в стадии «становления». Температура мерзлых грунтов на глубине 10,0 м изменяется от $-0,2$ до $-0,9^{\circ}\text{C}$, составляя в среднем $-0,5^{\circ}\text{C}$. Такая температура грунтов находится рядом с границей фазовых переходов и это очень сильно влияет на физико-механические свойства грунтов.

2. Участки, отнесенные ко второму типу – это участки, на которых температурный режим можно отнести к «естественным» условиям криолитозоны. Данные участки характеризуется температурой мерзлых грунтов на глубине 10,0 м от поверхности земли от $-1,4$ до $-2,3^{\circ}\text{C}$, составляя в среднем $-1,9^{\circ}\text{C}$.

3. Участки, отнесенные к третьему типу – это участки, на которых происходит промораживание грунтов основания. Эти участки преимущественно распространены на открытых бетонных площадках, в зимний период с которых в силу специфики эксплуатации сооружений удаляется снежный покров. Данные участки характеризуется температурой грунтов на глубине 10,0 м от $-3,3$ до $-7,2^{\circ}\text{C}$, составляя в среднем $-5,2^{\circ}\text{C}$.

Сложность строения криолитозоны для исследуемой территории также подтверждается наличием засоленных грунтов и криопэгов. Водовмещающими для криопэгов являются засоленные грунты, которые представлены рыхлыми песками с весовой влажностью от 28,5 до 43,9%. Они относятся к охлажденным грунтам, поскольку имеют температуру $-0,3$ ÷ $-0,6^{\circ}\text{C}$. Температура начала замерзания этих грунтов может составлять от -1 до $-2,5^{\circ}\text{C}$. Перекрыты рассматриваемые грунты деятельным слоем.

На основании вышеизложенного подготовлены следующие выводы и даны рекомендации.

1. Формирование криолитозоны для территории аэропорта г. Якутска вследствие постоянного техногенного воздействия носит нестабильный характер. Грунты основания подвержены постоянному физико-химическому воздействию (изменение температуры, образование сезонного горизонта грунтовых вод, техногенные воздействия).

2. Учитывая сложность строения криолитозоны при проектировании инженерных сооружений, для теплотехнических расчетов температуру грунтов

на глубине годовых колебаний рекомендуется принимать разную, в соответствии с приуроченностью к одному из выделенных участков.

3. Рекомендуется проведение мониторинга за изменением температурного режима и уровнями грунтовых вод для оценки, контроля за геокриологической средой, своевременным и оперативным принятием решений по управлению и стабилизацией многолетнемерзлых оснований сооружений.

4. Режимные наблюдения целесообразно выполнять силами одной организации способной: вести наблюдения, сформировать информационную систему (базу данных), выполнять анализ мерзлотно-гидрогеологических условий территории, предлагать и участвовать в разработке превентивных (при необходимости капитальных) мероприятий по стабилизации инженерно-геологических условий и обеспечению устойчивости инженерных сооружений.

Список литературы

1. Павлова Н.А. Динамика мерзлотно-гидрогеохимической обстановки на участках распространения криопэгов в г. Якутске // Наука и образование. 2010. № 3(59). С. 15–19.
2. Соловьев П.А. О влиянии застройки города Якутска на температуру многолетнемерзлых горных пород // Труды Северо-Восточного отделения Института мерзлотоведения. 1958. Вып. 1. С. 179–191.
3. Сыромятников И.И., Дорофеев И.В. Особенности динамики температуры грунтов на территории г. Якутска // Наука и образование. 2014. № 4(73). С. 42–45.

D.D. Shesternev

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, shdd@inbox.ru

FEATURES OF GEOCRYOLOGICAL CONDITIONS OF THE TERRITORY OF THE AVIATION INFRASTRUCTURE FACILITY IN CENTRAL YAKUTIA

Abstract. It is considered the features of the geocryological conditions of the territory belonging to the objects of aviation infrastructure located in Yakutsk. To study the geocryological conditions at the research site, a complex of various types of work was performed. According to the results of research, 3 types of sites were identified in this territory, which are characterized by different temperature conditions. Sites of 1st type are areas where the soil temperature is -0.5°C . In the areas assigned to this type, the temperature regime of soils is in the “formation” stage. The temperature regime in 2nd-type sites corresponds to the “natural” conditions of the cryolithozone. The soil temperature is -1.9°C . 3rd-type sites are areas where, for one reason or another, soil cooling is observed. The average temperature is -5.9°C . Conclusions and recommendations are formulated based on the work performed.

Key words: soil temperature; geocryological conditions; cryolithozone; monitoring; thermometric observations.

Макарычева Е.М., Кузнецов Т.И.

ООО «НИИ Транснефть», центр мониторинга и геоинформационных систем объектов трубопроводного транспорта, лаборатория геотехнических обследований, г. Москва, MakarychevaEM@niitnn.transneft.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ КРИОЛИТОЗОНЫ

Аннотация. В работе представлен опыт ООО «НИИ Транснефть», накопленный за период 2017–2020 гг. ежегодных обследований методом воздушного лазерного сканирования (ВЛС) объектов магистральных нефтепроводов. Применение данного метода позволило получать детальную цифровую модель местности и аэрофотоснимки высокого разрешения на территорию обследования общей протяженностью более 6000 км. Описана методическая основа обработки и анализа данных ВЛС, в т.ч. с применением алгоритмов автоматизации. Получены результаты количественной оценки изменений рельефа за период обследований в связи с развитием экзогенных геологических процессов. Выделены преимущества и ограничения метода, а также возможные перспективы его применения при выполнении инженерно-геологического районирования при инженерных изысканиях для проектирования новых и реконструкции существующих инженерных объектов.

Ключевые слова: воздушное лазерное сканирование; инженерно-геологические изыскания; магистральный трубопровод; экзогенные геологические процессы.

При строительстве и эксплуатации нефтетранспортных объектов основной целью является обеспечение безопасности. Контроль планово-высотного положения трубопроводов и его изменений, в т.ч. в результате развития криогенных и других экзогенных геологических процессов (ЭГП) на территории прохождения трасс является приоритетной задачей.

В данной работе рассматриваются нефтетранспортные системы, расположенные на значительных по площади, труднодоступных территориях со сложными геоморфологическими условиями для которых особенно важно получение актуальной и детальной информации о состоянии природной среды и инженерных объектов. В настоящее время технологии лазерного сканирования находят все более широкое применение при решении подобных задач как при проведении инженерных изысканий, также и на стадии эксплуатации объектов при проведении геотехнического мониторинга.

В 2016 г. ООО «НИИ Транснефть» выполнило апробацию возможностей применения метода воздушного лазерного сканирования и цифровых ортофотопланов (ЦАФС) для геотехнического мониторинга на объектах магистральных нефтепроводов (МН). По результатам апробации было выявлено, что при высоте полета 250 м и скорости 100–300 км/ч при использовании 2 разных систем оборудования средняя плотность точек лазерных отражений составляет более 20 точек/м². Минимальные размеры идентифицируемых форм рельефа по точкам лазерных отражений составили: плановые 21×23 см, высотные 10 см. Средняя квадратическая ошибка

измерения планово-высотных координат точек лазерных отражений составила менее 6 см [2].

По результатам ВЛС строятся цифровые модели местности (ЦММ), включающие цифровые модели рельефа и серии производных карт (теневая отмывка рельефа, карта уклонов, карта экспозиции склонов, карта аккумуляции поверхностного стока), дополнительно выполняется аэрофотосъемка с получением ЦАФС высокого разрешения (4 см) и плановой точности не менее 25 см. В качестве геодезической основы используется в т.ч. местная автоматизированная геодезическая сеть с постоянно действующими референсными станциями.

По результатам ВЛС были выделены характерные признаки процессов на ЦММ и сериях производных карт, а также выбраны эталонные изображения, с применением которых осуществляется выделение границ распространения ЭГП и сложных геологических условий. По данным повторных обследований методом ВЛС производится количественная оценка изменений рельефа за период наблюдений и оценивается динамика ЭГП.

За период 2017–2020 гг. ежегодных обследований методом ВЛС в рамках геотехнического мониторинга объектов МН были накоплены данные об изменении рельефа территории в результате развития ЭГП и данные об изменениях инженерных объектов. Построены карты изменения рельефа местности на территорию протяженностью более 6000 км в буферной зоне шириной 150–300 м (рис. 1).

Рис. 1. Пример карты изменений рельефа местности по данным ВЛС 2016–2017 гг.

Все выделенные ЭГП по динамике разделяются на две группы: процессы с увеличением размеров (глубин, площадей) и процессы, приводящие к образованию новых форм. Результаты геотехнического мониторинга, в т.ч. результаты ВЛС, аккумулируются в специализированной 3D-ГИС для комплексного анализа и последующей оценки устойчивости инженерных объектов в процессе эксплуатации [4].

Так, например, в буферной зоне шириной 300 м МН «Заполярье-Пур-Пе», общей протяжённостью более 480 км, за 4-летний период обследований 2017–2020 гг. основные изменения связаны с развитием процессов термокарста и эрозии. По данным ВЛС среднее увеличение глубины по существующим эрозионным формам составило 73 см, максимальное за 4-летний период 790 см. Помимо динамики процессов учитывается их местоположение и возможность влияния на объекты МН.

В связи с объемами получаемой информации потребовалась разработка алгоритмов автоматизированного анализа данных ВЛС. Были разработаны алгоритмы автоматизации для каждого технологического этапа анализа данных. В настоящее время выполняется автоматическая привязка проявлений ЭГП к километровым знакам и секциям трубопровода, а также, например, данным инженерно-геологических изысканий. Выполняется расчет площадей и объемов явлений, что особенно важно при планировании грунтовых работ. Разработаны алгоритмы автоматического построения карты изменений рельефа местности за период обследований и визуализации карт ЦММ и аэрофотоснимков для каждого участка с ЭГП. Разработана система автоматической компенсации поправок при сравнении ЦММ с разным геодезическим обоснованием.

Результаты исследования ЭГП по данным ВЛС используются в качестве исходных данных для:

- выделения, конкретизации и планирования объемов наземных геологических обследований;
- обоснования местоположения и количества пунктов наземной наблюдательной сети мониторинга;
- анализа причин возникновения и развития изгибов трубных секций и перемещений;
- проведения расчетов предельных сроков эксплуатации трубопроводов;
- планирования и реализации компенсирующих мероприятий, объемов инженерной защиты и ремонтных работ.

Кроме применения ВЛС при геотехническом мониторинге объектов магистрального нефтепровода и окружающей среды все более перспективным становится его использование при выполнении топографо-геодезических работ при инженерных изысканиях для проектирования вновь строящихся и реконструируемых инженерных сооружений. В большинстве случаев ЭГП изучаются при полевых исследованиях, что приводит к удорожанию работ и перетрассировкам в связи с необходимостью обхода опасных участков. При

рекогносцировочных обследованиях и маршрутных наблюдениях данные об инженерно-геологических условиях получаются только в точках наблюдений, метод ВЛС позволяет получить данные на всю территорию обследований [1].

Выполнение ВЛС при проведении инженерно-геологического районирования при инженерных изысканиях в районах развития полигонально-жильных льдов также имеет ряд преимуществ перед изучением инженерно-геологических условий территории только при рекогносцировочном обследовании и маршрутных наблюдениях. Кроме того, выявление полигонально-жильных льдов при бурении инженерно-геологических выработок затруднительно, поскольку сетка бурения может не совпадать с сеткой расположения льдов.

Опережающее выполнение ВЛС и дешифрирование его результатов позволяет конкретизировать участки для проведения детальных обследований, оптимально выполнить расстановку инженерно-геологических скважин и геофизических профилей для изучения участков развития ЭГП (рис. 2). На базе ЦММ возможно планирование объемов наземных обследований.

Рис. 2. Пример расстановки геологических скважин и геофизических профилей на основе карты теневой отмывки рельефа

На рис. 3 приведен пример определения параметров участка с эрозией по данным ВЛС: а – карта теневой отмывки рельефа, б – аэрофотосъемка

Рис. 3. Определение параметров участка с эрозией по данным ВЛС: а – карта теневой отмывки рельефа, б – аэрофотосъемка

В табл. приведен перечень видов работ и требований к получаемым характеристикам ЭГП при выполнении инженерно-геологического районирования при инженерных изысканиях для проектирования новых и реконструкции существующих инженерных объектов в соответствии с нормативной технической литературой (НТД) СП 11-105-97, часть II [3] и возможность использования результатов ВЛС применительно к приведенным требованиям.

Таблица

Перечень характеристик ЭГП

№ п/п	Требование к выявлению проявлений ЭГП	Ссылка на НТД	Результат ВЛС
Участки развития склоновых процессов			
1	Выявление визуальных проявлений оползневых, осыпных и обвальных процессов на поверхности склона, эрозионной или абразионной подсечки склонов	СП 11-105-97, часть II (4.2.4) [3]	ЦМР, аэрофото-план
2	Установление размера оползня, амплитуды оползневого смещения, видов оползневых трещин на поверхности склона		ЦМР, аэрофото-план
3	Описание скальных склонов (откосов) (высота, крутизна, форма поверхности склона, расчлененность массива пород на отдельные блоки, наличие следов прошлых вывалов в виде отдельных глыб и их скоплений, наличие и типы осыпей, характер и угол наклона поверхности осыпи, состав и размеры обломочного материала, степень выветрелости пород склона (откоса), характер трещиноватости пород, среднее количество трещин на один погонный метр, ширину и глубину их раскрытия, наличие, состав и состояние заполнителя трещин, направление и угол падения трещин, интенсивность обвалообразования и осыпания, объемы оползневых осыпных и обвальных тел, наличие древесной и кустарниковой растительности)		ЦМР, аэрофото-план, карты стока, уклонов
Участки развития карстово-суффозионных процессов			
4	Проявления карста на земной поверхности – наличие карстовых провалов и оседаний земной поверхности, воронок, карстово-эрозионных котловин, оврагов, долин, полей, мульд оседания, карстовых рвов, карстовых останцов, поноров, карров, ниш, полостей и пещер, обнажении карстующихся пород	СП 11-105-97, часть II (5.2.4) [3]	ЦМР, аэрофото-план, карта уклонов

Результаты ВЛС и разработанная ООО «НИИ Транснефть» методика выявления ЭГП и изучения их динамики позволяют:

- построить трехмерные пространственно-временных цифровых моделей местности высокой точности, обеспечивающие сплошное покрытие обследуемых объектов, в т.ч. труднодоступных районов;
- построить топопланы масштаба 1:500 и мельче;
- применить алгоритмы автоматизации и обеспечить высокую производительность выполнения полевого и камерального этапов обследований;
- получить актуальные и количественные данные о рельефе местности и его изменениях в результате развития ЭГП;
- получить количественные характеристики инженерных объектов и данные об их изменении за период наблюдений;
- выполнить оценку природных и техногенных условий территории на базе комплексного анализа результатов разных видов геотехнических обследований и данных изысканий в специализированной 3D-ГИС.

Выводы

1. Применение ВЛС актуально при проведении инженерных изысканий и в ходе геотехнического мониторинга в труднопроходимых районах со сложными геолого-географическими условиями для получения детальной и актуальной информации о состоянии природной среды и инженерных объектов.
2. Кроме построения топографических планов необходимого масштаба при выполнении инженерных изысканий, ВЛС позволяет получить количественные данные о развитии ЭГП на всю территорию обследований.
3. Разработанная ООО «НИИ Транснефть» методика и алгоритмы автоматизации обработки и анализа данных ВЛС, обеспечивают экономию средств и ресурсов при проведении работ, позволяя получить стабильные и высокоточные результаты.

Список литературы

1. Баборыкин М.Ю. Практическое применение данных дешифрирования экзогенных геологических процессов по данным ВЛС // Независимый электронный журнал «Геоинфо». 2017. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.geoinfo.ru/product/baborykin-maksim-yurevich/prakticheskoe-primeneniye-dannyh-deshifirovaniya-ehkzogennyh-geologicheskikh-processov-po-dannym-vls-35064.shtml/> (дата обращения: 15.11.2021).
2. Макарычева Е.М., Ибрагимов Э.Р., Кузнецов Т.И., Шуршин К.Ю. Применение воздушного лазерного сканирования для геотехнического мониторинга объектов магистрального трубопровода // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. Т. 9. № 1. С. 21–31.

3. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов.
4. 3D-ГИС для сопровождения работ по геотехническому мониторингу объектов магистральных трубопроводов / Е.М. Макарычева, Т.И. Кузнецов, С.А. Половков, А.И. Барышев, Е.А. Покровская // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т. 10. № 4. С. 342–351.

Е.М. Makarycheva, T.I. Kuznetsov

Pipeline Transport Institute LLC, Moscow, MakarychevaEM@niitnn.transneft.ru

FUTURE FOR LIDAR METHOD USING TO CONDUCT ENGINEERING AND GEOLOGICAL SURVEYS IN PERMAFROST REGION

Abstract. It is presented the experience of the Pipeline Transport Institute LLC in annual LIDAR surveys of main pipelines over the period 2017–2020. The application of this method allowed obtaining a detailed digital terrain model and aerial photographs for the survey area with a total length exceeding 6000 km. The methodological basis for the processing and analysis of LIDAR data including the use of automation algorithms was described. The quantitative results of relief changes assessment due to exogenous geological processes development in the over observation period have been obtained. The advantages and limitation of the method were identified. Possibilities to LIDAR method using for the engineering-geological zoning performing in engineering surveys for design of new engineering facilities and reconstructions were established.

Key words: airborne laser scanning (LIDAR); engineering-geological surveys; main pipeline; exogenous geological processes.

СЕКЦИЯ «ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЯХ»

Алешин А.С.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, asa@ifz.ru

О НОРМАТИВНОЙ БАЗЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО МИКРОРАЙОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НОРМАЛЬНОГО УРОВНЯ ОТВЕТСТВЕННОСТИ

Аннотация. Нормативные технические документы (НТД), в которых рассматриваются особенности сейсмического микрорайонирования (СМР) объектов нормального и пониженного уровня ответственности, сформированы на уровне представлений полувековой давности. Между тем анализ содержания многочисленных отчетов по СМР нормального уровня ответственности обнаруживает в них большое количество недостатков, так или иначе связанных с выполнением нормативных требований НТД. Ниже сформулирован ряд основных предложений будущего норматива, призванного заметить действующие в настоящее время НТД.

Ключевые слова: объекты нормального и пониженного уровня ответственности; уточнение исходной сейсмической интенсивности; корреляционные соотношения; сейсмическая жесткость.

Введение

Тема настоящей публикации чрезвычайно важна по ряду причин. Нормативные технические документы (НТД), в которых рассматриваются особенности сейсмического микрорайонирования (СМР) объектов повышенного уровня ответственности, недавно вошли в арсенал методических рекомендаций и начинают использоваться в практике инженерных изысканий [7, 8]. В отношении объектов нормального и пониженного уровня ответственности (ОНУО) все остается на уровне представлений полувековой давности [3–5].

Между тем анализ содержания многочисленных отчетов по СМР ОНУО обнаруживает в этих отчетах большое количество недостатков, так или иначе связанных с выполнением нормативных требований указанных выше НТД.

Настоящий материал формулирует ряд основных предложений будущего норматива, призванного заметить действующие в настоящее время НТД [3–5]. Обсуждение выдвигаемых новаций представителями экспертного сообщества является одной из задач настоящего сообщения.

Недостатки отчетов связаны с недостатками нормативов

Одним из распространенных недостатков отрецензированных автором отчетов является разнობой в наборе использованных методик. Зачастую для

СМР ОНУО привлекаются весьма изощренные методики, например, вероятностного анализа сейсмической опасности. Здравый смысл предполагает, что методики СМР ОНУО должны быть по преимуществу простыми, приемлемыми для проверки общедоступными средствами. Другой пример – использование для СМР ОНУО способа многоканального анализа поверхностных волн MASW. Использование этой методики скорее всего уместно для СМР объектов повышенного уровня ответственности. Использование методик, совершенно недостаточно согласованных с характером районироваемых объектов, но рекомендованных НТД, напоминает некогда вводимое по всей России внедрение в сельское хозяйство кукурузы.

Другой тенденцией, отмеченной в практике СМР, является распространение положений СМР для объектов повышенного уровня ответственности на ОНУО. Примером подобного рода является использование для характеристики сейсмических воздействий акселерограмм.

Зачастую отчеты по СМР ОНУО перегружены второстепенными деталями, не имеющими прямого отношения к сути дела, например, приводятся каталоги землетрясений, происшедших в данном районе, последствия которых уже были учтены при составлении карты общего сейсмического районирования (ОСР).

Все отмеченные недостатки так или иначе связаны с недостатками нормативов [3, 4].

Идейная основа этих нормативов была разработана около полувека тому назад и опубликована в РСМ-73 [2]. С тех пор многое изменилось как в аппаратно-методическом отношении, так и в народно-хозяйственном укладе страны, что не могло не отразиться в практике СМР, пока не нашедшей соответствующего отражения в действующих НТД. Поэтому разработка нормативных документов СМР ОНУО нового поколения представляется приоритетной задачей.

Общие положения

Одним из новых положений будущего документа является разделение объектов СМР на площадные, сосредоточенные (характеризуемые одним значением исходной сейсмической интенсивности по карте ОСР), и линейные. Площадь сосредоточенных объектов не должна превышать 1 км².

В зависимости от типа объекта устанавливается состав и объем работ по СМР.

В результате работ по СМР для площадных и сосредоточенных объектов должна составляться одноименная карта, а для линейных строительных объектов – попикетная таблица как аналог карты СМР.

Масштаб карты СМР площадных объектов в зависимости от категории сложности инженерно-геологических условий лежит в пределах 1:5 000–1:25 000. Масштаб карты СМР для сосредоточенных объектов 1:1 000.

Для СМР ОНУО рекомендуется уточнение исходной сейсмической интенсивности. Здесь возможны два случая. В первом, районированный объект

входит в список городов и населенных пунктов России, расположенных в сейсмоактивных районах и характеризующихся интенсивностью 6 и более баллов (Приложение А к нормативу [6]). В этом случае по данным для данного пункта строится график зависимости интенсивности от периода повторяемости (рис. 1).

Рис. 1. Уточнение исходной сейсмичности (случай 1)

По усредненной зависимости $I = I(\lg T)$ определяется уточненное значение исходной сейсмической интенсивности данного пункта. Во втором случае, когда районируемый объект отсутствует в списке городов и населенных пунктов России проводится прямая, соединяющая соседние изосейсты на карте ОСР, проходящая через районируемый пункт и по положению пункта на прямой уточняется исходная сейсмическая интенсивность (рис. 2).

Рис. 2. Уточнение исходной сейсмичности (случай 2)

Основным методом СМР ОНУО является инженерно-геологический метод сейсмического микрорайонирования (ИГ СМР), при котором скорости

поперечных волн определяются с использованием корреляции инженерно-геологических и сейсмических параметров. На основе таких исследований определяется модель грунтовой толщи, учитывающая как упругие, так и неупругие свойства грунта. По модели грунтовой толщи определяются приращения сейсмической интенсивности. Сложением значений исходной сейсмической интенсивности и приращения сейсмической интенсивности определяется суммарная сейсмическая интенсивность. Значения суммарной сейсмической интенсивности определяются до десятых долей балла.

Использование геофизических (сейсмологических, микросейсмических и сейсморазведочных и др.) наблюдений не является обязательным при СМР ОНУО.

Инженерно-геологические исследования

Инженерно-геологические исследования являются главным элементом комплексных работ на площадке СМР.

Основные задачи, решаемые при инженерно-геологических исследованиях в комплексе работ по СМР ОНУО: изучение строения геологического разреза; определение физико-механических свойств грунтов; изучение неблагоприятных геологических процессов и явлений; построение инженерно-геологической модели грунтов. Отличие от установок старых нормативов РСН-60-86 и РСН-65-87 [3, 4] в том, что инженерно-геологические исследования являются не первоначальным этапом СМР, а имеют самостоятельное законченное значение. Инженерно-геологические исследования будут всегда в составе инженерных изысканий, независимо от того будут или не будут проводиться геофизические работы.

Основными методами изучения инженерно-геологических свойств грунтового массива являются: бурение скважин и исследование физических и физико-механических свойств грунтов лабораторными, а также полевыми методами.

Необходимая глубина скважин, пробуренных на площадке инженерно-геологических изысканий, должна быть не менее 30 м или, при наличии в разрезе скальных грунтов, не менее чем на 2 м глубже их кровли.

По результатам инженерно-геологических исследований грунтовая толща разбивается на инженерно-геологические элементы (ИГЭ). Для каждого ИГЭ необходимо определить плотность, модули деформации и (для скальных грунтов) прочность на одноосное сжатие.

Методика ИГ СМР существенно отличается от того, что описано в [3], в частности тем, что при этом не используется таблица 1 норматива [6].

Но самое главное в методике инженерно-геологических исследований, это то, что на основе инженерно-геологических данных определяются значения скоростей поперечных волн.

Для дисперсных грунтов это осуществляется на основе корреляционной связи модуля деформации $E_{\text{деф}}$ со значением скорости V_s , как показано на рис. 3.

Рис. 3. Корреляционная зависимость V_s от модуля деформации $E_{\text{деф}}$

Для скальных грунтов имеет значение корреляционная связь прочности на одноосное сжатие со скоростью поперечных волн V_s , графически представленная рис. 4.

Рис. 4. Корреляционная связь V_s с параметром σ/ρ

Инженерно-геофизические исследования

После всего сказанного, есть уверенность, что для многих весьма странным прозвучит утверждение, что никакие геофизические методы исследования для ОНУО нормативным документом РСН-60-86 [3] не предусмотрены. В том, что это так, каждый может убедиться, обратившись к Приложению 2 указанного норматива. Тем не менее почти во всех отчетах по

СМР ОНУО приводятся сведения о использовании геофизических методов как сейморазведочных, так и микросейсмических, а также электроразведочных. Результаты таких наблюдений не имеют большого значения по целому ряду причин.

Так сейсмологические наблюдения малопригодны в силу слабой сейсмической активности большинства регионов России. Для получения качественных результатов даже для таких сейсмически активных регионов как п-ов Камчатка требуется проведение сейсмологических наблюдений в течение длительного промежутка времени.

Наблюдения микросейсм малоэффективны в силу необходимости проведения синхронных наблюдений во многих точках, что также невыгодно по экономическим причинам.

Что касается сейморазведки методом преломленных волн, то использование ее малоэффективно как в силу слабого скоростного контраста в платформенных условиях, так и весьма частого наличия в грунтовом массиве инверсных слоев. Вообще все сейморазведочные методики (включая сейсмику отраженных волн) обладают недостаточной разрешающей способностью в условиях слабого скоростного контраста.

Таким образом, геофизические наблюдения для СМР ОНУО не являются обязательными, хотя их использование вовсе не запрещается.

Сейсмическая модель грунтовой толщи и ее параметры

Основным результатом инженерно-геологических исследований является построение сейсмической модели грунтовой толщи. От инженерно-геологической модели сейсмическая отличается лишь тем, что каждый слой дополнительно характеризуется значением скорости поперечных волн.

Для многослойной грунтовой толщи важны средние значения сейсмических параметров.

Средняя плотность грунтового массива определяется соотношением $\rho_{\text{сред}} = \sum \rho_i h_i / \sum h_i$. Среднее значение скорости поперечных волн V_s определяется соотношением: $V_{s\text{сред}} = \sum h_i / (\sum h_i / V_{si})$. Средняя сейсмическая жесткость определяется соотношением: $R_{\text{сред}} = \rho_{\text{сред}} V_{s\text{сред}}$.

Параметры эталонного грунта, по отношению к которому определяется приращение интенсивности к исходной сейсмической интенсивности, характеризуются фиксированным значением сейсмической жесткости, свойственным скальным грунтам $R \geq 2000 \text{ тм}^{-2}\text{с}^{-1}$. По этой причине исходная сейсмическая интенсивность принимается на 1 балл ниже нормативной.

Приращение сейсмической интенсивности и суммарная сейсмическая интенсивность

По параметрам сейсмической модели определяется приращение сейсмической интенсивности. Обращается внимание на то, что формула, определяющая значение приращения сейсмической интенсивности, отличается

от «привычной» $\Delta I = 1,67 \cdot \lg[(\rho V_s)_0/(\rho V_s)_1]$. Причиной этого является, как показано в [1], неверное предположение о равенстве потоков энергии в двух соседних точках. Хотя это положение, выдвинутое более десяти лет тому назад, никто и нигде не опровергнул, тем не менее неправильное соотношение до сих пор используется, поскольку оно прописано в нормативе РСН-60-86 [3]. Правильное соотношение выглядит так: $\Delta I = 1 - 3,3 \lg(R_1/R_0 + 1)$. График значений приращения сейсмической интенсивности от средней сейсмической жесткости приведен на рис. 5.

Рис. 5. Зависимость приращения сейсмической интенсивности от средней сейсмической жесткости грунтового массива

Суммарная сейсмическая интенсивность определяется сложением значений исходной сейсмической интенсивности и приращения сейсмической интенсивности. Необходимо заметить, что оба слагаемых определены с точностью до десятой доли балла. Таким образом значение суммарной сейсмической интенсивности определяется значительно точнее по сравнению с процедурой, предусмотренной пп. 1.9, 1.12 норматива РСН-60-86 [3].

Расчетные сейсмические нагрузки

По полученному значению суммарной сейсмической интенсивности устанавливаются нормативное значение пикового сейсмического ускорения и графика спектра реакции в соответствии с п.5.2 норматива СП 14.13330.2018 [6]. Использование акселерограмм для расчета сейсмических нагрузок не предполагается.

Отчетные материалы

В состав отчетных материалов входят: отчет, таблицы, карты.

Отчет должен содержать следующие разделы:

Введение.

Общие сведения о рельефе и геологии участка изысканий.

Исходная сейсмичность участка работ.

Инженерно-геологические и физико-механические свойства грунтов участка.

Модели грунтовых толщ.

Приращения сейсмической интенсивности на площадке изысканий.

Заключение.

Литература.

Необходимые таблицы: физико-механические свойства грунтов, модели грунтовых толщ, таблица приращений и суммарной сейсмической интенсивности.

Необходимые карты: обзорная схема участка изысканий, фрагмент карты ОСР с участком изысканий, карта сейсмического микрорайонирования.

Структура документа

НТД по СМР ОНУО должен содержать следующие разделы:

1. Уточнение исходной сейсмичности с использованием карт ОСР.
2. Физико-механические свойства грунтов площадки изысканий, включая значения скорости поперечных волн для каждого ИГЭ.
3. Формирование сейсмической модели грунтовых толщ.
4. Эталонный грунт определяется фиксированными параметрами.
5. Определение приращений сейсмической интенсивности и суммарной сейсмической интенсивности.
6. Составление карты сейсмического микрорайонирования площадки изысканий

Заключение

Изложенные соображения представляют собой «стартовый уровень», от которого следует начать разработку предполагаемого нормативного технического документа, а в процессе дальнейшей работы эти основополагающие предложения будут дополнены и конкретизированы.

Список литературы

1. Алешин А.С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. М.: Светоч Плюс, 2010. 304 с.
2. РСМ-73 Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию.
3. РСН-60-86 Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Нормы производства работ.
4. РСН-65-87 Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ.

5. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть I – Часть V.
6. СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*».
7. СП 283.1325800.2016 Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрорайонирования.
8. СП 408.1325800.2018 Детальное сейсмическое районирование и сейсмомикрорайонирование для территориального планирования.

A.S. Aleshin

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, asa@ifz.ru

ABOUT THE REGULATORY SYSTEM OF SEISMIC MICROZONING OF OBJECTS OF A NORMAL LEVEL OF RESPONSIBILITY

Abstract. Regulatory documents that consider the features of seismic microzonation (SMZ) of objects of normal and reduced levels of responsibility are formed at the level of representations of half a century ago. Meanwhile, an analysis of the content of numerous reports on the SMZ of the normal level of responsibility reveals in these reports a large number of shortcomings, one way or another related to the implementation of the regulatory requirements of the above documents. A number of main proposals of the future standard, designed to replace the currently existing regulatory documents, are formulated below.

Key words: objects of normal and reduced level of responsibility; clarification of the initial seismic intensity; correlation relations; seismic rigidity.

Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, felix@ifz.ru

СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ ЗАТУХАНИЯ УСКОРЕНИЙ

Аннотация. Анализируются теоретические представления и методика обработки эмпирических данных, на основании которых созданы общепринятые модели генерации и затухания амплитуд сейсмических колебаний. Показана ошибочность предположений о зависимости амплитуд от магнитуды в инженерном диапазоне сейсмических воздействий (6–10 баллов). Общепринятые модели генерации и распространения сейсмических волн построены с нарушениями правил размерностей и подобия. Поэтому определение магнитуды землетрясения в инженерном диапазоне воздействий не применимо. Установлены существенные погрешности методики обработки эмпирических данных. Большие погрешности возникают вследствие предположения, что затухание амплитуд можно описать одним уравнением для ближней и дальней зоны. Предложена система уравнений затухания амплитуд сейсмических колебаний, построенная без каких-либо допущений и предположений. Среднеквадратичное отклонение существенно сократилось.

Ключевые слова: уравнения затухания ускорений; стандартные отклонения; магнитуда; разломная, ближняя и дальняя зоны; добротность среды.

Для расчетов синтетических акселерограмм необходимо знать законы затухания ускорений от расстояния. Существует множество таких уравнений, в которых учитывается магнитуда землетрясения, механизм очага, грунтовые условия. Погрешности уравнений затухания, используемые при этом, основаны на ряде допущений и предположений. Законы теории размерностей и подобия при этом во внимание не принимаются. Логарифм амплитуды колебаний предполагается пропорциональным магнитуде, согласно определению последней. Но выбор референтного расстояния 100 км независимо от магнитуды землетрясения приводит к тому, что для малых магнитуд референтному расстоянию соответствует зона малых деформаций, а для сильнейших землетрясений референтному расстоянию соответствует очаговая зона. Выбор фиксированного референтного расстояния вызвано тем, что флуктуации амплитуд в зависимости от расстояния связаны со внутренним строением среды и наблюдаются на определенных расстояниях, независимо от энергии источника. Но что хорошо для «большой» сейсмологии, не годится для инженерной сейсмологии. Еще в работе [2] указывалось, что магнитуда землетрясения определяется не плотностью энергии в единице объема, а размерами очаговой области. Многие исследователи отмечают независимость ускорений от магнитуды на малых расстояниях [5–8, 12, 13, 19]. Одним из соавторов данной публикации при оценке сейсмических воздействий для Ставропольского края (1996) было обнаружено, что кривые затухания для различных магнитуд могут быть совмещены путем сдвига кривых не по оси амплитуд, а по оси расстояний по закону [4]:

$$\lg R^* = \lg R - 0,33M_s, \quad (1)$$

где R – кратчайшее расстояние от поверхности разлома; R^* – расстояние, нормированное по магнитуде M_s .

Другим часто используемым фактором, влияющим на затухание амплитуд, является добротность среды. Но из механики известно, что при больших нагрузках образуется петля гистерезиса, и декремент поглощения становится пропорциональным деформации. Влияние же добротности среды становится пренебрежимо малой величиной.

Важной причиной погрешностей является допущение того, что затухание сейсмических воздействий можно описать одним уравнением. Между тем, давно известно, что сейсмическое движение грунта существенно различается, по крайней мере, в ближней и дальней зонах, выделяемых большинством исследователей. О независимости амплитуд ускорений вблизи разлома говорилось выше. Но на некотором удалении от разлома зависимость ускорений от магнитуды не вызывает никаких сомнений. Многие исследователи отмечают, что в ближней зоне типы грунтов не влияют на уровень колебаний [8–10, 14–17], а в дальней зоне амплитуды на рыхлых грунтах гораздо выше, чем на скальных.

При аппроксимации затухания эмпирических данных обычно выбирается математическое выражение, для которого эмпирическим путем подбираются коэффициенты. Такие уравнения предлагается называть полуэмпирическими. В Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН аппроксимирующая функция заранее не выбиралась. Такие уравнения далее будут называться эмпирическими. Средние значения ускорений в узких интервалах расстояний аппроксимировались тремя отрезками прямых в инженерном диапазоне интенсивностей (6–9 баллов) (рис.). В каждой зоне наблюдаются различные затухания ускорений и различные зависимости ускорений от магнитуды землетрясения, механизма очага и грунтовых условий. Неожиданным оказалось возрастание амплитуды с расстоянием в непосредственной близости от разлома. Предлагается называть эту зону разломной. Возрастание ускорений с расстояниями отмечалось в работах [4, 11]. Отмечался этот эффект и в других работах, который считался случайным, вызванным, например, ошибками измерения расстояний.

Если нормировать расстояния по закону, описываемому формулой (1), то задача нахождения закона затухания амплитуд значительно упрощается, поскольку исчезает зависимость от магнитуды, а точность оценок существенно повышается.

Эмпирические уравнения для разломной зоны имеют вид:

$$\lg PGA(R^*) = \lg PGA_f + C \lg(1 + R^*) \pm 0,17, \quad (2)$$

где PGA_f – ускорение на поверхности разрыва, C – коэффициент, зависящий от механизма очага.

Рис. Затухание пиковых ускорений по эмпирическим данным [3].

Обозначения: зоны: I – разломная; II – ближняя; III – дальняя; механизм очага: 1 – взбросы; 2 – сдвиги; 3 – сбросы; категория грунтов: 4 – первая; 5 – вторая; 6 – третья; в дальней зоне зависимость затухания от магнитуды не учитывалась

Значения PGA_f и коэффициента C приведены в табл.

Таблица

Значения PGA_f и коэффициента C

Механизм очага	PGA_f , см/с ²	C	$PGA_{\text{макс}}$
Взброс	437	52,5	871
Сдвиг	309	38,0	661
Сброс	219	28,0	536

От категории грунта амплитуда в разломной зоне не зависит. Однако интенсивность зависит от остаточных деформаций, возрастающих с амплитудой. Это один из факторов, почему связь интенсивности с ускорениями неоднозначна. Максимальные значения ускорений наблюдаются на границе разломной и ближней зон.

В ближней зоне уровень ускорений не зависит ни от свойств грунта, ни от механизма очага. Эмпирическое уравнение затухания ускорений имеет вид:

$$\lg PGA = 1,8 - 0,63 \lg R^* \pm 0,17. \quad (3)$$

Граница ближней и дальней зоны находится на расстоянии $R^* = 0,2$ для скальных грунтов. На этой границе $PGA = 175$ см/с², а интенсивность в среднем

7,5 баллов (кроме ускорений на интенсивность оказывают влияние преобладающий период колебаний и их продолжительность).

Для дальней зоны получено эмпирическое уравнение

$$\lg PGA = C - (2,76 - 0,17M_s)\lg R^* \pm 0,2, \quad (4)$$

где $C = 0,9$ для скальных, $1,1$ средних и $1,3$ для рыхлых грунтов.

Отмечается резкое увеличение затухания в дальней зоне. Это можно объяснить только тем, что граница ближней и дальней зон является границей очага землетрясения.

Полученная оценка размеров очага вполне согласуется с оценкой, полученной совершенно другим методом [18]. Использование нормированных значений расстояния значительно облегчает задачу нахождения закона затухания амплитуд, поскольку исчезает зависимость от магнитуды, а точность оценок существенно повышается. Если при полуэмпирическом методе отклонение амплитуды ускорений составляет $0,27-0,41$ единиц десятичного логарифма в зависимости от размеров рассматриваемой эпицентральной области, то при предлагаемой методике стандартное отклонение для выборки данных по всему миру составляет $0,17$ для разломной и ближней зон, и $0,20$ для дальней зоны.

Представляет интерес продолжительность колебаний, влияющая на сейсмическую интенсивность. Это еще один фактор, определяющий неоднозначность связи интенсивности с ускорениями. Во избежание путаницы (существует масса различных определений) предлагается пользоваться термином «ширина импульса», как в радиолокации. Следует напомнить, что ширина импульса определяется как интервал времени, в течение которого уровень огибающей колебаний превосходит половину максимального значения. Интенсивность связана с ускорением и шириной импульса следующим образом [1]:

$$I = 2,5\lg PGA + 1,25\lg \tau + 1,05, \quad (5)$$

где τ – ширина импульса.

В инженерной сейсмологии такое определение продолжительности колебаний в отличие от других определений соответствует правилам теории размерностей и подобия. Эмпирическая зависимость ширины импульса в разломной и ближней зонах от магнитуды имеет вид [3]:

$$\lg \tau = 0,33M_s - 1,63. \quad (6)$$

От расстояния и грунтовых условий ширина импульса в этих зонах не зависит.

В дальней зоне эмпирическое уравнение имеет вид:

$$\lg \tau = 0,17M_S + 0,51\lg R^* + C, \quad (7)$$

где $C = 0,1$ для грунтов 1-й категории, $0,25$ для грунтов 2-й категории и $0,65$ – для грунтов 3-й категории.

Список литературы

1. Аптикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. М.: Наука и образование, 2012. 176 с.
2. Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Штейнберг В.В. О зависимости энергии землетрясения от объема очага // Доклады АН СССР. 1983. Т. 221. № 3. С. 598–602.
3. Эртелева О.О. Параметры сейсмических колебаний в эпицентральных областях землетрясений: автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. М.: ИФЗ РАН, 2020. 49 с.
4. Aptikaev F., Erteleva O. Features of seismic waves propagation near fault // Presentations of the XXIV IUGG General Assembly. Perugia, Italy, 2007. Presentation No. 6374. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.iugg.org/assemblies/2007perugia/> (дата обращения: 20.10.2021).
5. Bolt B.A., Abrahamson N.A. New attenuation relations for peak and expected accelerations of strong ground motion // Bulletin of the Seismological Society of America. 1982. Vol. 72. P. 2307–2321.
6. Bommer J.J., Martinez-Pereira A. Strong-motion parameters: definition, usefulness and predictability // Proceedings of the XII World Conference on earthquake engineering. Auckland, New Zealand, 2000. ID 0206.
7. Bureau G.J. Near-source peak ground acceleration // Earthquake Notes. 1981. Vol. 52. No. 1. P. 81–99.
8. Campbell K.W. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration // Bulletin of the Seismological Society of America. 1981. Vol. 71. No. 6. P. 2039–2070.
9. Chiaruttini C., Siro L. The correlation of peak ground horizontal acceleration with magnitude, distance, and seismic intensity for Friuli and Ancona, Italy, and the Alpid belt // Bulletin of the Seismological Society of America. 1981. Vol. 71. No. 6. P. 1993–2009.
10. Duke C.M., Johnsen K.E., Larson L., Engman D.C. Effects of site classification and distance on instrumental indices in the San Fernando earthquake // Proceedings of the International Conference on microzonation for safer construction, research, and application. Seattle, WA, USA: National Science Foundation, 1972. Vol. 2. P. 465–482.
11. Graizer V., Kalkan E. Prediction of spectral acceleration response ordinates based on PGA attenuation // Earthquake Spectra. 2009. Vol. 25. No. 1. P. 39–69.

12. Hanks T.S., Johnson D.A. Geophysical assessment of peak accelerations // Bulletin of the Seismological Society of America. 1976. Vol. 66. P. 659–968.
13. Heaton T. Will performance based earthquake engineering break the power law // Seismological Research Letters. 2007. Vol. 78. No. 2. P. 183–185.
14. Joyner W.B., Boore D.M. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake // Bulletin of the Seismological Society of America. 1981. Vol. 71. No. 6. P. 2011–2058.
15. Mc Guire R.K., Barnhard T.P. The usefulness of ground motion duration in predicting the severity of seismic shaking. Preprint. 1979. 17 p.
16. Neumann F. Earthquake intensity and related ground motion. Seattle, WA, USA: University of Washington Press, 1954. 77 p.
17. Trifunac M.D. Preliminary analysis of the peaks strong earthquake ground motion-dependence of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance, and recording site conditions // Bulletin of the Seismological Society of America. 1976. Vol. 66. No. 1. P. 132–162.
18. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length rupture width, rupture area, and surface displacement // Bulletin of the Seismological Society of America. 1994. Vol. 84. No. 4. P. 974–1002.
19. Yamada M., Olsen A., Heaton T. Statistical features of short- and long-period near-source ground motion // Bulletin of the Seismological Society of America. 2009. Vol. 99. No. 6. P. 3264–3274. <https://doi.org/10.1785/0120090067>.

F.F. Aptikaev, O.O. Erteleva

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, felix@ifz.ru

SYSTEM OF ACCELERATION ATTENUATION EQUATIONS

Abstract. We analyze the theoretical notions and the method of processing empirical data, on the basis of which the generally accepted models of generation and attenuation of seismic vibration amplitudes were created. The erroneous assumptions about the dependence of amplitudes on magnitude in the engineering range of seismic effects (6–10 points) are shown. Generally accepted models of seismic wave generation and propagation are constructed with violations of the rules of dimensionality and similarity. Therefore, the determination of earthquake magnitude in the engineering range of impacts is not applicable. Significant errors in the method of processing empirical data are established. Large errors arise due to the assumption that the attenuation of amplitudes can be described by one equation for the near and far zones. A system of equations of seismic vibration amplitude attenuation constructed without any assumptions and suppositions is proposed. The mean-square deviation has been significantly reduced.

Key words: equations of acceleration attenuation; standard deviations; magnitude; fault, near-field, and far-field zones; Q factor.

Эртелева О.О.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, ertel@ifz.ru

ПРОГНОЗ ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ

Аннотация. Коэффициент динамического усиления β наряду с преобладающим периодом и логарифмической шириной спектра является параметром, характеризующим спектр реакции. Как правило, при прогнозе сейсмических воздействий коэффициент β считается величиной постоянной, не зависящей от каких-либо факторов за исключением грунтовых условий. В публикации рассматриваются взаимосвязи коэффициента динамического усиления с другими характеристиками сейсмического движения грунта, а также влияние на его формирование параметров очага и среды. Оценены средние значения и соответствующие стандартные отклонения величины β с учетом различных факторов. Результаты исследования могут быть использованы при прогнозе сейсмических воздействий.

Ключевые слова: коэффициент динамического усиления; спектр реакции; ширина спектра; пиковое ускорение грунта; продолжительность колебаний; количество циклов; категория грунта; механизм очага.

Коэффициент динамического усиления β – один из параметров, характеризующих спектр реакции, который используется в инженерных расчетах при проектировании сооружений [6, 11, 18]. Наиболее часто этот параметр упоминается при изучении влияния грунтов на амплитуды сейсмических колебаний при проведении работ по сейсмическому микрорайонированию [1, 2, 4, 19]. Он является неотъемлемой частью различных строительных норм и правил [7–10, 13, 20, 21]. Однако работ, посвященных исследованиям взаимосвязи β с различными факторами, влияющими на формирование спектра колебаний, крайне мало [12, 18, 22].

В предлагаемой работе для решения поставленной задачи – оценки величины коэффициента β – использовался набор эмпирических данных по сильным движениям грунта различных регионов мира. Были рассчитаны спектры реакции при 5%-ном затухании и применена их статистическая обработка.

Прежде всего, среди характерных особенностей этой спектральной характеристики следует отметить высокую стабильность ее численного значения: параметр β как величина безразмерная практически не зависит от магнитуды землетрясения; влияние других очаговых параметров и грунтовых условий незначительно. Для различных регионов среднее значение β составляет 3,4–3,7 [12, 14, 17]. На рис. 1 представлены результаты статистической обработки массива данных β на максимальной горизонтальной компоненте ускорения без учета магнитуды землетрясения, механизма очага, расстояния и грунтовых условий (выборка составила 802 события).

Рис. 1. Распределение логарифма коэффициента динамического усиления β максимальной горизонтальной компоненты (без учета магнитуды, механизма очага, расстояния и грунтовых условий, 802 события). Красная линия – распределение Гаусса с параметрами $0,56 \pm 0,10$ ($\beta = 3,63$)

Эмпирическая оценка коэффициента β максимальной горизонтальной компоненты составила $\lg \beta = 0,56 \pm 0,10$ ($\beta = 3,63$). Аналогичная процедура для второй горизонтальной компоненты приводит к оценке $\beta = 3,4$. При совместной обработке обеих горизонтальных компонент $\beta = 3,5$. Очевидно, что полученные значения не противоречат результатам других авторов [12, 14, 18], полученным независимо.

Для изучения влияния на величину β механизма очага землетрясения были определены значения β для разных типов механизмов в отдельности. Распределение $\lg \beta$ для взбросов (38 записей) (рис. 2) описывается выражением $\lg \beta = 0,58 \pm 0,08$ ($\beta = 3,80$), для сдвигов – $\lg \beta = 0,47 \pm 0,13$ ($\beta = 3,01$) и $\lg \beta = 0,54 \pm 0,06$ ($\beta = 3,47$) для сбросов. Следовательно, параметр β зависит от типа подвижки в очаге. Наименьшее значение он имеет для механизмов сдвигового типа, а наибольшее – для сбросов и взбросов.

Сгруппировав имеющиеся данные по грунтам I, II и III и IV категорий, была исследована связь коэффициента динамического усиления β с типом грунта в точке регистрации. Для примера результаты описанной процедуры для грунтов I категории показаны на рис. 3. В зависимости от категории грунта коэффициент β различается не более, чем на 10%: на слабых грунтах (III и IV категории) значение его наиболее низкое ($\beta = 3,4$), на скальных (I категория) – наиболее высокое ($\beta = 3,7$), а для грунтов II категории β имеет промежуточное значение ($\beta = 3,6$).

Рис. 2. Эмпирическое распределение коэффициента динамического усиления β для взрывов (38 событий). Красная линия – распределение Гаусса с параметрами $0,58 \pm 0,08$ ($\beta = 3,80$)

Рис. 3. Эмпирическое распределение коэффициента динамического усиления β для грунтов I категории (590 событий). Красная линия – распределение Гаусса с параметрами $0,57 \pm 0,10$ ($\beta = 3,7$)

Для исследования зависимости β от амплитуды ускорения (PGA) были построены распределения величины $\lg \beta$ для различных интервалов $\lg \text{PGA}$, шириной в 0,3 ед. дес. логарифма и шагом 0,2 ед. дес. логарифма для диапазона значений $1,0 < \lg \text{PGA} < 3,0$. Анализ таких распределений показал, что величина PGA влияет на значение β : с ростом уровня колебаний коэффициент динамического усиления уменьшается от значения 3,6 при $\text{PGA} = 16 \text{ см/с}^2$ до

2,8 при $PGA = 800 \text{ см/с}^2$ (≈ 9 баллов) (табл. 1). Следует отметить, что к подобным выводам пришли и другие исследователи [14, 15, 19, 22]: установлено, что при значениях $PGA < 0,2g$ значение β остается в среднем постоянным, а при $PGA > 0,2g$ – уменьшается.

Таблица 1
Зависимость коэффициента динамического усиления от амплитуды ускорения

$\lg PGA$	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8–3,0
N	601	495	362	255	167	109	72	40	7	11
$\lg \beta$	0,56	0,55	0,55	0,54	0,53	0,52	0,52	0,50	0,51	0,45
β	3,6	3,6	3,5	3,5	3,4	3,2	3,2	3,1	3,2	2,8
σ	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,12	0,13	0,15	0,16

Примечание: N – количество данных в выборке, σ – стандартное отклонение.

Из табл. 1 видно, что резкое изменение величины β происходит при значении пикового ускорения $\sim 175 \text{ см/с}^2$, что соответствует границе между ближней и дальней зонами [5]. Необходимо отметить, что в работе [16] установлено, что при больших значениях пикового ускорения не только наблюдается спад β , но и сглаживаются, «размываются» резонансы в грунтах, вплоть до их полного исчезновения, что может быть объяснено возрастанием декремента поглощения с возрастанием уровня колебаний и других нелинейных эффектов в среде.

Рассмотрение распределения величины $\lg \beta$ в различных интервалах продолжительности колебаний $\lg \tau$, шириной в 0,3 ед. дес. логарифма и шагом 0,2 ед. дес. логарифма ($-1,4 < \lg \tau < 1,6$) позволило установить, что величина β зависит и от продолжительности колебаний τ (табл. 2): β с ростом τ увеличивается от значения 2,6 при $\tau = 0,05 \text{ с}$ до $\beta = 3,8$ при $\tau \approx 1,26 \text{ с}$. При дальнейшем росте τ коэффициент β остается постоянным, но стандартное отклонение незначительно возрастает (до $\sim 0,11$ ед. дес. логарифма).

Таблица 2
Зависимость коэффициента динамического усиления от продолжительности колебаний

$\lg \tau$	-1,3	-1,1	-0,9	-0,7	-0,6	-0,5	-0,3	-0,1	0,1	0,3–1,6
N	10	13	29	31	35	37	35	65	105	119
$\lg \beta$	0,41	0,45	0,47	0,49	0,51	0,55	0,55	0,56	0,58	0,58
β	2,6	2,8	3,0	3,1	3,2	3,5	3,5	3,6	3,8	3,8
σ	0,05	0,05	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,10	0,11

Как и следовало ожидать, зависит β и от количества циклов колебаний n – безразмерного аналога продолжительности колебаний. Если колебания представлены одним периодом, то коэффициент динамичности минимален

$\beta = 2,7$; с увеличением n коэффициент β возрастает до значения 3,7 при пяти циклах, после чего остается постоянным, равным этому значению (табл. 3).

Таблица 3
Зависимость коэффициента динамического усиления от количества циклов

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N	65	64	54	29	41	39	38	43	44	46
$\lg \beta$	0,43	0,49	0,54	0,56	0,57	0,56	0,57	0,57	0,57	0,56
β	2,7	3,1	3,5	3,6	3,7	3,6	3,7	3,7	3,7	3,6
σ	0,06	0,07	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,09	0,10	0,10

Зависимость β от логарифмической ширины спектра S (на уровне 0,5 от максимума) имеет вид: $\lg \beta = 0,80 - 0,39S \pm 0,08$ (рис. 4). Хотя полученное стандартное отклонение невелико, можно повысить точность аппроксимации применением нелинейного уравнения. Как видно, рассматриваемая зависимость существенна: чем шире спектр (т.е. чем больше его ширина), тем ниже коэффициент β .

Рис. 4. Соотношение между коэффициентом динамического усиления β и логарифмической шириной спектра S . Красная линия соответствует ортогональной регрессии
 $\lg \beta = 0,80 - 0,39 S \pm 0,08$

По данным ряда авторов, β зависит от преобладающего периода колебаний T_0 [3, 20]: с увеличением периода коэффициент динамичности на коротких периодах возрастает, а при дальнейшем росте в области длинных

периодов убывает. Исследование взаимосвязи β и T_0 по имеющимся данным показало, что такая зависимость незначительна.

Заключение

В работе установлены зависимости величины коэффициента динамического усиления от различных факторов. Отдельные результаты совпадают с результатами, полученными независимо другими исследователями с использованием других наборов эмпирических данных. Последнее говорит о надежности оценок. Однако, используемые в нормативных технических документах средние (фиксированные) значения β далеки от эмпирических оценок и неодинаковы, например, $\beta = 3,2$ [7] для воздействий на объекты ядерной энергетики, а в СП 14.13330.2018 $\beta = 2,5$ [8]. Учет установленных зависимостей β от различных факторов будет способствовать повышению точности прогнозных значений этого параметра, что в конечном итоге окажет влияние на повышение точности расчетов сейсмостойкости сооружений.

Список литературы

1. Алешин А.С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. М.: Светоч-Плюс, 2010. 304 с.
2. Алешин А.С. Континуальная теория сейсмического микрорайонирования. М.: Научный мир, 2017. 302 с.
3. Григорян В.Г., Карапетян Дж.К. Об одном методе оценки кривой динамичности // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4–2. С. 112–113.
4. Заалишвили В.Б. Физические основы сейсмического микрорайонирования. М.: ОИФЗ РАН, 2000. 367 с.
5. Закономерности затухания ускорений в Западных Гималаях / О.О. Эртелева, Ф.Ф. Аптикаев, С.Н. Сомала, Дж.Р. Кайал, М.Ч. Рагхучаран // Вопросы инженерной сейсмологии. 2019. Т. 46. № 2. С. 74–86. <https://doi.org/10.21455/VIS2019.2-7>.
6. Назаров Ю.П. Аналитические основы расчета сооружений на сейсмические воздействия. М.: Наука, 2010. 468 с.
7. НП-031-01 Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций.
8. СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*».
9. СП 283.1325800.2016 Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрорайонирования.
10. СП 286.1325800.2016 Объекты строительные повышенной ответственности. Правила детального сейсмического районирования.
11. Хачиян Э.Е. Прикладная сейсмология. Ереван: Гитутюн, 2008. 491 с.

12. Analysis of soil factor S using strong ground motions from Vrancea subcrustal seismic source / R. Vacareanu, G. Marmureanu, F. Pavel, C. Neagu, C.O. Cioflan, F. Aldea // *Romanian Reports in Physics*. 2014. Vol. 66. No. 3. P. 893–906.
13. ASCE 7-10 Minimum design loads for buildings and other structures.
14. Ashford S.A., Jakrapiyanun W., Lukkunaprasit P. Amplification of earthquake ground motions in Bangkok // *Proceedings of the XII World Conference on earthquake engineering*. Auckland, New Zealand, 2000. ID 1466.
15. Li B., Xie W.-C., Pandey M.D. Newmark design spectra considering earthquake magnitudes and site categories // *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2016. Vol. 15. No. 3. P. 519–535. <https://doi.org/10.1007/s11803-016-0341-1>.
16. Microzonation of Banja Luka for performance-based earthquake-resistant design / V.W. Lee, M. Manić, B. Bulajić, D. Herak, M. Herak, M. Stojković, M.D. Trifunac // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2015. Vol. 78. P. 71–88. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.06.035>.
17. Mikhailova N.N., Aptikaev F.F. Some correlation relations between parameters of seismic motions // *Journal Earthquake Prediction Research*. 1996. Vol. 5. No. 2. P. 257–267.
18. Newmark N.M., Hall W.J. Earthquake spectra and design // *Engineering monographs on earthquake criteria. structural design, and strong motion records*. Berkeley, USA: Earthquake Engineering Research Institute, University of California, 1982. 103 p.
19. Pitilakis K., Riga E., Anastasiadis A. New design spectra in Eurocode 8 and preliminary application to the seismic risk of Thessaloniki, Greece // *Perspectives on earthquake geotechnical engineering. Geotechnical, geological and earthquake engineering*. / A. Ansal, M. Sakr (eds). Cham, Switzerland: Springer, 2015. Vol. 37. P. 45–91. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10786-8>.
20. Regulatory guide 1.60. Design response spectra for seismic design of nuclear power plants. Washington, DC, USA: USNRC, 2014. 13 p.
21. Seismic hazards in site evaluation for nuclear installations: specific safety guide No. SSG-9. Vienna: IAEA, 2010. 80 p.
22. Suetomi I., Ishida E., Isoyama R., Goto Y. Amplification factor of peak ground motion using average shear wave velocity of shallow soil deposits // *Proceedings of the XIII World Conference on earthquake engineering*. Vancouver, Canada, 2004. ID 448.

O.O. Erteleva

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, ertel@ifz.ru

PROGNOSIS OF THE AMPLIFICATION FACTOR VALUE

Abstract. The coefficient of dynamic amplification β , along with the predominant period and the logarithmic width of the spectrum, is a parameter that characterizes the response spectrum. As a rule, when assessing seismic treatments, the coefficient β is considered to be a constant value,

independent of any factors except for ground conditions. It is discussed the relationships of the amplification factor with other characteristics of strong ground motion, as well as the influence of the parameters of the earthquake source and medium on its formation. The mean values and the corresponding standard deviations of the value β were estimated taking into account various factors. The research results can be used for seismic treatments assessment.

Key words: coefficient of dynamic amplification; response spectrum; spectrum width; peak ground acceleration; oscillation duration; number of cycles; ground type; source mechanism.

Зеленин Е.А.^{1,2}, Стром А.Л.^{2,3}, Гарипова С.Т.¹

¹Геологический институт РАН, г. Москва, egor.zelenin@ginras.ru

²ООО «ИГИИС», г. Москва, strom.alexandr@yandex.ru

³ООО «ЦГИ», г. Москва

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ И ИХ СЕГМЕНТАЦИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

Аннотация. Понятие активного разлома широко используется как в фундаментальной неотектонике, так и при оценке сейсмической опасности. В принятой методике общего сейсмического районирования положение и параметры активных разломов используются для построения линейных зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ). При оценке сейсмической опасности необходимо учитывать невозможность, в большинстве случаев, прямого и однозначного сопоставления возможного положения будущего сейсморазрыва и активного разлома, запечатленного в геологической структуре. Переход от геологических наблюдений к сеймотектонической модели требует проведения работ по двум существенно различающимся направлениям: 1) детализация положения и параметров наиболее представительных сейсморазрывов на ранее выделенных линиях активных разломов; 2) создание генерализованной модели зон ВОЗ, учитывающей ранее выявленные сейсморазрывы.

Ключевые слова: активный разлом; палеосейсмология; сеймотектоника; сейсморазрыв; оценка сейсмической опасности.

Введение

Изучение активных разломов является важным компонентом оценки сейсмической опасности. Активный разлом – сейсмогенерирующая структура, а значит положение активных разломов определяет положение возможных очагов коровых землетрясений, тогда как параметры древних сейсморазрывов – длина разрыва и амплитуда разовой подвижки – позволяют оценить магнитуды произошедших землетрясений, и, соответственно, землетрясений, возможных в будущем. В принятой методике общего сейсмического районирования (ОСР) территории РФ именно линейные зоны возможных очагов землетрясений (ВОЗ) определяют сотрясаемость для большинства геодинамически активных регионов.

Активные разломы представляют интерес и для фундаментальных геодинамических исследований, поскольку развиваются синхронно в геологическом масштабе времени, т.е. являются проявлениями одного и того же напряженно-деформированного состояния земной коры. Во многих случаях фундаментальные исследования активных разломов предшествуют инженерно-геологическим работам или даже возникновению запроса на работы такого рода. При использовании геологических материалов необходимо учитывать различия в задачах и методических приемах их решения в работах по фундаментальной геодинамике и при оценке сейсмической опасности.

Работы по созданию комплектов карт ОСР-97 и ОСР-2016 включали в себя создание единой целостной и непротиворечивой модели зон ВОЗ [2] на основании накопленных знаний о положении и параметрах активных разломов. Основной объем работ по каталогизации активных разломов и стандартизации их представления связан именно с разработкой сейсмотектонической основы для анализа сейсмической опасности, как в постсоветском пространстве, так и за рубежом. В последние годы была опубликована база данных (БД) активных разломов Евразии (БД, Active Faults of Eurasia Database, AFEAD) [1, 4], которая не имеет прямого сейсмотектонического назначения, однако может быть использована для актуализации комплекта карт ОСР и детального сейсмического районирования при условии учета специфики объектов, включенных в БД.

Район и методы

В качестве модельного участка для обсуждаемой проблемы был выбран Срединный хребет п-ова Камчатка. Система разломов деформирует водораздельную часть хребта, косо пересекая ее с юго-запада на северо-восток (рис. А). В отличие от более восточных систем разломов, для которых известны палеосейсмологические данные и коровая сейсмичность, разломы Срединного хребта до сих пор не были объектом палеосейсмологических работ. Во всех опубликованных материалах [3, 5] плановый рисунок разломов получен по дистанционным данным. Новые данные были получены в результате стереофотограмметрической обработки космической съемки КН-9 Hexagon, а также по полевым наблюдениям, включая аэрофотосъемку с квадрокоптера. Полученные материалы были оцифрованы и векторизованы. Все данные накапливались в геопространственной базе данных SQLite и обрабатывались в ГИС QGIS 3.16.1. Структура рабочей базы данных была принята аналогичной структуре БД AFEAD [1].

Обсуждение результатов

Первичным результатом работ по изучению активных разломов является схема дешифрирования, которая в отчетных материалах предстает в виде карты, как правило генерализованной. Все эти материалы опираются на положение деформированных форм рельефа и отложений, и отображают их с той или иной детальностью. При этом протяженность картированных отрезков разломов определяется не только длиной отдельного сейсморазрыва и их соотношением в пространстве, но и сохранностью деформаций в рельефе. Очевидно, на возвышенном плато разлом трассируется надежнее, чем при пересечении этим же разломом горных долин, что напрямую влияет на стиль его отображения. Однако для оценки сейсмической опасности важна протяженность возможного сейсморазрыва, которая по своей природе не зависит от интенсивности экзогенных процессов.

Рис. Фактическое положение уступов активных разломов (тонкие линии) и наиболее детальное из опубликованных представление аналогичных данных (толстые полупрозрачные линии) [5] (А). Возможная сеймотектоническая интерпретация: сейсморазрывы, выбранные для параметризации сейсмичности (Б); положение генерализованных зон ВОЗ (линии) с предполагаемым падением плоскости (полупрозрачная заливка) (В)

Противоречие между изображенными отрезками разломов и их сеймотектонической трактовкой успешно решается в локальных работах, но может оказаться критичным при работе с обобщенными геологическими материалами, особенно представленными в цифровом виде. Из-за технической простоты расчета магнитуды по длине разрыва пропадает необходимость критического осмысления и переработки данных, полученных при фундаментальных неотектонических исследованиях. В то же время, такие картографические данные являются ключевым источником для сеймотектонической основы сейсморайонирования и должны быть использованы с максимальной отдачей.

Наиболее эффективным способом включения картографических материалов, созданных для иных геологических задач, в модель зон ВОЗ представляется их обработка в двух направлениях: 1) идентификация и

параметризация наиболее представительных сейсморазрывов на ранее выделенных линиях; 2) создание упрощенного геометрического представления зоны ВОЗ, отвечающей ранее выявленным сейсморазрывам. Первое направление подразумевает детализацию опубликованных материалов с привлечением наиболее детальных доступных данных, полученных как при дешифрировании, так и в ходе полевых работ; второе же требует существенной генерализации, отражающей меру неопределенности в положении будущего возможного очага.

Картирование разломов Срединного хребта выполнено в рамках гранта Президента РФ МК-5948.2021.1.5.

Список литературы

1. Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736.
2. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Проблемы сейсмического районирования территории России. М.: Всероссийский НИИ проблем научно-технического прогресса и информации в строительстве, ВНИИТПИ Госстроя России, 1999. 56 с.
3. Kozhurin A.I. Active faulting at the Eurasian, North American and Pacific plates junction // Tectonophysics. 2004. Vol. 380. No. 3–4. P. 273–285.
4. The database of the active faults of Eurasia (AFEAD): ontology and design behind the continental-scale dataset / E. Zelenin, D. Bachmanov, S. Garipova, V. Trifonov, A. Kozhurin // Earth System Science Data Discussions. 2021. <https://doi.org/10.5194/essd-2021-312>.
5. Trenching studies of active faults in Kamchatka, eastern Russia: palaeoseismic, tectonic and hazard implications / A. Kozhurin, V. Acocella, P.R. Kyle, F.M. Lagmay, I.V. Melekestsev, V. Ponomareva, D. Rust, A. Tibaldi, A. Tunesi, C. Corazzato, A. Rovida, A. Sakharov, A. Tengonciang, H. Uy // Tectonophysics. 2006. Vol. 417. No. 3–4. P. 285–304. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.01.004>.

E.A. Zelenin^{1,2}, A.L. Strom^{2,3}, S.T. Garipova¹

¹Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, egor.zelenin@ginras.ru

²Russian Geotechnical Institute LLC, Moscow, strom.alexandr@yandex.ru

³Geodynamics Research Centre LLC, Moscow

REPRESENTATION OF ACTIVE FAULTS IN GEOLOGICAL MATERIALS AND THEIR SEGMENTATION FOR SEISMIC HAZARD ASSESSMENT

Abstract. The concept of an active fault is widely used both for fundamental neotectonics and for seismic hazard assessment. In the adopted methodology of general seismic zoning, the position and parameters of active faults are used to design linear zones of possible earthquakes. For seismic hazard assessment, it is necessary to account for the impossibility, in most of cases, of direct and unambiguous

comparison between the possible position of a future seismic rupture and an active fault discovered in the geological structure. The transition from geological observations to the seismotectonic model requires work in two significantly different directions: 1) specifying the position and parameters of the most representative seismic faults on previously identified active fault lines; 2) creating a simplified model of causative fault zones with due regard to the previously identified seismic faults.

Key words: active faulting; paleoseismology; seismotectonics; seismic rupture; seismic hazard assessment.

Кухмазов А.С.¹, Магомедов А.М.²

¹АО «Атомэнергопроект», г. Москва, A-Kukhmazov@mail.ru

²ПАО «РусГидро» – «Дагестанский филиал», г. Каспийск, MagomedovAM@rushydro.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ ДАГЕСТАН ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ И ФУНКЦИИ ПРИЕМНИКА ОТ ДАЛЕКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Аннотация. В публикации рассказывается о комплексировании двух методов – сейсмической томографии и функции приемника – на примере сейсмологической сети станций в Республике Дагестан. Приводятся численные результаты комплексирования.

Ключевые слова: геофизика; сейсмология; Республика Дагестан; сейсмическая томография; функция приемника; аномалии силы тяжести.

В районе Сулакского каскада гидроэлектростанций (ГЭС) в Республике Дагестан расположено 12 сейсмических станций, которые обеспечивают проведение сейсмологического мониторинга в районе гидротехнических сооружений. Задачей работ сейсмологического мониторинга является организация непрерывных сейсмологических наблюдений в районе Сулакского каскада ГЭС, оперативное информирование о местных сейсмических событиях, детальная локализация очагов местных землетрясений и определение их магнитуды.

В ходе производственных работ был подчеркнут факт отсутствия данных по глубинному строению в районе работ, в то время как для изучения связей пространственного распределения очагов землетрясений с особенностями глубинного строения необходимо располагать соответствующими сведениями о глубинном строении земной коры. Для этого при проведении данной работы было принято решение, помимо использования 12 сейсмологических станций для основной производственной задачи, использовать непрерывные данные, поступающие с этих станций, дополнительно для обработки и анализа двумя методами – сейсмической томографией и функцией приемника – для определения глубинного строения земной коры и его особенностей, например, связи с пространственным распределением сейсмичности, а также с тектоническим и геологическим строением.

В настоящей работе для решения задачи методами сейсмической томографии и функции приемника используются записи удаленных землетрясений и времена вступлений проходящих *P*-волн (для томографии) и обменных *PS*-волн (для функции приемника). Преимущество использования удаленных землетрясений, регистрируемых локальной сейсмической сетью, заключается в том, что в большинстве случаев форма приходящей волны относительно инвариантна по всей расстановке. Изучение глубинной структуры земной коры по *S*- и *SP*-волнам несет в себе сложности из-за

зашумленных участков вступления S -волн, находящихся в коде продольных колебаний.

Для анализа и обработки потока данных в работе, а именно ассоциации непрерывных записей с 12 сейсмологических станций со всемирными каталогами для получения записей телесейсмических землетрясений, была выбрана скоростная модель земной коры, исходя из детальной обработки данных глубинное сейсмическое зондирование ГСЗ по профилю «Волгоград – Нахичевань» [1], линия которого расположена наиболее близко к расстановке сейсмостанций, что показано на рис. 1.

Рис. 1. Схема расположения сейсмологических пунктов наблюдения и плотин ГЭС относительно профиля ГСЗ «Волгоград – Нахичевань»

При выполнении работ на локальной сейсмологической сети использовалась аппаратура британской компании Guralp Systems Limited: прибор CMG-6 с встроенными регистраторами CMG-CD24 (рис. 2). Используемая модификация сейсмоприемника CMG-6T имеет плоский отклик на скорость смещения грунта от 100 до 0,033 Гц (30 с).

Выделение всех сейсмических событий из непрерывных записей, вне зависимости от их природы и расстояния до района наблюдений, происходит с помощью алгоритма STA/LTA (Short Term Average to Long Term Average) – метода анализа отношения амплитуд в коротком и длинном временных окнах [3, 4].

Для рассматриваемой системы в настоящей работе были выбраны следующие параметры: $STA = 1$ с, $LTA = 30$ с. В случае превышения порогового

значения STA/LTA (который был задан равным 5) одновременно минимум по четырем станциям, событие считалось обнаруженным. Пример типичного далекого землетрясения с эпицентром в Тибете, расстоянием до района наблюдений 35° и моментной магнитудой 5,7 приведен на рис. 3.

Рис. 2. Внешний вид сейсмоприемника CMG-6Т (а) со встроенным регистратором CMG-CD24 (б)

Рис. 3. Запись типичного далекого землетрясения 20-03-2020 01:33:15 с магнитудой $M_w = 5,7$ и глубиной очага 10 км при полосовой фильтрации 0,5–1,5 Гц

После выделения алгоритмом STA/LTA далеких землетрясений выбирались только события с расстоянием до района исследований от 30 до 90°. Затем, после пикировки первого вступления P -волны, вычислялась средняя невязка по каждому землетрясению, отбраковывая события или времена вступления с большой невязкой. Оставшиеся данные использовались как входные в методе сейсмической томографии.

Для метода функции приемника после вышеописанного этапа следовал анализ сейсмической записи на соотношение сигнал/помеха, где уровень помехи вычислялся для временного отрезка до отпикированной фазы P -волн, а уровень сигнала – после.

После этапа отбраковки была задана начальная скоростная модель с параметрами обработки, такими как расстояние между узлами сетки по осям; количество итераций; параметры демпфирования и сглаживания. Затем запускался процесс инверсии с получением куба относительных аномалий скорости P -волн и разбиением его на срезы.

На рис. 4 продемонстрирован срез по центральной долготе относительно расстановки станций. Отчетливо выделяются два низкоскоростных и один высокоскоростной блоки. Вероятно, высокоскоростной и северный (правый) низкоскоростной блоки разделены глубинным разломом на широте около 43,1°, на что указывает значительный горизонтальный градиент скорости.

Рис. 4. Глубинный разрез в изолиниях аномалий скорости относительно начальной скоростной модели на долготе 46,93°

Для метода функции приемника после этапа отбраковки данных проводилась процедура постанционного суммирования всех трасс. Для того, чтобы корректно их просуммировать, необходимо было ввести кинематические поправки в волновые формы и, таким образом, привести их к единой медленности, которая была выбрана как 0,057 с/км. Затем был построен временной разрез, который трансформировался в глубинный сначала с использованием начальной скоростной модели, а далее – с использованием изменяющейся по латерали скоростной модели, которая была определена с помощью томографических реконструкций (рис. 5).

Рис. 5. Глубинный сейсмический разрез по профилю, построенный с использованием изменяющейся по латерали скоростной модели, полученной методом сейсмической томографии

По фоновым данным Северо-Кавказского регионального геологического центра ГУП «Центральная геолого-съёмочная экспедиция» была использована Карта остаточных аномалий силы тяжести Северного Кавказа (гл. ред. Н.И. Пруцкий, 1998) для качественного и количественного сравнения с результатами обработки методом сейсмической томографии. Проведена оцифровка как аномалий силы тяжести, так и скоростных аномалий. Результаты сравнительной оцифровки представлены на рис. 6.

Функциональная связь значений аномалий силы тяжести со значениями аномалий скорости P -волн отображена на рис. 7. Можно заметить, что функциональная связь скорости и плотности выражается линейной регрессией

в подтверждение общеизвестного факта о линейной связи плотности в недрах земли и скорости сейсмических волн. Связь аномалий силы тяжести Δg и аномалий скорости P -волн ΔV_p выражается следующим отношением:

$$\Delta g = (-0,0312494 \pm 0,0450881) + (0,0128385 \pm 0,00237163)\Delta V_p. \quad (1)$$

Рис. 6. Результат сравнений значений аномалий силы тяжести в редукции Буге (кривая коричневого цвета) со скоростными аномалиями (кривая синего цвета)

Рис. 7. График зависимости аномалий поля силы тяжести в редукции Буге от аномалий скоростей продольных волн

Коэффициент корреляции Пирсона составляет 0,892, что подтверждает значительную корреляцию между двумя данными параметрами при вероятности $P = 9,07e^{-7}$ некоррелированной системы создать выборки данных, которые имеют корреляцию Пирсона по крайней мере такую же, которая была вычислена по этим выборкам данных (тест на отсутствие корреляции).

Полученные результаты обработки данных методом сейсмической томографии хорошо согласуются как с гравиметрическими данными исследуемой территории, так и с данными тектонического районирования. Это свидетельствует об эффективности применения метода в данном конкретном случае.

В работе [2] профиль ГСЗ «Волгоград–Нахичевань», отработанный Министерство геологии СССР в 1960-е гг., был переинтерпретирован. Результат переинтерпретации представлен на рис. 8.

Рис. 8. Глубинный разрез в изолиниях скорости по профилю «Волгоград–Нахичевань». Обозначения: М – подошва земной коры; М1 – отраженная волна от мантийной границы; K1 и K2 – внутрикоровые границы. На разрезе тонкие линии являются границами между слоями с разными сейсмическими скоростями (км/с), толстые линии соответствуют отражающим площадкам [2]

Как видно из рис. 8, были выделены четыре основные границы: K1 и K2, не характеризующиеся регулярностью и лежащие внутри земной коры на глубинах от 17 до 27 км и от 30 до 35 км соответственно (глубина этих границ увеличивается в сторону юга); граница Мохоровичича (М), увеличивающаяся под горной системой до 60 км; и граница в верхней мантии (М1), простирающаяся на глубинах от 60 до 85 км (глубина увеличивается в сторону севера). Г.А. Павленкова в своей работе [2] отмечает, что граница М1 «является, по всей видимости, нарушенной зоной или зоной интенсивных горизонтальных подвижек».

Полученный авторами глубинный разрез (см. рис. 5) имеет протяженность около 100 км, в то время как переинтерпретированный разрез по профилю ГСЗ «Волгоград–Нахичевань» простирается на 600 км, поэтому стоит понимать, что авторский разрез представляет лишь небольшой участок разреза,

представленного на рис. 8. Однако сами границы были проиндексированы согласно индексации профиля «Волгоград–Нахичевань», кроме того, авторами была введена граница Ф, соответствующая поверхности доальпийского кристаллического фундамента. Его стратификация осуществлена в соответствии с Картой рельефа поверхности кристаллического фундамента Северо-Кавказского региона (отв исп. В.В. Белявский, 2006), подготовленная в обособленном подразделении центра «ГЕОН» института «ВНИИГеофизика». Результат сейсмогеологической интерпретации отображен на рис. 9.

Рис. 9. Сейсмогеологический разрез, полученный в результате интерпретации данных обработки методом функции приемника

В результате картирования границ получено их глубинное распределение в пределах земной коры. Граница Ф располагается приблизительно на глубине от 8 до 13 км. K1 колеблется от глубины 17 км до глубины 22 км. Глубина K2 – от 24 км до 34 км. M – от 48 до 58 км. M1 – от 64 до 79 км. Глубины границ примерно совпадают с глубиной границ, определенными в результате переинтерпретации профиля ГСЗ «Волгоград – Нахичевань» [2].

Заключение

В настоящей работе было представлено инновационное комплексирование методов сейсмической томографии и функции приемника. Для выполнения обработки были использованы непрерывные записи с 12 сейсмологических станций, расположенных в Республике Дагестан в районе Сулакского каскада ГЭС. Из данных записей извлекались сведения о

телесейсмических событиях удаленностью от исследуемой территории от 30 до 90°, и, после процесса отбраковки землетрясений, оставшиеся использовались для обработки данных методами сейсмической томографии и функции приемника.

Из результатов выполненной работы:

1. Впервые было успешно выполнено комплексирование методов сейсмической томографии и функции приемника.

2. Впервые был изучен комплексом сейсмических методов район исследования, где располагаются гидротехнические сооружения повышенной ответственности сулакского каскада ГЭС.

3. Скоростная модель, полученная по ближайшему профилю гсз и используемая для локализации местных землетрясений, была значительно уточнена.

4. Получен глубинный разрез для исследуемой территории с помощью метода функции приемника и уточненной скоростной модели.

5. Были проиндексированы и определены глубины границ в земной коре в районе исследований, и полученному глубинному сейсмическому разрезу была придана геологическая интерпретация.

6. Проведено качественное сравнение данных сейсмической томографии и поля аномалий силы тяжести Δg и дана количественная оценка корреляции аномалий скорости продольных волн Δv_p с Δg , которая установила достаточно тесную функциональную связь этих двух разных физических полей.

Результаты, полученные в данной работе, могут иметь практическое применение при проведении сейсмологического мониторинга как района Сулакского каскада ГЭС, так и прилегающего региона Республики Дагестан, поскольку полученная уточненная скоростная модель даст более детальные характеристики очагов местных землетрясений при их локализации.

Рекомендации к проведению будущих исследований

1. Расчет прямой 3D-задачи гравиметрии с заданием плотности в призмах по корреляционным зависимостям между полученными скоростями P -волн и плотностью, а также сравнение с наблюдаемым полем аномалий силы тяжести.

2. Проведение сейсмической томографии от далеких землетрясений на поперечных волнах.

3. Проведение метода функции приемника от далеких землетрясений методом SRF.

4. Обработка данных местных землетрясений методом сейсмической томографии для одновременного уточнения параметров землетрясений и 3D-скоростной модели с использованием как продольных, так и поперечных волн.

Список литературы

1. Краснопевцева Г.В. Глубинное строение Кавказского сейсмоактивного региона. М.: Наука, 1984. 108 с.
2. Павленкова Г.А. Строение земной коры Кавказа по профилям ГСЗ Степное–Бакуриани и Волгоград–Нахичевань (результаты переинтерпретации первичных данных) // Физика земли. 2012. № 4. С. 1–10.
3. Baer M., Kradolfer U. An automatic phase picker for local and teleseismic events // Bulletin of the Seismological Society of America. 1987. Vol. 77. No. 4, P. 1437–1445.
4. New manual of seismological observatory practice (NMSOP) / P. Bormann (ed.). Potsdam, Germany: GeoForschungsZentrum, 2002. Vol. 1. 1253 p.

A.S. Kukhmazov¹, A.M. Magomedov²

¹Atomenergoproekt JSC, Moscow, A-Kukhmazov@mail.ru

²Rushydro PJSC – Dagestan Branch, Kaspiysk, Republic of Dagestan, MagomedovAM@rushydro.ru

DETERMINATION OF REPUBLIC OF DAGESTAN CRUSTAL STRUCTURE BY SEISMIC TOMOGRAPHY AND RECEIVER FUNCTION BASED ON TELESEISMIC DATA

Abstract. It is described the aggregation of two methods – seismic tomography and receiver function – using the example of a seismological network of stations in the Republic of Dagestan. Numerical results of aggregation are given.

Key words: geophysics; seismology; Republic of Dagestan; seismic tomography; receiver function; gravity anomalies.

Строчков Ю.А.

ФГБУ «Росгеолфонд», г. Москва, idw83@mail.ru

МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ВИБРАЦИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. Изучение техногенных вибраций, зарегистрированных на поверхности грунтов и конструкций, позволяет получить информацию о строении и состоянии среды, решить широкий спектр геотехнических и строительных задач. Получение качественной полевой записи возможно только при учете помех и внешних, влияющих на сигнал факторов.

Ключевые слова: техногенные вибрации; методика измерения; спектр сигнала.

Методика регистрации колебаний основывается на знаниях о природе колебаний и их источниках, свойствах грунтового основания, строении и состоянии конструкций. Источники колебаний можно разделить по происхождению на природные и техногенные. Среди природных колебаний выделяются землетрясения и микросейсмы – колебания земной поверхности малой амплитуды, вызываемые прохождением циклонов и другими атмосферными процессами. Также микросейсмы возникают при ударах морских волн о берег. Техногенные колебания происходят от прохождения транспорта, работы строительной техники и механизмов, взрывов. В полевых условиях регистрируются колебания, приходящие одновременно от источников различной природы. Обычно техногенные вибрации являются детерминированным, то есть можно указать конкретный источник колебаний, в то время как источник микросейсм выделить гораздо сложнее. Техногенные источники по своему положению подразделяются на наземные и подземные. К наземным источникам относятся автотранспорт, поезда железной дороги и строительные механизмы. К подземным – поезда метрополитена, строительная техника в котлованах и бестраншейная, щитовая проходка.

Для регистрации вибраций требуется комплект оборудования, состоящий из сейсмостанции и приемников. В качестве приемников можно использовать велосиметры для измерения виброскорости и акселерометры для регистрации виброускорения. Сейсмостанция должна иметь возможность записи в непрерывном режиме, частота дискретизации сигнала требуется не менее 120 Гц, для синхронизации записей требуется встроенный кварцевый генератор. Все оборудование должно быть выполнено в полевом исполнении и быть защищенным от пыли и воды. Приемники должны отвечать следующим требованиям: низкий уровень собственных шумов, принимаемый диапазон минимум 1–100 Гц (желательно 0,1–200 Гц), осуществляется прием трех компонент сигнала.

При регистрации колебаний на грунте необходимо обеспечить устойчивое положение датчиков и убедиться в отсутствии коммуникаций под

ними. Датчики необходимо защитить от ветра и дождя. На рис. 1 приведен пример записи вибраций, на которой хорошо видно влияние ветровой помехи.

Рис. 1. Ветровая помеха на записи вибраций. Стрелкой указано начало ветровой помехи

На рис. 2 приведен пример записи сигналов и их спектров до дождя и во время дождя.

Рис. 2. Запись колебаний и ее спектр до дождя(а) и во время дождя(б)

Резкое изменение амплитуды сигнала и расширение его спектра под воздействием ветра и дождя доказывают, что защита датчиков от такого рода помех необходима. В целях накопления статистики и корректной записи низкочастотных колебаний продолжительность записи должна быть не менее 20 мин.

При регистрации вибраций на строительных конструкциях, также как и на грунте, необходимо обеспечить устойчивое положение датчика и убедиться в отсутствии силовых кабелей в непосредственной близости от оборудования. Пример электромагнитной наводки в спектре полевой записи приведен на рис. 3. Для расчета коэффициента передачи с грунта на фундамент необходимо обеспечить синхронизацию записей по времени на грунте и фундаменте. Измерение собственных частот конструкций здания должно проводиться на

различных этажах, но в одинаковых условиях, с учетом расстояния от внешних стен и положения датчиков относительно балок и колонн.

Рис. 3. Проявление электромагнитной «наводки» в спектре полевой записи

Измерение вибраций на поверхности грунтов и конструкций позволяет решать широкий спектр задач: расчет приращения балльности при сейсмическом микрорайонировании, определение качества усиления грунтового массива грунтоцементными сваями, обследование строительных конструкций: определение коэффициента передачи фундамент–грунт, определение состояния по коэффициенту затухания и добротности сигнала, проверка работы деформационных швов, определение качества инъектирования бетона под фундаментную плиту, определение устойчивости инженерных объектов (например: насыпей железных дорог), геологические задачи: картирование кровли скальных грунтов, определение уровня грунтовых вод в рыхлых отложениях.

Yu.A. Strochkov

Russian Geological Fund, Moscow, idw83@mail.ru

TECHNIQUE FOR RECORDING TECHNOGENIC VIBRATIONS ON THE SURFACE OF SOILS AND STRUCTURES

Abstract. The study of technogenic vibrations recorded on the surface of soils and structures allows obtaining information about the structure and state of the environment, solving a wide range of geotechnical and construction problems. Obtaining a high-quality field recording is possible only if interference and external factors affecting the signal are taken into account.

Key words: technogenic vibrations; measurement technique; signal spectrum.

Еремин Р.А., Кулижников А.М., Пудова Н.Г.

ФАУ «РОСДОРИИ», г. Москва, ereminra@rosdornii.ru

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Аннотация. Публикация посвящена вопросам комплексного обследования дорожной одежды автомобильных дорог с применением методов неразрушающего контроля. Показан опыт проведения георадиолокационных обследований автомобильных дорог совместно с инженерно-геодезическими и инженерно-геологическими работами, лазерным сканированием, динамическим нагружением и др. Описывается опыт неразрушающего определения с помощью георадара толщины слоев дорожных одежд, ослабленных зон и областей неоднородности свойств материалов слоев дорожных одежд. Представлены примеры создания цифровых моделей дорожных конструкций по результатам георадарных обследований.

Ключевые слова: георадар; дорожная одежда; толщина слоя; ослабленная зона; однородность свойств; геодезические работы; бурение; лазерное сканирование; прочность.

Целью настоящей работы является повышение объективности результатов инженерных изысканий и обследований автомобильных дорог.

Задачи, которые необходимо решить для достижения цели:

- оценка фактического состояния и строения дорожных одежд при инженерных изысканиях;
- оценка соответствия выполненных дорожных работ при строительстве;
- создание цифровых моделей дорожных одежд.

В первую очередь комплексирование различных методов обследований автомобильных дорог, в составе которого применяется георадар, нацелено на получение всесторонней информации об объекте.

На сегодняшний день георадар это часть технологической цепочки, в которую наряду с геофизическими исследованиями входят геодезические работы, разрушающие и лабораторные исследования, динамическое нагружение и различные методы неразрушающего контроля.

Геодезическое сопровождение позволяет максимально точно определить местоположение георадарных профилей как в «цифровом» пространстве, так и на фактической местности. Сопоставить ситуацию, рельеф местности и результаты инструментальных измерений другими методами с подповерхностной картиной существующей реальности, что в свою очередь помогает найти причины тех или иных негативных изменений, процессов и явлений, происходящих с автомобильной дорогой. В частности, объяснить причины разрушения дорожного покрытия и деформации земляного полотна. Не менее важным является прогноз возможных разрушений по наличию выявленных ослабленных зон или из-за недостаточной толщины конструктивных слоев дорожной одежды. Кроме того, георадар в составе комплексных обследований

помогает установить соответствие выполненных дорожных работ по качеству технологических процессов и объемам использованных материалов.

Основными документами, регламентирующими порядок выполнения комплексных обследований с применением георадара, являются:

1) ГОСТ 32868-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Требования к проведению инженерно-геологических изысканий» [1].

2) ГОСТ Р 58349-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Дорожная одежда. Методы измерения толщины слоев дорожной одежды» [2].

3) ОДМ 218.3.075-2016 «Рекомендации по контролю качества выполнения дорожно-строительных работ методом георадиолокации» [5].

4) ОДМ 218.2.037-2013 «Методические рекомендации на проведение изыскательских работ при капитальном ремонте и ремонте автомобильных дорог» [4].

Рассматривая передвижную дорожную лабораторию как единый измерительный комплекс стоит обратить внимание на один из ее наиболее важных компонентов – спутниковую систему. Как правило, дорожные лаборатории собирают данные с привязкой к спутниковым координатам в абсолютном режиме. Такой подход может быть оправдан на этапе диагностики автомобильных дорог, однако при выполнении проектных работ для будущего строительства, точности спутниковых координат, полученных таким способом, будет недостаточно. ФАУ «РОСДОРНИИ» стремится осуществлять геодезическую привязку георадарных данных в дифференциальном режиме с учетом поправок от базовых станций. Может быть использован режим RTK или расчета и уравнивания траектории в постобработке с последующей привязкой к георадарным данным. При этом необходимо учитывать смещение антенны георадара относительно антенны спутникового приемника.

Помимо спутникового оборудования навигационный блок передвижной дорожной лаборатории может быть оснащен инерциальной системой, которая в процессе записи траектории формирует дополнительные ее узловые точки в пространстве времени между фиксацией событий спутниковым приемником. Кроме того, в условиях неуверенного или отсутствия спутникового сигнала инерциальная система какое-то время помогает определять траекторию движения передвижной дорожной лаборатории с допустимой погрешностью определения пространственных координат.

Рассматривая вариант пешей георадарной съемки, особенно на больших территориях, спутниковые системы помогают фиксировать узловые точки траектории движения георадара. В случае развития сложной ортогональной съемочной георадарной сети – это позволяет формировать так называемые горизонтальные георадиолокационные срезы, которые строятся путем интерполяции близко расположенных друг к другу вертикальных георадарных профилей. Опуская или поднимая секущую плоскость, специалист может видеть в плане те или иные особенности подземной среды на разных глубинах.

Передвижная дорожная лаборатория помимо георадара и навигационного блока может содержать иные сенсоры и датчики. Такими являются лазерные сканеры, фотокамеры, инфракрасные камеры, регистраторы продольной и поперечной ровности. Комплексные дорожные лаборатории, созданные по заданию ФАУ «РОСДОРНИИ», являются единственными и уникальными для нашей страны, поскольку не имеют аналогов. Все компоненты таких передвижных дорожных лабораторий интегрированы на аппаратно-программном уровне. Сенсоры и датчики машины используют общую траекторию движения передвижной дорожной лаборатории для привязки всех данных в единой системе координат.

Также возможно комплексирование результатов пеших георадарных съемок с результатами традиционной геодезической съемки тахеометром или съемки системами лазерного сканирования наземного базирования, как стационарными, так и мобильными.

Многие уже знают, что лазерное и георадарное сканирование может выполняться с воздуха, в т.ч. с помощью беспилотного носителя. Объединяя массивы различных пространственных данных по общему географическому признаку, возможно комплексирование результатов воздушной георадарной и лазерной съемки.

Задачи, которые позволяют решать такие комплексные исследования, базируются на сравнении внешних признаков цифровой модели местности и подземной среды.

Например, дефекты дорожного покрытия могут быть объяснены наличием разуплотнений, переувлажнений и пустот в основании дорожных одежд. Просадки просматриваются на цифровой модели поверхности покрытия за счет фиксации понижения отметок проектных точек. Неудовлетворительные характеристики продольной и поперечной ровности требуют тщательной георадарной съемки. Лазерный сканер или панорамная фотосъемка не позволяют заглянуть под поверхность дорожного покрытия, а георадар может дополнить этой информацией результаты комплексного обследования. Особенно проблема актуальна для городов, где дополнительное негативное влияние оказывают водонесущие коммуникации.

При оценке соответствия выполненных дорожных работ георадар, как правило, используется для обоснования мест бурения и непрерывной оценки толщины уложенных слоев дорожной одежды. Такие параметры, как площадь отремонтированного покрытия, средняя толщина и плотность материалов слоев определяются по результатам инженерно-геодезических и инженерно-геологических работ. Зная указанные параметры, можно оценить объемы выполненных работ. Также актуальным является оценка соответствия качества технологических процессов при строительстве. Например, однородность коэффициента уплотнения и влажности грунта, наличие неоднородных включений в насыпи, например, мерзлых комьев при возведении земляного полотна в зимний период. Георадарные данные позволяют обнаружить

признаки подобных отклонений и предотвратить негативные последствия при эксплуатации сооружения.

В последнее время георадар находит применение в задачах оценки прочности дорожных одежд. Как правило для прямых инструментальных измерений прочности используются установки динамического нагружения, которые позволяют фиксировать чаши прогиба дорожного покрытия при сбрасывании груза на штамп, имитирующий нагрузку от колеса автомобиля. По результатам динамического нагружения определяются участки автомобильных дорог с пониженной прочностью. Однако метод динамического нагружения не позволяет объяснить причины резких изменений динамического прогиба, в то время как георадар помогает разобраться в этом вопросе. Поскольку при проведении работ и георадар, и установка динамического нагружения, и результаты фиксации дефектов автомобильной дороги привязывают спутниковым оборудованием, появляется возможность сопоставительного анализа данных и поиска общих закономерностей.

При выполнении комплексных работ передвижная дорожная лаборатория со спутниковым оборудованием осуществляет сбор георадарных данных по полосам движения автомобильной дороги. Собранные георадарные данные привязывают к траектории передвижной дорожной лаборатории. Оператор анализирует георадарный профиль и намечает на нем проектные скважины в тех местах, которые требуют контрольной проверки. Указанные места выгружают в виде векторного слоя САПР или ГИС приложения с последующим добавлением на топоплан (карту). Координаты проектных скважин в виде текстового файла загружают в контролер спутникового оборудования и в режиме выноса точек закрепляют на местности. Буровые работы выполняют в строго назначенном месте. Буровые журналы или акты отбора проб, в т.ч. содержащие плановые координаты выработки, заполняют по результатам бурения. Информация о результатах бурения заносится в ранее сформированные электронные скважины для интерпретации георадарных профилей и расчета грунтовой модели. В случае, если скважины выполнены до или параллельно с георадарными работами, а также при переносе планового положения проектной скважины их координаты фиксируются геодезическим оборудованием, а данные заносятся в георадарный проект.

Процесс камеральной обработки условно можно разделить на составляющие: предварительная и окончательная камеральная обработка. Предварительная камеральная обработка выполняется после георадарного обследования, но до работ по проходке выработок. В ходе выполнения указанной задачи оператор должен проанализировать георадарный профиль и найти на нем места отбора кернов или бурения скважин. Например, в соответствии с ОДМ 218.3.075-2016 [5] важно выбрать участки на радарограмме, на которых искомые границы четко и однозначно отображаются, при этом рекомендуется отбирать керны (образцы) на участках с максимальной и минимальной толщиной слоя. Впоследствии необходимо вынести выбранные

места на местности, чтобы осуществить калибровочное бурение в них. Окончательная камеральная обработка выполняется после проходки и документирования выработок. Толщина слоев, определенная по результатам разрушающих методов, используется для калибровки георадарных профилей, но прежде стоит обратить внимание на обнаружение границ раздела сред.

Границы, лежащие ниже сканируемой поверхности, являются границами раздела различных конструктивных слоев. Как правило структура слоев хорошо выражена на вновь устроенных дорожных конструкциях. На длительно эксплуатируемых автомобильных дорогах выделить слои обычно сложнее ввиду напластования границ со следами многочисленных ремонтов. На цифровых моделях дорожных конструкций эксплуатируемых дорог можно увидеть такие дефекты, как проседания отражающих границ в виде характерных провалов поверхностей раздела слоев, а также ослабленные зоны в виде замкнутых локальных областей в пространстве [3, 6]. Одна из проекций таких ослабленных зон представлена на рис. 1. Указанные признаки свидетельствуют о локальных ослаблениях в основании дорожных одежд. Поэтому для установления более объективной картины о внутреннем строении дорожных одежд на таких объектах требуется значительный объем бурения.

Рис. 1. Горизонтальный срез с результатами георадарного обследования (амплитудная карта). Обозначения: 1 и 2 – ослабленные зоны

Помимо границ слоев дорожной одежды на георадарном профиле обнаруживают ослабленные зоны и участки неоднородности свойств материалов слоев дорожных одежд. Например, в соответствии с ОДМ 218.3.075-2016 [5] критериями выявления неоднородностей свойств материалов и грунтов земляного полотна на радарограммах являются:

– увеличение амплитуды сигнала на глубине расположения контролируемого слоя в 2–4 раза и более (в зависимости от частоты антенного блока, типа местности, вида зондируемого материала или грунта и др.) по сравнению со средним значением;

– уменьшение частоты сигнала на глубине расположения контролируемого слоя в три раза по отношению к среднему значению (для грунтов земляного полотна и дополнительных слоев основания дорожной одежды).

Указанные признаки на радарограммах можно обнаруживать автоматизировано.

От методики обработки непосредственно результатов георадарного обследования показан переход к методикам учета результатов комплексных работ при решении прикладных задач. Одними из наиболее актуальных задач при обследовании автомобильных дорог являются анализ причин изменения прочностных характеристик дорожных одежд и разрушения дорожного покрытия. Для этой цели может применяться комплексирование георадарного обследования с данными лазерного сканирования и динамического нагружения (рис. 2).

Рис. 2. Комплексирование георадарных исследований с лазерным сканированием и динамическим нагружением

Данные динамического нагружения совместно с данными, полученными по результатам анализа георадарных профилей (положение просадок, областей неоднородности свойств, изменение толщины слоев) позволяют выявить причины изменения прочности дорожных одежд вдоль автомобильной дороги согласно отчету о научно-исследовательской работе на тему «Результаты работ на объекте «Автомобильная дорога А-107 “Московское Малое Кольцо между Киевским и Минским шоссе, рядом с деревней Кобяково и пос. НИИ Радио” установками ударного нагружения (FWD) и георадарами» (отв. исп. А.М. Кулижников, Р.А. Еремин, ОА. Кузнецов, 2019). С этой целью дополнительно применяют следующие процедуры:

- импорт графика изменения динамического прогиба (модуля упругости) на георадарный профиль;
- определение мест смены конструкции дорожной одежды;
- изучение состояния и строения дорожных конструкций в местах значительного изменения динамического прогиба (модуля);
- поиск ослабленных зон по результатам комплексного динамического нагружения и анализа георадарных данных.

Данные лазерного сканирования позволяют сравнить информацию, получаемую с помощью георадара (просадки, области неоднородности свойств), с ситуацией и рельефом местности. Указанное позволяет объяснить причины разрушения дорожного покрытия на основании признаков, наблюдаемых внутри дорожных конструкций по результатам георадарного обследования (переувлажнение, разуплотнение, образование пустот, в т.ч. карстово-суффозионных процессов, раскрытие трещин в нижележащих слоях). При этом ранее описанные процедуры обработки георадарных данных дополняются следующими операциями:

- совмещение облака точек и результатов георадарной съемки;
- исследование подповерхностной среды в месте дефекта дорожного покрытия;
- определение причин дефектов дорожного покрытия.

Методика создания цифровой модели дорожной конструкции в части задач по определению толщины слоев дорожной одежды включает следующие процедуры:

- создание границ слоев для серии георадарных профилей;
- формирование поверхностей границ слоев дорожных одежд;
- совмещение с цифровой моделью местности и рельефа.

Методика создания цифровой модели дорожной конструкции в части задач по определению ослабленных зон и неоднородностей включает следующие процедуры:

- построение амплитудных карт по серии георадарных профилей;
- отображение на амплитудных картах амплитуды отраженного сигнала или результата атрибутного анализа;
- определение местоположения ослабленных зон на георадарном профиле;
- совмещение с цифровой моделью местности и рельефа;
- оценка области распространения ослабленных зон в плане на основании признаков, полученных с георадарного профиля.

Подобного рода цифровые модели могут использоваться в проектах с применением технологий информационного моделирования.

Как и полагается в информационном моделировании результаты георадарного обследования могут содержать атрибутивную информацию, которая используется по необходимости при реализации проекта.

Базовый набор атрибутов результатов георадарного обследования, например, для решения задач по определению толщины слоев дорожной одежды следующий:

- материал;
- толщина слоя;
- электрофизические свойства;
- порядковый номер точки сканирования;
- пространственные координаты;
- пикетное или километровое положение;
- дата и время обследования.

Выводы

1. Метод георадиолокации в последнее время довольно часто используется с координатной привязкой спутниковыми и навигационными инерциальными системами. Георадарные обследования, зачатую являются составной частью общего комплекса работ наряду с геодезическими работами, разрушающими методами и лабораторными испытаниями. Комплексование может выполняться с другими методами неразрушающих обследований автомобильных дорог, например, лазерным сканированием, цифровой фото- и инфракрасной съемками, динамическим нагружением.

2. Совместное применение георадара, геодезических работ, разрушающих методов и лабораторных исследований позволяет повысить объективность оценки состояния и строения дорожных одежд на этапе инженерных изысканий и строительства.

3. Результаты комплексных обследований георадаром, установками динамического нагружения и другими неразрушающими методами позволяют повысить эффективность работ по оценке фактического состояния автомобильных дорог и определять прочностные параметры дорожных конструкций с целью адресного назначения необходимых проектных решений при текущем и капитальном ремонтах.

4. Цифровые модели дорожных конструкций повышают эффективность использования информации об их состоянии и внутреннем строении при эксплуатации автомобильных дорог и выполнении дорожных работ.

Список литературы

1. ГОСТ 32868-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Требования к проведению инженерно-геологических изысканий.
2. ГОСТ Р 58349-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Дорожная одежда. Методы измерения толщины слоев дорожной одежды.
3. Еремин Р.А., Сухобок Ю.А., Рассадкин Н.Ю. Технология геопространственного моделирования георадарных данных // Дороги и мосты. 2018. № 38(1). С. 144–167.

4. ОДМ 218.2.037-2013 Методические рекомендации на проведение изыскательских работ при капитальном ремонте и ремонте автомобильных дорог.
5. ОДМ 218.3.075-2016 Рекомендации по контролю качества выполнения дорожно-строительных работ методом георадиолокации.
6. Сухобок Ю.А., Курбатов М.С. Программный комплекс для информационного моделирования георадарных данных GeoReader // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2019. № 2(13). С. 26–31.

R.A. Eremin, A.M. Kulizhnikov, N.G. Pudova

ROSDORNII, Moscow, ereminra@rosdornii.ru

METHODOLOGY FOR A COMPREHENSIVE SURVEY OF ROAD PAVEMENT OF HIGHWAYS USING NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS

Abstract. The publication is devoted to the issues of a comprehensive survey of road pavement of highways using non-destructive testing methods. The experience of conducting GPR surveys of highways in conjunction with engineering-geodetic and engineering-geological works, laser scanning, dynamic loading, etc. The experience of non-destructive determination using GPR of the thickness of layers of road pavements, weakened zones and areas of changes in the properties of materials of layers of road pavements is described. Examples of creating digital models of road structures based on the results of GPR surveys are presented.

Key words: GPR; road pavement; layer thickness; weakened zone; uniformity of properties; geodetic works; drilling; laser scanning; strength.

Волынин А.Ф.

ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», г. Санкт –Петербург, volynin_af@vodokanal.spb.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ ПО ОБСЛЕДОВАНИЮ ГРУНТОВ НА УЧАСТКЕ ПРОВАЛА И АВАРИЙНОМ УЧАСТКЕ ТРУБОПРОВОДА С ЦЕЛЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЧИН ПРОВАЛА И АВАРИИ

Аннотация. Приводятся результаты геофизических работ на аварийном участке канализационной сети, совпадающем с провалом грунта. Установлены причины аварии и образования провала грунта. Даны рекомендации по восстановлению трассы трубопровода.

Ключевые слова: сейсмоакустическое профилирование; электроразведка; авария; провал грунта; георадиолокация.

Авария на канализационном трубопроводе стала причиной нарушения стока канализации. Пластиковый канализационный трубопровод диаметром 535 мм расположен на глубине 7 м. Авария произошла между колодцами 39 и 40. Ее последствием стало смещение трубопровода вниз с амплитудой более его диаметра и вертикальная деформация трубы со сжатием более 25% диаметра. В результате образовался «мешок» и прекратился нормальный сток канализации. На этом же участке рядом с трубой образовался провал грунта с амплитудой 0,7 м размером 4×5 м с лужей грунтовой воды в центре (рис. 1). Участок расположен на северо-западе г. Санкт-Петербурга, где были развиты болотные отложения (торфа) большой мощности, удаленные при строительстве новых районов и плывунные грунты. Как показал анализ [1], болотные отложения, содержащие микроорганизмы приводят к формированию плывунов среди водонасыщенных песков и супесей. Уровень верхнего горизонта грунтовых вод высокий, в пределах от 0,5 м в период выпадения осадков и до 2 м в сухой период.

Рис. 1. Провал грунта на участке аварии

С целью определения причин аварии и провала грунта выполнены геофизические исследования методами георадиолокации, электроразведки на постоянном токе по методике электротомографии в бесконтактной модификации и электропрофилирования, а также спектрального сейсмоакустического профилирования. Расположение профилей измерений приведено на рис. 2.

Рис. 2. Результаты геофизических работ на участке аварии трубопровода. Обозначения:

1 – профили георадиолокационной съемки на частоте 1200 МГц; 2 – профили электротомографических измерений; 3 – профили спектральных сейсмоакустических измерений; 4 – участки разуплотненных грунтов; 5 – провал грунта; 6 – аварийный участок трубопровода; 7 – участок просадки слоя супесей; 8 – участок плавунного грунта; 9 – планшет электропрофилирования; 10 – контур плавуну; 11 – канализационные колодцы

В результате георадиолокационной съемки с радаром ОКО-2 на частоте 1200 МГц (рис. 3) отмечена просадка грунта, а также нарушение в разрезе с амплитудой до 60 см в верхнем слое насыпных грунтов, к которым приурочен провал.

По результатам электропрофилирования в модификации срединного градиента (рис. 4) участок водонасыщенных плавунных грунтов в центре провала грунта отмечается пониженными значениями кажущегося электрического сопротивления.

Рис. 3. Результаты георадиолокационной съемки. Обозначения: 1 – просадка в верхнем слое насыпных грунтов, 2 – провал грунта, 3 – нарушение в верхнем слое насыпных грунтов, 4 – аварийный участок трубопровода

Рис. 4. Результаты электропрофилирования на участке провала грунта. Обозначения: 1 – аварийный участок трубопровода, 2 – трубопровод, 3 – провал грунта

Электротомографические измерения выполнены по двум профилям бесконтактным способом с аппаратурой БИКС. По профилю 1, пройденному за границей провала, построен геологический разрез до глубины 6 м (рис. 5). В верхней части разреза среди насыпных грунтов высокими удельными электрическими сопротивлениями отмечен участок разуплотненных грунтов, ниже в интервале глубин 3–6 м пониженными удельными электросопротивлениями отмечается слой водонасыщенных пылеватых супесей (пывун). На профиле 2 (рис. 6), пройденном через центр провала, в интервале глубин 1,5–6,0 м закартирован пывунный грунт с низким удельным электросопротивлением 0,5 Ом м, характерным для грунтов, содержащих микроорганизмы [1], что отмечалось при проведении геофизических работ в центральной и северной частях города.

Рис. 5. Результаты электротомографических измерений по профилю 1.
Обозначения: 1 – трубопровод, 2 – провал грунта

Рис. 6. Результаты электротомографических измерений по профилю 2.
Обозначения: 1 – провал грунта, 2 – трубопровод

В результате спектрального сейсмоакустического профилирования, выполненного над трубопроводом и с противоположной стороны провала (рис. 7), закартированы два участка просадки грунта среди слоя пылеватых водонасыщенных супесей в интервале глубин 8–12 м под трубопроводом, образующие линейную зону, пересекающую провал.

Рис. 7. Результаты спектрального сейсмоакустического профилирования на участке провала грунта. Обозначения: 1 – провал грунта; 2 – трубопровод; 3 – линия смещения грунта; 4 – контур плывуна

Выводы

1. Установлены просадки в верхнем слое насыпных грунтов, связанные с деформациями в нижележащих супесях.
2. Установлено резко неоднородное строение разреза грунтов с линзой влажных пылеватых супесей в центре провала и линейным участком разуплотненных грунтов на аварийном участке трубопровода.
3. Установлена зона интенсивных деформаций и просадки в слое пылеватых супесей с амплитудой до 4 м в интервале глубин 8–12 м,

пересекающая зону провала и аварийный участок трубопровода.

4. Аварийное состояние трубопровода с образованием вертикального сжатия участка трубопровода вызвано вертикальными смещениями с образованием просадки в слое супесей в интервале глубин 8–12 м.

5. Образование провала грунта связано с вертикальной деформацией грунтов под участком просадки.

6. При восстановлении аварийного участка трубопровода рекомендовано смещение трассы на 5 м к югу от участка провала.

Список литературы

1. Дашко Р.Э., Александрова О.Ю., Котюков П.В., Шидловская А.В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. Вып. № 13. С. 24–71.

A.F. Volynin

State Unitary Enterprise “Water Canal of Saint Petersburg”, Saint Petersburg, volynin_af@vodokanal.spb.ru

RESULTS OF GEOPHYSICAL WORK ON SOIL SURVEY AT THE SECTION OF THE SINKHOLE COLLAPSE AND THE EMERGENCY SECTION OF THE PIPELINE IN ORDER TO DETERMINE THE CAUSES OF THE SINKHOLE COLLAPSE AND THE EMERGENCY

Abstract. The results of geophysical work on the emergency section of the sewer network, coinciding with the failure of the soil, are presented. The causes of the accident and the formation of ground sinking have been established. Recommendations for the restoration of the pipeline route are given.

Key words: seismic acoustic profiling; electrical prospecting; accident; sinkhole; ground penetrating radar.

СЕКЦИЯ «ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СОСТАВЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ИНЖЕНЕРНО- ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ»

Батрак Г.И.

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва, gib74@mail.ru

ПРИНЯТИЕ УПРАВЛЯЮЩИХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ИНЖЕНЕРНО- ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ

Аннотация. В публикации рассматривается проблема разрыва взаимопонимания, возникающая на стыке мониторинга и управляющих решений, которые должны формироваться по его результатам. Автор обращает внимание на «зону безответственности», когда специалист-гидрогеолог считает, что он предоставил результаты прогноза, и его работа окончена, а управленец не имеет возможности полноценно этими результатами воспользоваться в силу неопределенной точности прогноза и недостаточной квалификации в части прогнозируемых явлений. Как вариант преодоления данного разрыва предложен метод анализа иерархий Т. Саати, позволяющий упростить и обобщить экспертные оценки по выбору наилучшего управляющего решения через построение иерархической модели.

Ключевые слова: точность гидрогеологических прогнозов; метод анализа иерархий; шахтная гидрогеология.

Введение

В последние десятилетия для гидрогеологов, работающих в сфере практической гидрогеологии, очевидной является взаимосвязь между качеством гидрогеологических прогнозов и принятием управленческих решений. Лицо, принимающее решения (ЛПР), сталкивается с непониманием, в какой степени он может доверять выполненному прогнозу. В то же время, цена решений может быть довольно высокой и выражаться как в рублях, так и в человеческих жизнях.

Описанная ситуация ярко проявляется при взаимодействии ЛПР с прогнозами обеспеченности расхода и качества воды подземных водозаборов, движения с подземными водами загрязняющих веществ высоких классов опасности от мест их складирования и захоронения, строительной гидрогеологии. Весьма актуально это и в шахтной гидрогеологии ввиду того, что ответственность за принятие решений является высокой.

Вода является фактором активизации многих экзогенных геологических процессов. Над выработанным пространством к этим процессам, в первую очередь, относятся подтопление, оседание земной поверхности, активизация карстовых и суффозионных процессов, поршневое вытеснение шахтных газов на дневную поверхность, загрязнение приповерхностных водоносных

горизонтов за счет перетока из выработанного пространства, выход шахтных вод на поверхность, снижение несущей способности грунтов и последующие деформации зданий и т.д.

Одним из важнейших этапов в жизнедеятельности шахты является этап ее закрытия и рекультивации. Именно он определяет возможность развития большинства негативных геологических процессов над выработанным пространством. Тем не менее, при составлении гидрогеологических прогнозов на этапе закрытия и дальнейшей рекультивации перед прогнозистом встает ряд объективных неопределенностей, которые часто не могут быть устранены и существенно влияют на результат. К таким неопределенностям относятся: наличие гидравлической связи между шахтами и соответственно число гидравлически тесно связанных шахт, изменившаяся под воздействием отработки проницаемость разделяющих водоносные горизонты слоев, фильтрационные свойства массива и их изменчивость, роль тектонических нарушений и т.д.

В последние десятилетия гидрогеологами всего мира предпринимаются попытки как повысить точность гидрогеологических прогнозов, так и научиться оценивать эту точность до наступления прогнозируемых событий. Эти попытки предпринимаются преимущественно в следующих направлениях: повышение знаний о параметрах, входящих в уравнения фильтрации, миграции и теплопереноса; улучшение численных алгоритмов; изучение влияния граничных условий; выведение различных асимптотических приближений для сложных нелинейных процессов; активное использование аппарата теории вероятности для точности и т.д.

Тем не менее, во многих случаях, несмотря на определенный прогресс, гидрогеологи так и не могут дать прогноз требуемой точности. А основная сложность заключается в том, что надежных методов априорной оценки точности прогнозов не существует. Таким образом, ЛПР остается один на один с прогнозом неизвестного качества и вынужден им руководствоваться. Это нелегкая и ответственная деятельность в каждом конкретном случае проводится по-разному и не имеет единых алгоритмов. Очень часто решения прорабатываются группой специалистов разного профиля, имеющих отношение к решаемой проблеме, но итоговое решение принимает один человек, несущий за него ответственность.

Но, если решить проблему с оценкой точности гидрогеологических прогнозов пока не удастся, то это значит, что целесообразно привлекать разработчиков этого прогноза в качестве экспертов при принятии решений. Это объясняется тем, что именно гидрогеолог-прогнозист знает слабые места своего прогноза и то, как изменение тех или иных не до конца известных входящих параметров скажется на итоговом прогнозе. Безусловно, гидрогеологи должны быть не единственными экспертами, участвующими в процессе обсуждения принятия решений.

Для повышения качества принимаемых решений имеет смысл алгоритмизировать эту деятельность. Конечно, единого алгоритма быть не может, но могут применяться хорошо зарекомендовавшие себя методики. Гидрогеологические прогнозы, разрабатываемые на этапе закрытия и рекультивации шахт могут иметь критически низкую точность даже в случае выполнения прогноза опытными специалистами ввиду низкого качества исходной информации и большого влияния этой информации на результат.

Одним из эффективных методов принятия решений в условиях высокой неопределенности является метод анализа иерархий (МАИ). Рассмотрены возможности применения данного метода в условиях принятия решений по результатам гидрогеологических прогнозов неопределенной точности, но с высокими требованиями к ответственности за принятые решения.

Описание метода

Метод хорошо обоснован математически его автором Т. Саати в [1], а также опытом его применения автором и его последователями. В настоящее время МАИ нашел свое широкое применение в задачах многокритериального принятия решений, стратегического планирования и распределения ресурсов, задачах разрешения конфликтов и других проблемах системных исследований сложных социально-экономических систем, в учебных и научных учреждениях, властных структурах и промышленных корпорациях.

Метод анализа иерархий является систематической процедурой для иерархического представления компонентов, определяющих суть любой проблемы. Метод состоит в декомпозиции проблемы на все более простые составляющие части и дальнейшей обработке последовательности суждений лица, принимающего решение, по парным сравнениям. В результате может быть выражена относительная степень взаимодействия элементов. Эти суждения затем выражаются численно. МАИ включает процедуры синтеза множественных суждений, выявления приоритетности критериев и нахождения альтернативных решений. Полученные таким образом значения являются оценками в шкале отношений.

Решение проблемы в МАИ – это процедура поэтапного установления приоритетов. На первом этапе выявляются наиболее важные компоненты проблемы, на втором – наилучший способ проверки наблюдений, испытания и оценка альтернатив; на следующем этапе вырабатывается решение и оценивается его качество. Процесс может быть проведен также над последовательностью иерархий: в этом случае результаты, полученные в одной из них, используются в качестве входных данных при изучении следующей. Метод многокритериального отбора систематизирует процесс решения такой многоступенчатой задачи.

Основные принципы метода анализа иерархий:

1. Принцип идентичности и декомпозиции. Предусматривает структурирование проблем в виде иерархии или сети.

2. Принцип сравнительный суждений (парных сравнений). Предполагает, что элементы задачи (альтернативы и критерии) сравниваются попарно с позиции их воздействия на общую характеристику.

3. Принцип синтеза приоритетов. Предполагает формирование набора локальных приоритетов, которые выражают относительное влияние множества элементов на элемент примыкающего сверху уровня.

Программная реализация

Программная реализация проведена на хорошо зарекомендовавшем себя свободно распространяемом комплексе MPriority.

Реализованный в программе алгоритм МАИ включает в себя следующие этапы [1]:

1. Формирование иерархии целей.
2. Определение приоритетов.
3. Расчет локальных векторов приоритетов.
4. Проверка экспертных оценок на непротиворечивость.
5. Расчет приоритетов управляющих решений на базе синтеза локальных приоритетов в иерархии.

Пример применения

Пример рассмотрен при предположении, что есть комплекс из нескольких взаимосвязанных шахт. На шахтах прекращена добыча, но работают подземные водоотливы. При этом вода из одного водоотлива сбрасывается в реку, из которой ведется водоотбор для водоснабжения близлежащего города. Без сброса шахтных вод воды для водоснабжения в природном источнике не хватит. В то же время, река дает разбавление шахтных вод до концентраций загрязняющих веществ ниже ПДК.

Перед гидрогеологическим прогнозом стоит задача – обосновать закрытие подземных водоотливов и строительство погружных водоотливов, которые обходятся гораздо дешевле. Число и расположение погружных водоотливов, а также глубина, с которой будет откачиваться вода должны быть оптимальными, т.е. обеспечивать безопасность жизнедеятельности расположенных на шахтных отводах населенных пунктов и при этом иметь минимальную стоимость.

Для решения задачи показано построение следующей иерархии (рис. 1). В вершине построенной иерархии располагается цель – выбор мест расположения погружных водоотливов. На втором уровне располагаются критерии, которые наиболее важны для принятия управленческого решения. На третьем уровне расположены возможные в этой ситуации варианты устройства водоотливов.

Далее сравнение элементов иерархии проводится следующим образом. Объекты второго уровня иерархии (критерии) сравнивает ЛПР. Объекты третьего уровня, варианты расположения водоотливов, сравнивают эксперты. Таким образом осуществляется делегирование полномочий ЛПР своим подчиненным – экспертам.

Рис. 1. Иерархия для задачи выбора оптимального водоотлива

В качестве критериев выбраны:

- стоимость строительства и эксплуатации;
- сохранение парка, полив которого ведется из одного из подземных водоотливов;
- предотвращение подтопления населенных пунктов;
- обеспечение водоснабжения за счет шахтных вод.

Полученный для второго уровня вектор приоритетов обозначен через $\omega = \langle \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n \rangle$ (вектор находится в правой части диалогового окна на рис. 2).

Производим попарные сравнения относительно объекта
ВЫБОР

	1.	2.	3.	4.	Приоритет
1. СТОИМОСТЬ	1	1/3	1/7	1/9	0.0445
2. ПАРК	3	1	1/5	1/7	0.0892
3. ПОДТОПЛЕН	7	5	1	1	0.4013
4. ВОДОСНАБ	9	7	1	1	0.4648

СЗ: 4.093 Применить

ИС: 0.031

ОС: 0.0344 Отмена Исследовать

Рис. 2. Парные сравнения критериев выбора, проводимые ЛПР

проще, чем одновременно оценивать весь перечень вариантов. Кроме того, становится возможным привлекать различных экспертов – специалистов в областях, определяемых ключевыми критериями. Несложная математическая обработка мнений экспертов, при условии задания четких взаимных приоритетов между критериями, позволяет управленцу не только получить наиболее приемлемый вариант решения, но и увидеть количественную оценку целесообразности того или иного решения на основе заранее определенных приоритетов.

Рис. 4. Результаты расчета весов различных вариантов строительства

Конечно, не стоит забывать, что неопределенность в прогнозах, лежащих в основу решения, остается, и попытка минимизации ее влияния ведется через экспертные мнения, обладающие субъективностью. Однако структурирование задачи посредством установления ее внутренней иерархии и введение попарных сравнений позволяют существенно улучшить качество принимаемых решений.

Экономическая оценка принятых решений из предложенного в публикации примера показала сокращение затрат в результате принятия данного решения в пять раз по сравнению с текущей ситуацией.

Список литературы

1. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 316 с.

G.I. Batrak

Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Moscow, gib74@mail.ru

MAKING CONTROL DECISIONS UNDER UNCERTAINTY OF HYDROGEOLOGICAL AND ENGINEERING-GEOLOGICAL FORECASTS

Abstract. The publication deals with the problem of breaking mutual understanding that arises at the junction of monitoring and management decisions that should be formed based on its results. The author draws attention to the “zone of irresponsibility” when a hydrogeologist believes that he has provided the results of the forecast, and his work is over, and the manager does not have the opportunity to fully use these results due to the uncertain accuracy of the forecast and insufficient qualifications in terms of predicted phenomena. As an option for overcoming this gap, T. Saaty method of hierarchy analysis is proposed, which makes it possible to simplify and generalize expert assessments for choosing the best control solution through the construction of a hierarchical model.

Key words: accuracy of hydrogeological forecasts; analytic hierarchy process; mining hydrogeology.

Вилькина М.В.^{1,2}, Никуленков А.М.¹

¹Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
г. Санкт-Петербург, wilkina.mari@hgepro.ru, annik3@hgepro.ru

²Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, st048606@student.spbu.ru

ОБОСНОВАНИЕ ВОДОЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СТРОИТЕЛЬНОГО КОТЛОВАНА В УСЛОВИЯХ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ДИСЛОКАЦИИ ПАННОНСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ НА УЧАСТКЕ РАЗМЕЩЕНИЯ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПАКШ-2, ВЕНГРИЯ

Аннотация. Неотъемлемой частью строительства атомной электростанции (АЭС) является возведение строительного котлована. Глубина выработок может превышать 20 м, что несет в себе инженерные риски, связанные с их осушением. Настоящее исследование рассматривает подходы к обоснованию водозащитных мероприятий на примере венгерской АЭС Пакш-2. Высокая литологическая неоднородность и сложная региональная тектоническая структура, в значительной степени, явились определяющими факторами при принятии проектных решений.

Ключевые слова: противодиффузионная завеса; тектонический разлом; АЭС; Паннонский осадочный бассейн; гидродинамическое просвечивание.

На настоящий момент на территории Венгрии в 100 км южнее г. Будапешта расположена действующая атомная электростанция (АЭС) Пакш-1, производящая до половины всей электроэнергии, потребляемой в стране. На ее территории расположено четыре действующих энергоблока. В связи со строительством еще двух: пятого и шестого, были выполнены инженерные изыскания, включающие в себя, в т.ч. гидрогеологические работы.

В геологическом отношении территория исследования расположена в пределах Паннонского осадочного бассейна. При проведении настоящего исследования гидрогеологические условия территории были изучены до глубин 130 м. Так, региональные гидрогеологические условия представлены двумя водоносными комплексами, разделенные толщей паннонских глин (рис. 1).

1. Четвертичный водоносный комплекс ($Q_n - H_p$). Сложен аллювиальными песками мощностью до 20 м. Примечательно, что размер фракций с глубиной увеличивается от мелкозернистых до гравелистых. Таким образом, нижняя часть комплекса обводнена и характеризуется повышенными фильтрационными свойствами.

2. Паннонские глины, выступающие региональным водоупором.

3. Паннонский водоносный комплекс ($N_1 - N_2$) представлен высоконеоднородной толщей переслаивания глинистых и песчаных толщ плиоцен-миоценового возраста, на участке исследований вскрыт до глубин 130 м.

Значительная часть конструкций АЭС находится под дневной поверхностью в грунтовой толще. Это обстоятельство определяет необходимость возведения глубокого котлована. Строительство АЭС Пакш-2

предполагает многоуровневую выемку грунта до отметок 23,8 м. С точки зрения гидрогеологии котлован – это дрена, к которой направлен поток подземных вод. Для предотвращения обводнения области строительства было рассмотрено несколько проектных решений, которые приведены ниже.

Рис. 1. Схематичный геологический разрез N-Q образований

1. Контур водопонизительных скважин. Такие скважины должны обеспечить необходимый минимальный уровень грунтовых вод, не превышающий отметку дна котлована. Однако стоит отметить, что в водонасыщенной толще действуют два вида напряжений: напряжение в минеральном скелете (эффективное напряжение между зернами самого грунта) и напряжение внутрипоровой жидкости (нейтральное напряжение жидкости на зерна грунта), соотносящиеся между собой следующим выражением (1) [1]:

$$\sigma_n + \sigma_{эф} = \sigma_p, \quad (1)$$

где σ_n – нейтральное напряжение, Па; $\sigma_{эф}$ – эффективное напряжение, Па; σ_p – полное напряжение, Па.

В свою очередь нейтральное напряжение отвечает величине гидростатического давления жидкости и вычисляется по следующей формуле

$$\sigma_n = \gamma_0 h_p, \quad (2)$$

где γ_0 – объемный вес воды, Н/м³; h_p – пьезометрическая высота, м.

Таким образом, согласно формулам (1), (2) снижение гидростатического напора (h_p) на величину не менее 23 м приведет к снижению нейтрального напряжения ($\sigma_n \downarrow$) и росту эффективного ($\sigma_{эф} \uparrow$). Рост эффективного напряжения, в свою очередь, отразится в проседании дневной поверхности. Ввиду непосредственной близости проектируемых энергоблоков к действующей АЭС Пакш-1 данный сценарий недопустим, т.к. неравномерные осадки несут риск стать причиной крена действующих сооружений. Другими осложняющими аспектами являются риск оплыwania бортов карьера из-за возникающего градиента напора, а также организация водоотвода откачиваемых вод.

По вышеизложенным причинам было принято решение отказаться от водопонижительных скважин с целью ограничения водопотоков в котлован. Другим проектным решением стало возведение противофильтрационной завесы (ПФЗ).

2. ПФЗ или «стеной в грунте» называют преграду для потока подземных вод, возводимую путем нагнетания раствора через буровые скважины. Однако, при возведении ПФЗ важным условием является выдержанность водоупорной толщи, на которую планируется заглубить конструкцию [3]. В данном случае такой толщей является слой панноских глин.

Ввиду того, что рассматриваемая область лежит в пределах молодого альпийского складчатого пояса, выдержанность геологических слоев требует обоснования. Так, детальная геологическая съемка выявила региональную тектоническую структуру Дунасентдёрдь-Харта – протяженную линейную зону, секущую площадку строительства в районе 5го энергоблока в северо-восточном направлении. Амплитуда вертикального смещения достигает 20 м.

Ключевым моментом является характер разрывного нарушения паннонских глинистых толщ. Авторами рассмотрены три концепции сочленения паннонских отложений с разломной зоной: 1) без разрыва сплошности слоя и сбросов (пликативная структура); 2) без разрыва сплошности слоя с серией сбросов; 3) с разрывом сплошности слоя (дизъюнктивная структура) (рис. 2).

Рис. 2. Концепции сочленения паннонских отложений с разломной зоной

Когда ПФЗ возводится до кровли глинистого горизонта, дизъюнктивное нарушение глинистых толщ будет играть роль литологических окон. Литологическими окнами называют небольшие относительно общей площади водоносного комплекса участки, в которых водоупорная толща выклинивается. Природа литологических окон различна: их формирование может происходить в результате фациального замещения, процессов карстообразования, антропогенного влияния (бурение скважин, строительные котлованы, отработка карьеров) или, как в данном случае, ввиду тектонических дислокаций. Это приводит к возникновению гидравлической связи между водоносными горизонтами. Так, литологическое окно в левом борту грабенообразной структуры в контуре ПФЗ может оказать негативное влияние на эффективность конструкции. ПФЗ также играет роль геомиграционного барьера, предотвращающего распространение радионуклидов в случае аварийной ситуации на АЭС.

Для ответа на вопрос о целостности паннонских глин потребовалось провести гидрогеологическую схематизацию условий площадки. На исследуемой территории АЭС Пакш-2 было выполнено бурение порядка 500 скважин на расстоянии через каждые 20–50 м. По результатам бурения была построена серия литогидрофациальных профилей субмеридионального простирания. Ввиду резко неоднородного состава толщ и их сложной геометрии выделить выдержанные в плане и разрезе самостоятельные геологические единицы не удалось. Данные сейсмопрофилирования указали на локальные зоны неоднородности, не отвечая на главный вопрос о неразрывности паннонских глин.

В связи с несостоятельностью вышеперечисленных методов было принято решение о проведении масштабных опытно-фильтрационных работ. В их основу легло представление о пространственном отклике на гидродинамическое возмущение, создаваемое откачкой [1]. В случае выдержанного водоупора, при откачке из целевого горизонта снижения напора в смежном пласте не происходит. Обратная картина наблюдается при наличии литологического окна [2]. В конкретно рассматриваемом случае роль литологического окна может играть региональное тектоническое нарушение Дунастдёрдь-Харта.

Так, на участке размещения АЭС Пакш-2 была организована сеть из наблюдательных скважин, оборудованных на интервалы А (9–14 м), В (19–24 м), С (44–49 м), D (94–99 м) и Е (124–129 м), проведены четыре масштабных откачки длительностью до семи дней. Результаты одной из откачек приведены на рис. 3.

На рис. 3 приведена карта с положением откачивающей скважины РТ-1-D и серия наблюдательных скважин, оборудованная на каждый из пяти интервалов А, В, С, D, и Е. В скобках указано максимальное зарегистрированное понижение в каждой из них. В ходе пространственного анализа понижений были выделены зоны, внутри которых понижения фиксировались в пределах

одного глубинного интервала. Так, было отмечено, что в южной части площадки понижения фиксируются на глубинах 100 м (интервал D, на рис. 3 синие стрелки), когда как в северной части отклик наблюдается лишь на глубине 50 м (интервал С, на рис. 3 зеленые стрелки). Граница, вдоль которой наблюдается перепад в глубине фиксируемых понижений, в целом хорошо коррелирует с зоной перегиба пононских толщ, выделенной по результатам бурения и геофизический исследований.

Рис. 3. Распространение гидродинамического возмущения на территории АЭС Пакш-2 при откачке из скв. PT-1-D

Примечательно, что при откачках из глубинного интервала D (94–99 м) ни в одной из скважин, оборудованных на приповерхностные интервалы А (9–14 м) или В (19–24 м) понижения зафиксированы не были. Данный факт свидетельствует об отсутствии гидравлической связи между глубинными и поверхностными интервалами.

На основе данного анализа была предложена концепция неразрывного, погружающегося в южном направлении пласта (рис. 4), перекрытого выдержанным водоупором (паннонскими глинами). Если в контур водоупора попадают литологические окна, понижения на глубине 50 м также наблюдались бы и в южной части площадки.

Таким образом, доказано применение комплексного подхода к изучению отложений паннонских глин на исследуемой территории. С помощью данных

бурения и геофизических работ была установлена мощность отложений, достигающая 20 м. Опытнo-фильтрационные работы помогли установить низкие фильтрационные свойства $k < 0,00001$ и неразрывность глинистых толщ. Вышеперечисленное позволяет сделать вывод о пригодности паннонских глин в качестве основания для ПФЗ. Осложняющим фактором остается неоднозначная по глубине геометрия пласта. Глубина ПФЗ должна варьировать до глубин 30–80 м в зависимости от конфигурации пласта глин (рис. 5).

Рис. 4. Схема распределения гидродинамического возмущения по глубине (линия разреза приведена на рис. 3)

Рис. 5. Проектные отметки противофильтрационной завесы

Список литературы

1. Мироненко В.А. Динамика подземных вод. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2021. 519 с.
2. Bonte M., Zaadnoordijk W.J., Maas K. A simple analytical formula for the leakage flux through a perforated aquitard // Ground Water. 2015. Vol. 53. No. 4. P. 638–644. <https://doi.org/10.1111/gwat.12239>.
3. Cashman P.M., Preene M. Groundwater lowering in construction. A practical guide to dewatering. London: CRC Press, 2020. 957 p. <https://doi.org/10.1201/9781003050025>.

M.V. Vilkina^{1,2}, A.M. Nikulenkov¹

¹Saint Petersburg Division of the Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Saint Petersburg, wilkina.mari@hgepro.ru, annik3@hgepro.ru

²Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, st048606@student.spbu.ru

ENSURING WATER SECURITY WHEN CONSTRUCTING AN OPEN PIT UNDER DISLOCATED PANNONIAN BASIN CONDITIONS AT THE PAKS-2 NUCLEAR POWER PLANT, HUNGARY

Abstract. Constructing an open pit is one of the main stages in nuclear power plant building (NPP). The depth of an open pit can reach up to 20 m. Open pit dewatering may bring engineering risks. The present publication deals with approaches to ensuring water security at the Paks-2 NPP, Hungary. High lithological heterogeneity associated with the tectonic faults is the main factor controlling project design decisions.

Key words: cut-off wall; tectonic faults; nuclear power plant; Pannonian Basin; crosswell hydrodynamic test.

Мошин В.Е., Филимонова Е.А.

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии,
г. Москва, moshin_v@mail.ru

ОЦЕНКА ПОРИСТОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ ПЕСКОВ РАСЧЕТНЫМИ МЕТОДАМИ

Аннотация. Проводится сравнение лабораторных и расчетных методов оценки пористости и коэффициента фильтрации песков, полученных при инженерно-геологических изысканиях на территории г. Москвы. Анализируется порядка 100 песчаных проб разного генезиса, возраста и обладающих различными физико-механическими свойствами. Дополнительно анализируется сходимость результатов расчета величины пористости от коэффициента неоднородности по формуле Истоминой (1957) со значениями, полученными при пересчете через физико-механические свойства. Вычислены значения коэффициента фильтрации всех проб по 14 формулам (Слихтера, Козени – Кармана, Бэрра, Крамбейна и Монка и др.), основанных на результатах гранулометрического анализа. Разница между лабораторными значениями коэффициента фильтрации, определенного на приборе СПЕЦГЕО, и расчетными значениями по формулам, входящим в границы применимости, составила 30–60%.

Ключевые слова: коэффициент фильтрации; пористость; гранулометрический состав; пески; расчетные методы.

Определение фильтрационных параметров грунтов является неотъемлемой задачей при любых инженерно-геологических изысканиях. Достоверность определения коэффициента фильтрации определяет надежность прогнозных расчетов, связанных с оценкой водопритоков, барражного эффекта, суффозионных процессов.

Существует множество различных методов определения коэффициента фильтрации, которые можно разделить на три основных группы: лабораторные, полевые и расчетные. При проведении инженерно-геологических изысканий обычно проводят 2–3 одиночные откачки, которые дают ограниченную характеристику фильтрационных свойств водовмещающих грунтов участка исследований. В то же время определение коэффициента фильтрации является обязательным и входит в состав лабораторных исследований физико-механических свойств грунтов наряду с определением гранулометрического состава, плотности, влажности, пористости и других свойств. Значение коэффициента фильтрации определяется геометрическими параметрами среды и гидродинамическими свойствами жидкости. Расчетные методы оценки величины коэффициента фильтрации основаны на комбинации параметров пористости и эффективного диаметра при заданных параметрах вязкости и плотности воды. Целью данного исследования было сравнение значений коэффициента фильтрации, полученных при лабораторных и полевых исследованиях, с результатами расчетных методов. В выполненной работе были рассчитаны коэффициенты фильтрации более 100 проб песков, отобранных на территории г. Москвы с разных глубин и имеющие различное происхождение, возраст и зернистость.

Сложность структуры порового пространства природной грунтовой толщи обуславливает значительные трудности в создании универсальной математической модели [1]. Существуют различные модели схематизации среды для расчета коэффициента фильтрации. Гранулярная модель – это математическое описание пористой среды, сложенной сферическими частицами различной упаковки, простейшим примером является конгломерат [1]. S. Slichter (1898) разработал одну из первых гранулярных моделей. Модель состоит из геометрически правильно упакованных одинаковых сферических частиц. По данной модели была выведена формула коэффициента фильтрации, связанная с пористостью и эффективным диаметром следующим образом [1]:

$$k = \frac{\gamma}{\eta} * 10^{-2} * n^{3,287} * d_{10}^2, \quad (1)$$

где γ – удельный вес жидкости, г/см²с²; η – динамическая вязкость жидкости, г/см/с; n – пористость, д.ед.; d_{10} – диаметр частиц, содержание которых менее 10% в грунте, мм.

Границы применимости данной формулы находятся в пределах $0,1 \text{ мм} < d_{10} < 5 \text{ мм}$.

Одной из наиболее используемых и широко применяемых формул определения коэффициента фильтрации является формула Козени – Кармана:

$$k = \frac{\gamma}{\eta} * \frac{n^3}{180 * (1-n)^2} * D_m^2, \quad (2)$$

где D_m – среднее гармоническое размера частиц.

Другая модель представляет собой систему капиллярных трубок, в этом случае уравнение для расчета коэффициента фильтрации основывается на использовании уравнении Пуазейля, полученного для движения жидкости в одном капилляре [3]:

$$q = \omega_t * \frac{\Delta H}{l_t} * \frac{r^2}{8\eta} * \gamma \quad (3)$$

где q – расход в капилляре, см³/с; ω_t – площадь поперечного сечения капилляра, см²; ΔH – разность напоров на концах капилляров, см; l_t – длина капилляра, см; r – радиус капилляра.

Тогда формула коэффициента фильтрации, учитывающая свойства пористой среды, имеет следующий вид:

$$k = \frac{\gamma}{\eta} * \frac{nr^2}{8\tau_t^2}, \quad (4)$$

где τ_t – коэффициент извилистости: $\tau_t = \frac{l_t}{L}$.

Значит, коэффициент фильтрации зависит от свойств как жидкости: γ/η , так и среды: $nr^2/8\tau_t^2$.

Помимо моделей движения воды по капиллярным трубкам и модели S. Slichter существуют другие гранулярные модели, свойства которых определяются свойствами частиц, способом их упаковки, а также взаимодействием насыщающих модель жидкостей друг с другом и с самими частицами [1].

Почти все расчетные модели описываются формулой, разработанной Вуковичем и Соро (1992) [4]:

$$k = \frac{\rho g}{\eta} N \varphi(n) d_e^2, \quad (5)$$

где ρ – плотность воды, г/мл; g – гравитационная постоянная см/с²; N – постоянная, рассматриваемая как «фактор формы»; $\varphi(n)$ – функция пористости, и d_e – эффективный размер зерна [4].

Таким образом, коэффициент фильтрации в расчетных методах в основном зависит от двух основных параметров среды – пористости и эффективного диаметра.

Первым параметром является эффективный диаметр – величина, изменяющаяся в зависимости от модели. В большинстве случаев эффективный диаметр принимают как средний диаметр всех частиц, например, в модели Cozeny-Carmen, или как d_{10} , то есть как диаметр частиц, процентное содержание которых менее 10% в грунте [3]. Также используются и другие определения эффективного диаметра. В исследовании К. Urumovic и К. Sr. Urumovic [6] в 2016 г. была изучена модель Козени – Кармана, где было выявлено, что наиболее точной интерпретацией «среднего» размера зерен является среднее гармоническое. В табл. показано, как отличаются эффективные диаметры (в мм) для разных формул расчета коэффициента фильтрации мелкозернистых аллювиальных четвертичных песков.

Таблица

Значения эффективных диаметров для мелкозернистых аллювиальных песков

Эффективный диаметр, мм	Проба 1	Проба 2	Проба 3	Проба 4	Проба 5
d_{10}	0,101	0,086	0,099	0,101	0,098
d_{17}	0,113	0,108	0,112	0,113	0,112
d_{20}	0,119	0,113	0,117	0,119	0,118
$d_{geometric\ mean}$	0,165	0,161	0,163	0,165	0,164
d_e (Kruger)	0,116	0,100	0,112	0,126	0,114
d_e (Kozeny)	0,095	0,082	0,091	0,103	0,094
d_e (Zunker)	0,102	0,088	0,097	0,110	0,100
d_e (Zamarin)	0,109	0,094	0,104	0,118	0,107
I_0 (Alyameni)	0,083	0,065	0,081	0,083	0,080

Второй параметр структуры порового пространства – пористость. Одна из первых формул для оценки общей пористости была описана в работе В.С. Истоминой (1957) на основе исследований фильтрующей устойчивости несвязных дисперсных грунтов при проектировании гидротехнических сооружений [5]. Из исследований средней плотности естественных и искусственно созданных грунтов с примерно одинаковой плотностью твердых частиц ($\rho = 2,65 \text{ г/см}^3$) В.С. Истомина пришла к выводу, что как для крупнозернистых, так и для мелкозернистых песков с одинаковой формой зерна средняя плотность является функцией коэффициента неоднородности [5].

Было исследовано 25 проб, представленных различными генетическими отложениями: речными, ледниково-флювиогляциальными, морских песками и гравийными отложениями из Подмосковья и Европейской части России, а также искусственно созданных смесей зерен песка, гравия и щебня различной зернистости [5].

В.С. Истомина отметила, что форма зерна (закругленная, с острыми краями и т.д.) имеет большее влияние на размеры пор, чем плотность упаковки, и назвала коэффициент неоднородности $U(d_{60} / d_{10})$ решающим фактором для грунта с определенной зернистостью [5]. По полученным данным был построен график общей пористости n от коэффициента неоднородности ($1 \leq U \leq 38$) и получена следующая формула:

$$n = 0,255 * (1 + 0,83^U) \quad (6)$$

Вукович и Соро (1992) показали, что многочисленные авторы (например, Хазен, 1892; МакГэри и Ламберт, 1962; Венцель и Фишель, 1942; последний цитируется Дэвисом и ДеВистом, 1970) после экспериментов на природных песках получили результаты, схожие с данными, полученными В.С. Истоминой (1957) [5]. Соответственно, Вукович и Соро пришли к выводу, что формула оценки пористости, рассмотренной В.С. Истоминой, является хорошим приближением для грунтов с коэффициентом неоднородности < 10 , тогда как в глинистых отложениях были получены значительные отклонения [5].

Таким образом, при доказательстве достоверности вычисленной пористости, определение коэффициента фильтрации сводится только к определению гранулометрического анализа и свойств жидкости.

Для расчетов была использована программа, созданная в 2015 г. J.F. Devlin [4]. В программе написан макрос, в котором вычисляются все необходимые параметры для четырнадцати различных формул расчета коэффициента фильтрации.

В данном исследовании было рассмотрено более ста песков с трех административных округов г. Москвы. Пески от пылеватых до средне-крупнозернистых, как аллювиальных, так и флювиогляциальных, возрастом от верхнеюрских–нижнемеловых до четвертичных.

На первом этапе проведен расчет пористости по формуле В.С. Истоминой. Результаты были получены в виде графиков пористости (n) от коэффициента неоднородности (U) для каждой группы зернистости исследуемых песков, по которым можно сказать, что при наличии в песках глинистой фракции и коэффициенте неоднородности более восьми появляется сильное расхождение пористости, вычисленной по формуле В.С. Истоминой со значениями, определенными в лаборатории (рис.).

Рис. Сравнение эмпирической кривой пористости (n) от коэффициента неоднородности (U) по В.С. Истоминой с лабораторными значениями: а – пылеватые пески, б – мелкозернистые, в – среднезернистые

На втором этапе рассчитывался коэффициент фильтрации, при этом использовалась оба варианта значений пористости. Полученные расхождения между коэффициентами фильтрации, полученные по среднему геометрическому всех формул, входящих в границы применимости, по вычисленной пористости и лабораторной составляют для пылеватых песков –

20%, для мелкозернистых – 15%, а для среднезернистых – 10%, что говорит о возможности использования данной формулы при расчетах.

Однако разница между лабораторными значениями коэффициента фильтрации, определенного на приборе СПЕЦГЕО, и расчетными методами по вычисленной пористости получились для пылеватых песков – 111%, для мелкозернистых – 72%, а среднезернистых – 38%. Данные значения получены как среднее геометрическое между формулами, входящими в границы применимости и при рассмотрении каждой формулы отдельно получились следующие результаты: для пылеватых песков минимальная средняя относительная ошибка среди всех формул составляет 60% – формула USBR¹. Для мелкозернистых можно также выделить две формулы, не входящие в границы применимости, но имеющие минимальные, среди остальных, расхождения – S. Slichter – 42%, USBR – 51%. Для среднезернистых – Krumbein and Monk – 31% и USBR – 34%. По среднему геометрическому среди всех значений лучшей является формула USBR – 34%, а для формул, входящих во всех случаях в границы применимости – Barr – 41%.

Выводы

В ходе данной работы были изучены фильтрационные параметры песчаных грунтов аллювиального, флювиогляциального и морского генезиса, отобранных на территории г. Москвы. Пески относятся к пылеватым, мелкозернистым и среднезернистым. Пористость, рассчитанная по эмпирической формуле В.С. Истоминой, имеет расхождения с лабораторными значениями, особенно большие ошибки получаются при коэффициенте неоднородности > 8 и содержании в отложениях глинистых частиц. Однако относительная ошибка в расчетных методах вычисления коэффициента фильтрации по пористости, полученной в лаборатории и пористости, вычисленной по эмпирической формуле, являются незначительными – 10–20%. И, имея только результаты гранулометрического анализа грунта, можно получить значения коэффициента фильтрации с расхождением с лабораторными результатами на 31–60%. Такое расхождение можно связать с приближенным описанием математическими моделями реальной фильтрации в поровой среде и природными размерами, формами, упаковками частиц. Также, отдельным моментом является определение коэффициента фильтрации в лабораторных условиях в трубке Каменского или приборе СПЕЦГЕО. Проведение опыта проводится при нарушенной структуре грунта, а, следовательно, при отличном от естественного сложения, параметре пористости, что также влияет на сходимость результатов.

¹ US Bureau of Reclamation (USBR) – Бюро мелиорации США.

Список литературы

1. Ромм Е.С. Структурные модели порового пространства горных пород. М.: Недра, 1985. 240 с.
2. Справочное руководство гидрогеолога / Под ред. В.М. Максимова. 3-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Недра, 1979. Т. 1. 512 с.
3. Bear J. Dynamics of fluids in porous media. New York: Dover Publications, 1972. 796 p.
4. Devlin J.F. HydrogeoSieveXL: an Excel-based tool to estimate hydraulic conductivity from grain-size analysis // Hydrogeology Journal. 2015. No. 23. P. 837–844. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1255-0>.
5. Fuchs S., Ziesche M., Nillert P. Empirische verfahren zur ableitung verschiedener porositätsarten aus durchlässigkeitsbeiwert und ungleichkörnigkeitszahl – ein überblick // Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie. 2017. Vol. 22. No. 2. P. 83–101. <https://doi.org/10.1007/s00767-017-0355-2>.
6. Urumovic K., Urumovic K.Sr. The referential grain size and effective porosity in the Kozeny – Carman model // Hydrology and Earth System Sciences. 2016. Vol. 20. No. 5. P. 1669–1680. <https://doi.org/10.5194/hess-20-1669-2016>.

V.E. Moshin, E.A. Filimonova

Lomonosov Moscow State University, Moscow, moshin_v@mail.ru

ESTIMATION OF SAND POROSITY AND HYDRAULIC CONDUCTIVITY BY SEMI-ANALYTICAL EQUATIONS

Abstract. A comparison between laboratory and calculated methods of sand porosity and hydraulic conductivity estimation during engineering-geological surveys on the territory of Moscow is carried out. Approximately 100 sand samples of different genesis, age, and with different physical and mechanical properties were analyzed. The results of calculated value of porosity from the coefficient of heterogeneity (Istomina, 1957) are compared with the values obtained by equation with physical properties. Hydraulic conductivity of all samples were calculated by 14 equations (Slichter, Kozeny – Carman, Barr, Krambein and Monk, etc.) based on the results of grain-size analysis. The difference between the laboratory hydraulic conductivity values measured by the SPETSGEO tool and the calculated values by the equations, included in the limits to applicability, was 30–60%.

Key words: hydraulic conductivity; porosity; grain-size distribution; sand; semi-analytical methods.

Волкова М.К.^{1,2}, Лехов М.В.²

¹АО «ВНИПИПромтехнологии», г. Москва, Volkova.m.k@vnipt.ru

²МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии,
г. Москва, mvlekhov@geol.msu.ru

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ НА УГОЛЬНОМ РАЗРЕЗЕ

Аннотация. В работе изложены результаты оценки устойчивости западного борта разреза в условиях «подвешенной» на склоне разгрузки грунтовых вод как фактора оползневых деформаций, препятствующих безопасной добыче угля в нижней части карьера. Произведены расчеты коэффициента запаса устойчивости для различных вариантов гидрогеологических условий и системы дренажа. Выполнены расчеты безнапорной фильтрации в верхнем водоносном горизонте в профильной постановке задачи для верификации параметров геофильтрационной схемы. Даны рекомендации по принятию необходимых мер для увеличения запаса устойчивости борта разреза и обеспечения безопасности горных работ.

Ключевые слова: угольный разрез; геофильтрационный поток; коэффициент запаса устойчивости; геомеханические расчеты; дренажная система; безнапорная фильтрация.

Введение

В конце 1990-х – начале 2000-х гг. на юго-западном и южном бортах угольного разреза активизировались деформации с потерей устойчивости отдельных уступов и целых участков борта. Всего за период наблюдений геолого-маркшейдерской службой разреза зарегистрировано более 15 деформаций. Практически все деформации развивались в пределах юго-западного и западного бортов. Начиная с 2014 г., на буроугольном разрезе на значительном протяжении и по всей высоте западного рабочего борта вновь активизировались опасные деформационные процессы. К началу 2016 г. охваченная данными процессами площадь и скорость их развития приобрели угрожающий характер и сформировали риски, способные оказать негативное влияние на долгосрочную перспективу развития разреза. В декабре 2019 г. начался новый этап деформаций западного борта и охватил его по всей высоте на участке площадью ~ 20,7 га. Объем затронутого деформациями массива составил ~ 2,8 млн м³ и в т.ч. ~ 1,9 млн тонн угля. Еще ~ 2,4 млн тонн вскрытого угля на дне разреза было законсервировано в опасной зоне. Данные обстоятельства определили необходимость выполнения независимой и комплексной оценки сложившейся ситуации и разработки мероприятий по предотвращению деформаций бортов разреза на этапе доработки запасов западного фланга.

Для расчетов устойчивости в современном состоянии и с учетом мероприятий по укреплению, при подготовке разработанных рекомендаций по комплексу мероприятий для ликвидации существующих и предотвращению дальнейших деформаций, использована программа SLUMP, разработанная

М.В. Леховым на геологическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова. Программа обеспечивает интерактивный и автоматический поиск слабой поверхности [2–4].

В расчете программой SLUMP принимается во внимание неоднородность, угловое несогласие слоев, разница свойств грунтов выше и ниже свободной поверхности уровня грунтовых вод, действие фильтрационной силы, гидростатическое взвешивание, боковое давление, гидравлика затопленного основания (если такая ситуация имеет место), сейсмический (динамический) фактор, нагрузка от сооружения, имитируется дренированное состояние, водоупорный характер слоя [5].

Характеристика гидрогеологических условий района

Район расположен на выходе ущелья на равнину, в долину реки с изменением гипсометрических отметок вдоль вектора падения рельефа от 650 до 600 м (рис. 1).

Рис. 1. Схема местоположения угольного разреза [7]. Розовым цветом выделена территория угольного разреза

Скальные склоны устья ущелья перекрыты шлейфом делювиальных и пролювиальных образований Q_{III-H} , который спускается в тыловое примыкание речной долины, перекрывая аллювиальные и озерные отложения Q_{II-III} .

Геоморфологическая характеристика дает представление о формировании и транзите грунтовых вод, которые приурочены к пролювиальным и аллювиальным образованиям. Поток в таких условиях близок к склоновому и имеет свободный сток из пади в долину. В пределах устьевой части пади делювий и пролювий шлейфа не подтоплен грунтовыми водами.

На гидрогеологической схеме 1:500 000 для долины реки определены два водоносных комплекса: (1) кайнозойских (четвертичных) образований и (2) осадочных толщ нижнемеловой кутинской свиты. Характерной особенностью является близкое друг другу положение пьезометрических поверхностей

водоносных комплексов в ненарушенных условиях и слабая роль водотоков и рек в формировании подземных вод (рис. 2).

Рис. 2. Региональная схема соотношения потоков подземных вод и поверхностных водотоков

Для региональной схемы соотношения потоков подземных вод и поверхностных водотоков (см. рис. 2) характерны:

- единый латеральный сток в водоносных комплексах четвертичных Q и нижнемеловых K_1 отложений. Единая пьезометрическая поверхность в ненарушенных условиях;

- параллельный транзит грунтовых вод и сезонного водотока;

- частичная разгрузка грунтовых вод в реку.

- наличие региональной дрены подземного стока активного водообмена.

В устье пади условия залегания подземных вод и особенности их изменения в период разработки месторождения позволяют выделить следующие горизонты:

- водоносный горизонт неоплейстоценовых $арQ_{II-III}$ аллювиально-пролювиальных образований мощностью 30–40 м;

- разделяющий горизонт эоплейстоценовых IQ_1 озерных отложений мощностью 10–15 м;

- разделяющий горизонт надугольных нижнемеловых отложений кутинской свиты K_1kt_2 мощностью порядка 15 м;

- водоносный горизонт нижнемеловых отложений угольного пласта и подугольной толщи кутинской свиты K_1kt_1 мощностью более 40–50 м.

Рис. 3. Схема фильтрации в водоносных горизонтах: верхнем $арQ_{II-III}$ и нижнем K_1kt_1 (горизонтальные стрелки)

Анализ схемы фильтрации в водоносных горизонтах (см. рис. 3):

- в ненарушенных условиях поверхности потоков показаны тонкими линиями, в современных условиях толстыми линиями;
- обозначены разделяющие горизонты озерных IQ_1 и надугольных K_1kt_2 отложений;
- вертикальные стрелки – перетекание.

Оценка устойчивости западного борта

Для расчетов устойчивости в современном состоянии и с учетом мероприятий по укреплению борта выбран участок с наиболее неблагоприятным сочетанием факторов дестабилизации – разгрузки фильтрационного потока и геометрии откоса.

Для вариантных и сравнительных оценок используются инженерные методы расчета [2, 6], суть которых сводится к поиску в массиве грунтовой толщи, ограниченной профилем разработки разреза, поверхностей, по которым коэффициент запаса устойчивости K имеет минимальное значение.

Порядок операций по расчету запаса устойчивости сводится к следующему. Массив разбивается на блоки вертикалями под номерами 1, 2, ..., jk . По блокам производится расчет удерживающих U и сдвигающих S сил. Силы суммируются, и отношение сумм определяет коэффициент запаса устойчивости склона:

$$K = \sum_{j=j_1}^{j_2-1} U_j / \sum_{j=j_1}^{j_2-1} S_j ,$$

где j – номер блока, j_1 и j_2 – номера вертикалей на нижнем и верхнем «заколах» поверхности, j_2-1 – количество блоков в пределах захваченной зоны разреза, U_j – удерживающая сила, действующая на блок j , S_j – сдвигающая сила, действующая на блок j .

Поиск слабой поверхности сопровождается оценкой дефицита устойчивости или кумулятивного оползневого давления $\sum_j (S - U)$ – разницы между сдвигающей и удерживающей силой, суммируемой от вертикали на верхнем заколе j_k до вертикали j . Величина оползневого давления имеет для оценки устойчивости не меньшее значение, чем K .

Оценка составляющих силового баланса и поиск наиболее слабых значений коэффициента запаса устойчивости производится в плоскости разреза с захватом грунтов как выше, так и ниже эрозионного базиса.

В расчетах участвуют параметры табл. 1 с коррекцией значений, выполненной в ходе поиска слабых поверхностей (упрощенное решение обратной геомеханической задачи). Условием определения поверхности и коррекции прочностных параметров является, с одной стороны, минимизация

искомого коэффициента запаса, с другой стороны, – требование его минимального значения не менее единицы, $K > 1,01$.

Вариантные расчеты с имитацией различного положения ослабленной зоны показали, что наименьшим запасом устойчивости $K = 1,02$ по К. Терцаги обладает поверхность формы, затрагивающая и неоплейстоценовые образования и разделяющую толщу. При этом расчеты в варианте полного устранения фильтрационного потока путем устройства перехватывающего ряда дренажных скважин на удалении от уступа котлована показали, что даже для крайне неблагоприятного сочетания факторов – свойств и геометрии откосов – запас устойчивости значительно увеличивается ($K = 1,30$, табл. 2).

Таблица 1

Расчетные значения прочностных свойств

Наименование толщ	Сцепление C , МПа	Угол внутреннего трения φ , °	Плотность грунта ρ , г/см ³
Насыпные tQ_H	0,020	30	1,90
Песчано-гравийно-глинистые apQ_{II-III}	0,016	36	1,95
Глинистые lQ_I	0,026	21	2,00
Надугольные аргиллитовые K_1kt_2	0,014	33	2,00
Угольные пласты K_1kt_1	0,400	38	1,20

Таблица 2

Коэффициент запаса устойчивости K в вариантах расчета*

№	Варианты	Без дренажа	С дренажем
1	Передача гидродинамики на все слои (водоупоры не выделяются) – наиболее неблагоприятные условия	1,02	1,30
2	Горизонт $lQ_I + K_1kt_2$ рассматривается как водоупор	1,24	1,31
3	Планировка откосов + дренаж грунтовых вод	—	1,51

Примечание: * – средние по расчетам методами К. Терцаги, Крэя – Флорина – Вяземского – Ягодина, Джанбу – Бишоп, Г.М. Шахунянца, Чугаева – Кадомского, Моргенштерна – Прайса – Можевитинова.

Вариант расчета, когда горизонт $lQ_I + K_1kt_2$ рассматривается как водоупорный, показывает, что в разделяющем горизонте в этом случае не учитывается передача давления и сил, обусловленных фильтрацией. Они действуют только в пределах мощности безнапорного потока в верхнем горизонте над водоупором. Значения коэффициента запаса устойчивости для варианта без дренажа и с его включением, соответственно, равны 1,24 и 1,31.

Учитывая приближенный характер параметров и условную схематизацию, инженерное решение требует дополнительных мер для обеспечения запаса надежности. Таковым является (в дополнение к дренажному перехвату потока грунтовых вод) планировка уступов единым откосом в пределах бровки отвала и обнажения плейстоценовых отложений. Имитации выявили возможность повысить запас устойчивости борта разреза до $K = 1,5$ и более (рис. 4).

Рис. 4. Положение наиболее слабой поверхности склона в современном состоянии и в варианте планировки откосов и организации дренажа. Обозначения: K – коэффициент запаса устойчивости по Morgenstern-Price (модификация Можевитинова).

Ступенчатая эпюра – оползневое давление (расчет программой SLUMP)

Рис. 4 показывает результаты расчета запаса устойчивости с дренажным перехватом грунтовых вод и планировкой откосов. Склон устойчивый. Запас устойчивости $K > 1,5$. Максимальное оползневое давление снижено в 1,5–2,0 раза.

Выводы из анализа фильтрационной устойчивости:

- планировка единым откосом уступов плейстоценовых отложений путем перемещения грунта из бровки отвала вниз повышает запас устойчивости до значений $K > 1,5$ (склон устойчивый).

Оценка эффективности дренажной противооползневой защиты

В ходе работы выполнены расчеты безнапорной фильтрации в верхнем водоносном горизонте в профильной постановке (рис. 5).

Рис. 5. Профильная модель фильтрации PERFIL при организации дренажа

Целевая задача моделирования – верификация геофильтрационной схемы неравномерного потока на слабопроницаемом водоупоре с оценкой коэффициентов фильтрации, не противоречащих сведениям об условиях залегания и разгрузке.

Инструментом расчетов служит программа PERFIL моделирования МКЭ профильной фильтрации со свободной поверхностью в неоднородных горизонтах со сложными условиями залегания слоев [1]. Программа [3] разработана на геологическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова и предназначена для решения задач инженерной гидрогеологии (автор М.В. Лехов).

В решении задачи используются рекомендованный изысканиями коэффициент фильтрации пород $k = 6,5$ м/сут и расходы притока к разрезу с

западной стороны. Расход составляет $84 \text{ м}^3/\text{ч}$. Максимальный удельный приток по верхнему горизонту в борт разреза при ширине фронта 500-800 м составляет значение порядка $10 \text{ м}^3/\text{сут}/\text{м}$. Величина может быть использована как ориентировочная.

По результатам решения задачи коэффициент фильтрации, обеспечивающий расход потока до $10 \text{ м}^2/\text{сут}$, скорректирован и составляет $12 \text{ м}/\text{сут}$, коэффициенты вертикальной фильтрации подстилающего разделяющего горизонта $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}/\text{сут}$. Перетекание из верхнего в нижний горизонт весьма интенсивное, намного превышает возможную инфильтрацию атмосферных осадков.

Модель современного потока показывает принципиально верный подход к фильтрационной схематизации с выделением подстилающего слабопроницаемого горизонта.

Результаты исследования

Инженерное решение по обеспечению устойчивости бортов разреза должно носить комплексный характер [5] – снижать влияние фильтрационной силы потока подземных вод в неоплейстоценовых отложениях и геометрии откосов. На основе выполненных гидрогеомеханических расчетов представляется эффективным устройство ряда дренажных скважин, перехватывающего поток грунтовых вод на подходе к разрезу, и планировка верхней части борта (рис. 6). Дренажный ряд должен быть обеспечен наблюдательными скважинами, по которым следует вести контроль эффективности работы насосов, нарастания сопротивления за счет колюматации фильтров. По данным наблюдений своевременно принимаются меры по ремонту дренажной системы.

Рис. 6. Размещение скважин (ряд красных точек) дренажного перехвата потока грунтовых вод к карьеру на выходе в речную долину [5]

Планировка профиля западного борта может осуществляться перемещением (обрушением) грунта, снимаемого с бровки разреза, включая уступ ближнего отвала. Это позволит снять избыточный вес в верхней, головной части потенциального оползневого тела и создать пригрузочный вес в нижней, подошвенной части.

Суммарный результат двух видов мероприятий выражается в повышении коэффициента запаса устойчивости до 1,5 и более. В этом случае состояние бортов бурогольного разреза может оцениваться как устойчивое.

Список литературы

1. Лехов М.В. Профильные модели безнапорной фильтрации в задачах инженерной гидрогеологии. Программы PERFIL, IWELL, SINK // Материалы Международной научной конференции «Гидрогеология сегодня и завтра: наука, образование и практика». М.: МАКС Пресс, 2013. С. 240–247.
2. Лехов М.В. Гидрогеомеханика оползневых расчетов. Программа SLUMP // Инженерная геология. 2014. № 6. С. 32–48.
3. Лехов М.В. PERFIL программа моделирования профильного потока подземных вод со свободной поверхностью // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем: официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности. 2014. № 9. С. 2014618017.
4. Лехов М.В. SLUMP программа оценки оползневой устойчивости неоднородного склона с учетом подземной гидродинамики и затопленного основания // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем: официальный бюллетень. 2014. № 9. С. 2014618016.
5. Лехов М.В. Гидрогеологическое обоснование противооползневых мероприятий в бортах карьера // Сборник тезисов докладов «Ломоносовские чтения. Секция Геология. Подсекция лаборатории охраны геологической среды и взаимосвязи поверхностных и подземных вод». М: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2020. С. 18–20.
6. МIRONENKO В.А., ШЕСТАКОВ В.М. Основы гидрогеомеханики. М.: Недра, 1974. 296 с.
7. Старые карты России и зарубежья. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://retromap.org> (дата обращения: 20.11.2021).

M.K. Volkova^{1,2}, M.V. Lekhov²

¹VNIPIPT JSC, Moscow, Volkova.m.k@vnipipt.ru

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, mvlekhov@geol.msu.ru

DEVELOPMENT OF RECOMMENDATIONS FOR IMPROVING THE HYDROGEOLOGICAL SITUATION AT THE OPEN-PIT COAL MINE

Abstract. The publication presents the results of assessing the stability of the western side of the section in conditions of “suspended” on the slope of groundwater unloading as a factor of landslide deformations that impede the safe mining of coal in the lower part of the open pit. Calculations of the safety factor for various variants of hydrogeological conditions and drainage systems have been made. Calculations of upper unconfined aquifer in the cross-section formulation of the problem for verification of the geoseepage scheme and estimation of parameters have been performed. Recommendations are given for taking the necessary measures to increase the stability margin of the side of the section and ensure the safety of mining operations.

Key words: open-pit coal mine; seepage flow; safety factor; geomechanical calculations; drainage system; unconfined aquifer.

СЕКЦИЯ «ГЕОТЕХНИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ: ОСВОЕНИЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА И СОХРАНЕНИЕ ПАМЯТНИКОВ»

Кудрявцев С.А.¹, Сахаров И.И.², Парамонов В.Н.³, Котенко Ж.И.¹

¹Дальневосточный государственный университет путей сообщения, институт транспортного строительства, кафедра «Мосты, тоннели и подземные сооружения», г. Хабаровск, kudr@festu.khv.ru

²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, строительный факультет, кафедра геотехники, г. Санкт-Петербург, i.sakharov2014@yandex.ru

³Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, факультет промышленного и гражданского строительства, кафедра оснований и фундаментов, г. Санкт-Петербург, parvn@georec.spb.ru

ОСОБЕННОСТИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗНЫХ РАСЧЕТОВ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В ГЕОКРИОЛИТОЗОНЕ

Аннотация. Целью проведения инженерно-геологических изысканий в криолитозоне являются: изучение природных и техногенных условий района проектирования, горнопроходческие работы, термометрические наблюдения в скважинах для изучения естественного температурного режима грунтов основания, лабораторные определения свойств грунтов и выполнения прогнозных теплотехнических расчетов и напряженно-деформированного состояния грунтов основания сооружения.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты; железнодорожные насыпи; геотехнический мониторинг; численное моделирование.

По мнению академика В.П. Мельникова, в связи с отсутствием накопленных результатов измерений поведения мерзлых толщ в действующей фазе потепления климата все новые проекты строительства в криолитозоне должны носить статус экспериментальных с постоянным геотехническим мониторингом за всем их жизненным циклом [6]. Значит, что проектирование, строительство, эксплуатация и реконструкция сооружений в районах распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) должны осуществляться с учетом всесторонней оценки как инженерно-геокриологических и метеорологических условий, так и геотехнической оценки последствий такого освоения территорий.

Характерными особенностями эксплуатации железных дорог в районах с наличием ММГ являются: повышенная деформативность и длительность процессов стабилизации земляного полотна; необходимость применения специальных методик, позволяющих анализировать и оценивать текущую деформативность различных объектов земляного полотна и отслеживать (прогнозировать) ее изменения во времени; необходимость выполнения увеличенных объемов ремонтных и профилактических работ по верхнему строению пути и земляному полотну по сравнению со среднесетевыми условиями; применение наряду с традиционными специальными

противодеформационных мероприятий по ускорению стабилизации земляного полотна на участках со сложными мерзлотно-грунтовыми условиями.

Под прогнозированием деформативности многолетнемерзлого основания земляного полотна железных дорог подразумевается анализ возможных категорий ее проявлений на объектах в целом для рассматриваемого момента времени и перспективных условий их эксплуатации. Эту чрезвычайно многофакторную задачу промерзания и оттаивания грунтов невозможно корректно смоделировать ни в лабораторных, ни в полевых условиях. Отсюда вытекает вывод о том, что нужно искать другой путь определения характеристик, обусловленных промерзанием и оттаиванием. Очевидно, в рассматриваемых условиях целесообразно идти по пути, предложенному в свое время С.Б. Уховым для масштабно неоднородных тел (валунно-глыбовые, скальные и т.п.) [7]. Для подобных сред в полевых, а тем более в лабораторных условиях не удастся обеспечить испытания объема грунта, представительного по отношению ко всему массиву. В связи с этим суть метода, названного С.Б. Уховым «расчетно-экспериментальным», заключается в лабораторном определении простейших характеристик грунтовых материалов и в дальнейшем использовании численного моделирования среды с типовой структурой. Характерно, что метод С.Б. Ухова, включающий математическое моделирование, был с успехом применен еще в 1993 г., т.е. фактически на начальном этапе использования численных методов расчета в строительстве.

И.И. Сахаров, С.А. Кудрявцев, В.Н. Парамонов [4, 5] обосновали в настоящее время, что, ввиду широкого применения метода конечных элементов, такой подход к определению характеристик промерзания, морозного пучения и оттаивания – как деформаций, так и сил – будет еще более оправданным. В случае промерзания, морозного пучения и оттаивания необходимо определить гранулометрический состав и влажность грунта, а затем провести численное моделирование температурно-влажностных полей и напряженно-деформированное состояние (НДС) системы «сооружение – многолетнемерзлое основание».

Для проведения длительного геотехнического мониторинга целесообразно создавать наблюдательную сеть из температурных скважин, глубинных реперов и деформационных марок. Термометрические исследования теплового режима грунтов целесообразно проводить с применением системы мониторинга температуры.

На основе этих данных проводится научно-техническое сопровождение управление природно-геотехническими системами.

Данные научно-технического сопровождения в эксплуатационный период представляются эксплуатирующей организации. На основе этих данных соответствующие службы принимают решение о внесении изменений в режим эксплуатации объектов или о необходимости дополнительных мероприятий для обеспечения безопасного функционирования сооружений и сохранения природной среды.

Разработку наблюдательной сети и регламента геотехнического мониторинга следует производить с учетом технологии эксплуатации объектов обустройства, конструктивных особенностей сооружений, сложности инженерно-геокриологических условий.

Обработка данных температурных наблюдений включает: составление таблиц замеров температур грунтов с вычислением средних, максимальных и минимальных значений; построение графиков изменения температур в скважинах; построение графиков хода сезонного оттаивания грунтов; составление таблиц и графиков высоты и плотности снежного покрова.

Обработка данных геодезических наблюдений должна включать: вычисление деформаций по каждой стенной или грунтовой марке; графическое оформление результатов измерений согласно приложению 5 к ГОСТ 24846-2019 [1]; определение средней или максимальной деформации железнодорожной насыпи.

В разработанную методику научно-технического сопровождения процессов промерзания и оттаивания железнодорожных насыпей на ММГ должны быть включены результаты комплексного исследования влияния железнодорожных насыпей на ММГ основания с использованием современных аппаратно-программных комплексов, предназначенных для инженерно-геологического обследования.

Геофизические методы в современной системе диагностики железнодорожных сооружений основаны на проработке закономерностей трансформаций всевозможных физических полей в грунтах тела насыпи и их многолетнемерзлом основании в соответствии с их состоянием, свойствами, сложением. Целями исследования тела железнодорожной насыпи и многолетнемерзлого основания являются: проведение литологического анализа всех слоев насыпи и основания; определение ослаблений слоев земляного полотна тела насыпи и основания за счет образования чаши оттаивания и уровня подземных вод **георадарными методами**.

Исследование распределения физико-механических характеристик грунтов основания решаются с помощью методов, известных в инженерной сейсморазведке и сейсмометрии. Для решения конкретной задачи выбираются датчики с соответствующими характеристиками, режимы регистрации колебаний, периоды дискретизации и динамический диапазон регистрирующей аппаратуры, усиление и способы фильтрации входного сигнала.

Сейсмическое профилирование. Сейсмическое зондирование выполняется на аппаратно-программном комплексе, предназначенном для инженерно-геологического обследования грунтов искусственных сооружений и оснований зданий и сооружений

По результатам сейсмического зондирования имеются следующие результаты.

1. Методом сейсмического профилирования установлено распределение скорости распространения продольных V_p и поперечных волн V_s в теле насыпи и многолетнемерзлом основании.

2. По распределению продольных волн V_p определяется плотность слоев грунта тела насыпи и многолетнемерзлого основания, г/см^3 , по эмпирической формуле:

$$\rho = 0,6226(V_p/1000) + 1,1730. \quad (1)$$

3. По распределению поперечных волн V_s определяется модуль сдвига грунта (сейсмическая жесткость) тела насыпи и многолетнемерзлого основания, МПа, по эмпирической формуле

$$G_g = \rho V_s, \quad (2)$$

где V_s – скорости распространения поперечных волн.

4. По результатам скоростного распределения продольных волн V_p и распределения плотности грунта ρ путем пересчета по имеющимся эмпирическим зависимостям определяется значение динамического модуля упругости E_d , МПа, с использованием формулы В.И. Джурика [2].

$$\lg E_d = (2,277 \pm 0,034) \lg V_p - (3,779 \pm 0,107). \quad (3)$$

5. Значение модуля общей деформации E_o , МПа, определяется из лабораторных значений пористости грунта n и по значениям динамического модуля упругости E_d по зависимости

$$E_o = E_d(n - 1)/(150n + 1) + 1,173, \quad (4)$$

где E_d – динамический модуль упругости.

К контролируемым параметрам при геотехнической диагностике железнодорожной насыпи на ММГ относятся: деформации в процессе оттаивания; температура и влажность грунта.

Геотехническое моделирование. Анализ эффективности земляного полотна на ММГ проводится с использованием программы Termoground численного моделирования процесса промерзания, морозного пучения и оттаивания в годичном цикле методом конечных элементов в пространственной постановке, входящей в составной части в программный комплекс FEM-models [3, 8–10]. Эта сложная геотехническая задача решается в два этапа. Первоначально решается теплотехническая задача, в результате которой определяются температурные и влажностные поля на определенный период времени. Вторым этапом решается задача определения НДС грунтов основания в процессе промерзания, морозного пучения и оттаивания.

Выводы

Результаты расчетов позволяют прогнозировать неравномерность деформаций железнодорожных сооружений и на этой основе разрабатывать мероприятия по снижению опасных деформаций. Вариантные расчеты позволяют локализовать опасные участки, что уменьшает материалоемкость проектируемых конструкций и их трудозатраты с сокращением сроков строительства, стоимости и периодичности производства работ по капитальному ремонту. Система поэтапного контроля процессов изменения температурно-влажностных полей и деформаций дает возможность более эффективного использования современных геотехнологий.

Список литературы

1. ГОСТ 24846-2019 Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений.
2. Джурик В.И., Дреннов А.Ф., Басов А.Д. Прогноз сейсмических воздействий в условиях криолитозоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 272 с.
3. Кудрявцев С.А. Расчет процесса промерзания и оттаивания по программе «TERMOGROUND» // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2004. № 4. С. 83.
4. Кудрявцев С.А., Парамонов В.Н., Сахаров И.И., Шашкин А.Г. Использование метода конечных элементов в решении задач геотехники: учебное пособие. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2014. 162 с.
5. Кудрявцев С.А., Сахаров И.И., Парамонов В.Н. Промерзание и оттаивание грунтов (практические примеры и конечно-элементные расчеты). СПб.: Изд-во института «Геореконструкция», 2014. 265 с.
6. Мельников В.П., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Пендин В.В. Предотвращение деградации вечной мерзлоты при экономической деятельности в Арктике и Субарктике // ХОЛОД'ОК! 2018. Т. 16. № 1. С. 4–5.
7. Механика грунтов, основания и фундаменты / С.Б. Ухов, В.В. Семенов, В.В. Знаменский, З.Г. Тер-Мартirosян, С.Н. Чернышев. М.: Высшая школа, 1993. 288 с.
8. Embankment on permafrost eastern polygon of Baikal-Amur mainline / S.A. Kudryavtsev, A.V. Kazharsky, E.D. Goncharova, Z.I. Kotenko, D.O. Grigoriev // Procedia Engineering. 2017. Vol. 189. P. 774–782. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.121>.
9. Frost depth monitoring of pavement and evaluation of frost susceptibility at soil ground of Kazakhstan / A. Zhussupbekov, Z. Shakhmov, R. Lukpanov, G. Tleulnova, S. Kudryavtsev // Proceedings of the 19th International Conference on soil mechanics and geotechnical engineering, ICSMGE 2017. Seoul, 2017. P. 1455–1458.

10. Kudryavtsev S., Maleev D., Tsvigunov D., Goncharova E. Disalgnment of railroad poles as dynamic effect of rolling stock // *Procedia Engineering*. 2016. Vol 165. P. 1858–1865. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.934>.

S.A. Kudryavtsev¹, I.I. Sakharov², V.N. Paramonov³, Zh.I. Kotenko¹

¹Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, kudr@festu.khv.ru

²Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint Petersburg, i.sakharov2014@yandex.ru

³Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, parvn@georec.spb.ru

FEATURES OF ENGINEERING-GEOLOGICAL SURVEYS FOR PREDICTIVE CALCULATIONS OF RAILWAY INFRASTRUCTURE FACILITIES IN THE GEOCRYOLITHOZONE

Abstract. The purpose of engineering-geological surveys in the cryolithozone are: the study of natural and man-made conditions of the design area, mining operations, thermometric observations in wells to study the natural temperature regime of the foundation soils, laboratory determination of soil properties and performance of predictive thermal calculations and stress-strain state of the foundation soils of the structure.

Key words: permafrost; railway embankments; geotechnical monitoring; numerical modeling.

Романевич К.В., Лебедев М.О., Андрианов С.В.

ОАО «Научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт “Ленметрогипротранс”»,
г. Санкт-Петербург, mail@lmg.ru

КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДОЛГОСРОЧНОГО ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГОРНЫХ ТОННЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭМИССИИ

Аннотация. Показанные результаты долгосрочной регистрации естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) по системе автоматизированного геотехнического мониторинга отражают циклические изменения свойств прилегающего к тоннелям горного массива в тесной взаимосвязи с температурным режимом. Зачастую полезный сигнал невозможно отличить от случайной импульсной (не регулярной помехи). Настоящая работа дает возможность на больших рядах данных увидеть, что несмотря на большое количество техногенных помех в действующих транспортных электрифицированных тоннелях удастся регистрировать ЕЭМИ. Важным является подтверждение возможности контроля современной динамики горных пород и конструкций тоннелей, выявление стабильной цикличности, соответствующей нормальному функционированию систем «тоннель – горный массив». Эти работы продолжаются, и в дальнейшем будет оцениваться ЕЭМИ, возникающее на последующих этапах жизни подземного сооружения.

Ключевые слова: электромагнитная эмиссия; железнодорожный тоннель; обделка; вмещающий массив; напряженно-деформированное состояние; сезонные вариации.

С момента первого упоминания эффекта естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) при нагружении непьезоэлектрических материалов [3] до наших дней известно множество исследований его взаимосвязи с проявлениями геодинамики в массивах горных пород.

Большинство работ в ходе рассмотрения тематики взаимосвязи ЕЭМИ и изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) (геодинамики) в подземных выработках посвящено измерениям эффекта в угольных шахтах, выработках рудников и на карьерах. Основа этих работ – контроль и прогноз горных ударов, катастрофических сдвижений массивов.

Работ по регистрации ЕЭМИ в транспортных тоннелях сравнительно мало, но они звучат достаточно убедительно и позволяют полагаться на результаты регистрации эффекта при оценке изменения НДС системы «обделка тоннеля – вмещающий горный массив» при высоком уровне техногенных помех, и даже создавать системы его непрерывного контроля – по аналогии с системами ЕЭМИ-мониторинга в угольных шахтах [1, 4].

Вопросы учета вариаций сигналов ЕЭМИ различных уровней от суточных до сезонных и годовых очень важны для разрабатываемых систем геодинамического мониторинга, т.к. четкая фиксация таких вариаций позволяет понимать режим существования вмещающего массива и подземного объекта в нем. А по аномальным отклонениям от установившегося режима можно делать выводы об аномальных изменениях НДС, приводящих к геодинамическим

явлениям. Однако для того, чтобы делать прогнозы, необходимо задавать критерии таких отклонений, что в свою очередь возможно только при сверхдолгосрочных наблюдениях по системе мониторинга, исчисляющихся десятилетиями.

Многочисленными лабораторными исследованиями было показано, что ЕЭМИ связано с развитием процессов микротрещинообразования и возникает в процессе разрушения материала. Эта особенность аномалий ЕЭМИ аналогична как на уровне лабораторных испытаний, так и для крупномасштабных исследований, включая взрывы и землетрясения.

Ранее авторами также проводились лабораторные испытания, результаты которых более подробно изложены в [2].

Аналогичные сигналы авторами получены и при натурных исследованиях в различных горных выработках. При натурных экспериментах в отличие от измерений на образцах – многочисленные сигналы от деформирующихся неоднородностей в горной породе сливаются в общий интегральный фон, дифференцируемый при визуализации амплитудно-частотных характеристик. По увеличению амплитудного уровня на характерных для материала частотах определяются интервалы сооружения, в области которых в породе и/или конструкциях весьма вероятно протекают интенсивные геодинамические процессы. Здесь критически важен учет техногенных помех.

На рис. 1 представлен пример результата регистрации ЕЭМИ в штольне железнодорожного тоннеля (протяженностью 6686 м), возведенного в массиве сложного геолого-тектонического строения, представленного трещиноватыми гранитогнейсами и граносиенитами с дайковыми телами гнейсогранитов с небольшими участками сильнотрещиноватых и раздробленных пород.

Измерения были сделаны с промежутком в один месяц. В центре спектрограмм в обоих случаях отмечаются яркие аномалии, отражающие повышенную активность массива в зоне проводимых горных работ в параллельной к штольне выработке, причем на втором цикле измерений отмечается сдвигение аномалии, соответствующее перемещению горной проходки.

Другим, более грубым способом обработки результатов регистрации ЕЭМИ является осреднение каждого сигнала и экстракция амплитудного параметра «А» – средней амплитуды импульсов, зарегистрированных в заданный промежуток времени (10–80 с) в полосе частот 30–50 кГц (центральной полосе для регистрирующей аппаратуры).

Амплитудный параметр «А» рассчитывается, в выбранном интервале записи, как среднее арифметическое по абсолютным (выпрямленным) значениям отсчетов или их квадратов. Затем с учетом усиления пересчитывается в микровольты. Для унификации данных каждое значение нормируется на среднее арифметическое для каждого ряда данных с получением нормированного параметра $A_{\text{норм}}$.

Рис. 1. Результаты регистрации электромагнитного излучения в протяженном тоннеле глубокого заложения

Таким образом, решается вопрос оперативности передачи мониторинговой информации по телекоммуникационным сетям, хотя и с потерей большей части информации – объем памяти, занимаемой файлом при осреднении, снижается более чем в 1000 раз.

При подготовке инфраструктуры региона к проведению Олимпийских игр 2014 г. в г. Сочи была сооружена и введена в эксплуатацию совмещенная (автомобильная и железная) дорога «Адлер – горноклиматический курорт “Альпика Сервис”» общей протяженностью 48 км. Строительство выполнялось с 2008 по 2013 гг. За это время было возведено 14 тоннелей (шесть железнодорожных, три автодорожных и пять вспомогательных) общей длиной около 27 км – из них 10,3 км железнодорожных, 6,7 км – автомобильных и около 10 км вспомогательных эвакуационных и сервисных штолен.

С самого начала проходческих работ специалистами института ОАО «НИПИИ “Ленметрогипротранс”» осуществлялись режимные наблюдения в составе горно-экологического мониторинга. Основной объем работ приходился на выполнение инструментальных геомеханических, геофизических, сейсмологических, гидрогеологических, геодезическо-маркшейдерских и экологических наблюдений. Исследования велись как по

временным профилям и точкам наблюдений в горных выработках и на поверхности, так и по системе устанавливаемых по мере проходки тоннелей постоянных датчиков разного типа, которые монтировались с учетом геологических особенностей трассы (литологические разности, тектонические нарушения, разломы и др.). К концу 2013 г. была смонтирована и запущена в эксплуатацию вся контрольно-измерительная аппаратура, выполнена синхронизация всех установленных в конструкции датчиков и налажена регистрация измеряемых параметров в автоматическом режиме.

Целью разработки автоматизированной системы геотехнического мониторинга является обеспечение безопасной эксплуатации тоннелей на основе данных непрерывного контроля состояния системы «обделка тоннеля – вмещающий горный массив» и прогнозирования технического состояния конструкций тоннеля. Комплексный геотехнический мониторинг обеспечивает безопасную эксплуатацию тоннелей, оперативный контроль за негативными (техногенными и природными) воздействиями на сооружения и определение качественных и количественных показателей их влияния на конструкции, а также онлайн оценку геодинамической активности системы «обделка тоннеля – вмещающий горный массив» для прогнозирования изменений НДС пород вблизи подземных выработок на всем их протяжении.

В представленной работе для примера показаны данные для одного опытного участка.

Железнодорожный двухпутный тоннель № 6 подковообразного очертания общей длиной 433 м.

На ПК 453 + 08 (223 м от южного портала) установлены датчики НДС, на ПК 453 + 28 (243 м от южного портала) – датчики ЕЭМИ.

Глубина сечения ≈ 38 м.

Участок полностью расположен в делювиальных отложениях, представленных углистыми алевросланцами. Состояние горных пород от сильнотрещиноватых до раздробленных, в большей массе перемятых, местами перетертых по терщиноватости и сланцеватости. Водоприток умеренный. От слабоустойчивых до совершенно неустойчивых. Коэффициент по Протодяконову 0,8–1,5 – 70%, 1,5–2,5 – 30%.

На рис. 2 представлены результаты совместной обработки данных ЕЭМИ и НДС системы «обделка тоннеля – вмещающий горный массив» по первому участку в железнодорожном тоннеле № 6. Показан временной интервал измерений с декабря 2013 г. по февраль 2021 г.

Также приведены графики температуры воздуха по двум метеорологическим станциям: 1 (в начале трассы тоннелей) – в г. Сочи (Краснодарский край, Россия): широта 43,58°, долгота 39,77°, высота над уровнем моря 132 м; 2 (в окончании трассы тоннелей) – в Красной Поляне (Краснодарский край, Россия): широта 43,68°, долгота 40,20°, высота над уровнем моря 567 м.

Рис. 2. Результаты совместной обработки данных ЕЭМИ и НДС по первому участку (железнодорожный тоннель № 6)

Информация о температуре приведена по данным справочно-информационного портала «Погода и климат» [5].

Для графиков НДС и температуры воздуха проведены линии тренда.

Температурные колебания значений по датчикам НДС за показанный период находятся в пределах 1–2 МПа с четко выраженной сезонностью. Прослеживается безусловная прямая зависимость регистрируемых данных по датчикам НДС от температуры воздуха (и соответственно температуры тоннельной обделки). Это объясняется процессами сезонного сжатия и растяжения струн в измерительных струнных тензодатчиках.

По линиям тренда для датчиков НДС можно сделать вывод о плавном увеличении напряжений в обделке с последующей стабилизацией.

В начале эксплуатации напряжения в монолитной железобетонной обделке тоннеля развиваются интенсивнее.

Анализируя графики ЕЭМИ можно заметить, что сезонные колебания ЕЭМИ идентичны в течение всего периода наблюдений, но отличаются по интенсивности в начале измерений.

В начале эксплуатации тоннель и вмещающий массив приходят в равновесие. Накопленных зарядов на бортах микротрещин, микродефектов, микронеоднородностей, трещиноватости больше и первое время происходит их активная компенсация. На высокую интенсивность ЕЭМИ в начале эксплуатации тоннеля влияет и тот факт, что обделка выполнена из монолитного железобетона. А также то, что в начале эксплуатации напряжения в монолитной железобетонной обделке тоннеля развиваются интенсивнее.

Далее с декабря 2017 г. по настоящее время наблюдается стабилизированный ход ЕЭМИ с выдержанными по интенсивности и частоте минимумами и максимумами.

В начале измерений минимумы ЕЭМИ достаточно четкие, с 2017 г. минимумы растянуты на несколько месяцев.

Минимумы ЕЭМИ наблюдаются:

- в январе 2014, январе 2015, январе 2016 гг.;
- с декабря 2016–января 2017 по июнь 2017 гг.;
- с января 2018 по май 2018 гг.;
- с ноября 2018 по июнь 2019 гг.;
- с января 2020 по июнь 2020 гг.

То есть минимумы ЕЭМИ в начале измерений достаточно четко совпадают с минимумами температур, после трех лет эксплуатации минимумы ЕЭМИ растягиваются с минимума температур до начала лета.

На графиках ЕЭМИ наблюдаются локальные и основные максимумы.

Максимумы ЕЭМИ наблюдаются:

- в марте – апреле 2014 г. – локальный;
- в августе 2014 г. – основной;
- в феврале-апреле 2015 г. – локальный;
- в августе 2015 – основной;
- в мае-июне 2016 г. – локальный;
- в июле-августе 2016 г. – основной;
- в январе 2017 г. – локальный;
- в августе 2017, августе 2018, августе 2019, августе 2020 гг.

Локальные максимумы ЕЭМИ связываются с резким перепадом температур, основные максимумы ЕЭМИ – с максимальными температурами.

Наблюдаемая связь ЕЭМИ с температурой не прямая, а опосредованная через изменение характеристик прилегающих к выработке горных пород – а именно через процессы их сжатия и растяжения, ведущих к смыканию и размыканию существующих в них микродефектов и микротрещиноватости.

Так, в стабильно сжатом состоянии фиксируются минимумы импульсов ЕЭМИ, при растяжении массива и материала обделки происходит разделение зарядов на бортах микродефектов и происходит нарастание эффекта, полное разделение бортов микродефектов приводит к прекращению его интенсивности. Данный процесс протекает в обратную сторону при сжатии микродефектов и микротрещиноватости в массиве горных пород. Периоды сжатия и растяжения тесно связаны с температурными колебаниями, в связи с этим возникает сезонность ЕЭМИ.

Выводы

Показанные результаты долгосрочной регистрации ЕЭМИ по системе автоматизированного геотехнического мониторинга отражают циклические

изменения свойств прилегающего к тоннелям горного массива в тесной взаимосвязи с температурным режимом. Показано, что связь эта не прямая и не постоянная – она может зависеть от структурного состава вмещающих горных пород, материалов и конструкций обделок железнодорожных тоннелей, различных механизмов смыкания и размыкания микродефектов для конкретного вмещающего горного массива и др.

Для более уверенных выводов необходимо продолжение анализа данных по автоматизированной системе геотехнического мониторинга тоннелей. Планируется более подробно изучить вопросы возникновения и развития цикличности и сезонности в данных ЕЭМИ, в т.ч. и в связи их с наземными измерениями по региональной сети. Провести детальную обработку мониторинговых данных методами математической статистики. Выявить количественные взаимосвязи параметров ЕЭМИ и НДС. Проследить реакции ЕЭМИ на землетрясения на различных участках.

Открытым также остается вопрос о влиянии и учете техногенных помех. Очень часто полезный сигнал невозможно отличить от случайной импульсной (не регулярной помехи). Настоящая публикация дает возможность показать на больших рядах данных, что, несмотря на значительное количество техногенных помех в действующих транспортных (железнодорожных) электрифицированных тоннелях удастся регистрировать ЕЭМИ системы «обделка тоннеля – вмещающий горный массив».

Важным аспектом является и подтверждение возможности контроля современной динамики горных пород и конструкций тоннелей, выявление стабильной цикличности, соответствующей нормальному функционированию систем «обделка тоннеля – вмещающий горный массив». Это особенно актуально, учитывая прогнозный характер ЕЭМИ.

Необходимо дополнительно заметить, что представленные результаты получены по осредненным данным. Спектрограммы сигналов ЕЭМИ предоставляют более полную информацию по каждому измерению, ярко отражающую структуру излучения, а, следовательно, и динамику геомеханического процесса в массиве.

Представленные в публикации работы продолжаются, и в дальнейшем будет оцениваться эффект ЕЭМИ, возникающий на последующих этапах жизни подземного сооружения.

Список литературы

1. Rock burst monitoring by integrated microseismic and electromagnetic radiation methods / X. Li, E. Wang, Z. Li, Z. Liu, D. Song, L. Qiu // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016. Vol. 49. Issue 11. P. 4393–4406.
2. Romanevich K., Basov A. Assessment of mutual influence of underground constructions on electromagnetic radiation emitted by fractured rock // Paper

proceedings of the ITA – Aites World tunnel Congress, Dubai, UAE, 2018.
P. 3575–3581.

3. Stepanov A.W. Uber den mechanismus der plastischen deformation // Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion. 1933. No. 4. P. 609–627.
4. Wang E., He X., Liu X., Xu W. Comprehensive monitoring technique based on electromagnetic radiation and its applications to mine pressure // Safety Science. 2012. No. 50. P. 885–893.
5. Информационный портал «Погода и климат». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 20.11.2021).

K.V. Romanevich, M.O. Lebedev, S.V. Andrianov

Lenmetrogiprotrans OJSC, Saint Petersburg, mail@lmg.ru

COMPREHENSIVE INTERPRETATION OF THE RESULTS OF LONG-TERM GEOTECHNICAL MONITORING OF MINING TUNNELS USING THE ELECTROMAGNETIC EMISSION METHOD

Abstract. The shown results of long-term registration of natural electromagnetic radiation (NEMR) using the automated geotechnical monitoring system reflect the cyclical changes in the properties of the rock mass adjacent to the tunnels in close relationship with the temperature regime. This work makes it possible to see on large data series that, despite a large amount of man-made interference in existing electrified transport tunnels, it is possible to register NEMR. It is important to confirm the possibility of monitoring the modern dynamics of rocks and tunnel structures, to identify a stable cyclicity corresponding to the normal functioning of the “tunnel – enclosing mountain range” systems. This work is ongoing, and the NEMR that occurs in the subsequent stages of the life of the underground structure will be assessed in the future.

Key words: electromagnetic emission; railway tunnel; lining; enclosing massifs; stress-strain state; seasonal variations.

Шашкин М.А.

ООО «ПИ Геореконструкция», г. Санкт-Петербург, mshashkin91@vibromon.ru

РАЗНИЦА В ПОДХОДАХ К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПАМЯТНИКИ АРХИТЕКТУРЫ В РОССИИ И ГЕРМАНИИ

Аннотация. В публикации рассматривается вопрос различия в подходах к оценке влияния вибродинамических воздействий на исторические здания в России и Германии. Приводится анализ основных нормативных технических документов по данной тематике – отечественных ВСН 490-87 «Проектирование и устройство свайных фундаментов и шпунтовых ограждений в условиях реконструкции промышленных предприятий и городской застройки» и ТСН 50-302-2004 «Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге», и немецкого DIN 4150-3 «Vibrations in buildings – Part 3: Effects on structures». На примере из инженерной практики демонстрируются концептуальные различия в методиках оценки вибрации, возникающей при погружении шпунта в сложных инженерно-геологических условиях.

Ключевые слова: динамическое воздействие; вибрация; вибромониторинг зданий; нормирование вибрации; вибропогружение шпунта; геотехнический мониторинг; виброметрические методы.

Вынужденные колебания при определенных условиях способны оказывать негативное влияние на любые здания или сооружения, и в этом смысле подход к обеспечению механической безопасности памятника, подверженного влиянию вибродинамических воздействий, мало чем отличается от любого другого объекта с аналогичным типом конструкции. Однако ряд особенностей, существенно влияющих на их вибростойкость, все же есть. К таким особенностям относятся: перестраивание зданий в период эксплуатации и увеличение их этажности, в результате чего основания и несущие конструкции получили дополнительную нагрузку; ослабление кирпичных стен трещинами; многослойность конструкций перекрытий; зыбкость перекрытий во многих помещениях; отсутствие в ряде случаев или низкое качество капитального ремонта; неудовлетворительное косметическое состояние отделочных материалов [4].

В публикации рассмотрены подходы к оценке степени влияния вибродинамических воздействий на исторические здания в России и Германии. В качестве источников таких воздействий приняты различные геотехнологии, т.е. случай, когда исторические здания попадают в зону влияния нового строительства (уплотнительная застройка) (рис. 1) или реконструкции.

В состав работ по геотехническому мониторингу зданий и сооружений, попадающих в зону влияния строительных работ (в России чаще всего эта величина принимается равной 30 м от границы пятна застройки) входят так называемые виброметрические методы – системно организованные

наблюдения за колебаниями строений, призванные контролировать допустимый уровень динамических воздействий и своевременно влиять на строительный процесс с целью минимизации развития негативных тенденций. Иными словами, параметры колебаний, генерируемых строительным процессом, не должны оказывать влияния на эксплуатационную надежность соседних зданий. Особую актуальность такие наблюдения принимают при суммировании факторов: сложные инженерно-геологические условия зоны строительства и в зону влияния попадает здание – объект культурного наследия (рис. 2). Совершенно очевидно, что для г. Санкт-Петербурга такое сочетание является весьма распространенным случаем [3, 8].

Рис. 1. Историческое здание в зоне влияния нового строительства

Рис. 2. Производство геотехнических работ вблизи исторических зданий

Основой любой методики наблюдения за зданием является соответствующий нормативный технический документ (НТД), устанавливающий принципы организации мониторинга, а также критерии оценки – предельные значения, в данном случае колебаний, для конкретного типа здания и грунтовых условий. Именно нормирование (оценка) вибрации на сегодняшний день является самым спорным и неоднозначным вопросом в инженерной практике проведения вибромониторинга как в России, так и за ее пределами. Следует отметить, что оптимальных результатов в нормировании техногенной вибрации ни одной стране так достичь и не удалось [6].

Поскольку официально в Российской Федерации в качестве основного НТД, регламентирующего проведение виброметрического мониторинга строительных конструкций, принят национальный стандарт ГОСТ Р 52892-2007 [2], представляющий из себя, по сути, компиляцию из зарубежных нормативов, то он исключен из авторского анализа. Критерии, представленные в приложении «Б» [2], носящем справочный характер, встречаются в стандартах Германии, Великобритании, Норвегии и США. В качестве нормативов, основанных на исследованиях отечественных ученых, автором приняты ВСН 490-87 [1] (в настоящий момент имеет статус справочного пособия) и ТСН-50-302-2004 [7] (действующий документ, разработанный для учета негативных особенностей условий устройства оснований и фундаментов в г. Санкт-Петербурге).

Нормирование вибрации в отечественных НТД основывается на том, что динамические воздействия при погружении свай или шпунта должны удовлетворять условию обеспечения нормальной эксплуатации сооружений и подземных коммуникаций. При этом в качестве основного нормируемого параметра используется *допустимое ускорение вертикальных колебаний фундамента*, при котором не происходят дополнительные деформации оснований вследствие уплотнения или разжижения грунта. Кроме того, помимо допустимых ускорений, в ВСН 490-87 [1] приводятся и предельно допустимые значения (критические значения, выше которых сохранность зданий или сооружений реализуется с вероятностью менее 0,5) в зависимости от их состояния и группы грунта основания существующего здания. Предельные ускорения в несколько раз выше допустимых и согласно логике документа должны применяться для расчета ожидаемых деформаций, попадающих в зону влияния, зданий. Данные нормы хотя и предписывают выполнять на стадии геотехнического проектирования расчет возможности погружения свай (или шпунта) вблизи зданий (для этого приводятся зависимости вертикальных смещений и ускорений от частоты колебаний грунта, значения коэффициента затухания колебаний грунта с расстоянием и другие параметры), в основном, они используются для сравнения фактически полученных в процессе мониторинга (или в лучшем случае опытных работ) амплитуд колебаний (виброускорений) с некоторыми табличными значениями. Так, например, для г. Санкт-Петербурга, величина ускорения $0,15 \text{ м/с}^2$ носит повсеместный

характер и служит критерием для всех возможных случаев. Данное значение, очевидно, получено опытным путем при лабораторных виброиспытаниях грунтов («критическое ускорение») и получило апробацию многолетним использованием на практике. Относительно ТСН-50-302-2004 [7] в части определения допустимых параметров колебаний конструкций зданий и сооружений, отнесенных к историческим и архитектурным памятникам, уровень динамических воздействий «принимается соответствующим фоновым значениям». Очевидно, что данное требование невыполнимо по определению и следует полагать, что авторы этого документа под «фоновыми» понимали воздействие, возникающее при проезде тяжелого грузового транспорта по городской улице (уровень виброускорения порядка $0,07\text{--}0,08\text{ м/с}^2$), однако данное уточнение не попало в текст норм [9]. К недостатку данных документов можно отнести следующее: в нормировании не учитывается частотный состав вибрационного воздействия, а также параметры собственных колебаний объектов мониторинга, дается лишь указание, что «в случае вибропогружения свай и свай-оболочек необходимо проверить прочность при резонансе ближайших к свайному полю несущих конструкций в соответствии с указаниями «Инструкции по расчету несущих конструкций промышленных зданий и сооружений на динамические нагрузки»; не приводятся критерии, ограничивающие непосредственное механическое воздействие на строительные конструкции.

Для сравнения рассмотрен немецкий стандарт DIN 4150-3:2016, основанный на ином принципе нормирования динамических воздействий – зависимости пиковых значений механических напряжений в конструкции от пиковых значений скорости колебаний [5, 10]. В НТД утверждается, что *«механические напряжения в балках и пластинах, возникающие при их колебаниях на частоте, близкой к резонансной, могут быть рассчитаны по результатам измерений скорости и частоты при условии, что эти измерения выполнены в точках, где значение скорости максимальное»*. При этом знание условий закрепления и жесткости элемента для оценки возникающих в нем напряжений не является обязательным. Можно предположить, что представленные в стандарте критерии оценки вибрации базируются на вышеизложенной зависимости.

В DIN 4150-3:2016 [10] предельные значения установлены в отношении кратковременной вибрации для пиковых значений скорости на фундаменте здания для трех категорий: зданий делового назначения, производственных зданий и сооружений, имеющих аналогичную конструкцию (категория 1); жилых зданий и зданий, имеющих аналогичную конструкцию или назначение (категория 2); сооружений, не относящихся к категориям 1 или 2, имеющие высокую социальную важность (например, охраняемых памятников архитектуры). При этом, представленные критерии являются частотно-зависимыми, т.е. они устанавливаются в зависимости от частоты вибродинамического воздействия. Как видно, норматив [10] в представленных

критериях, не рассматривает возможность развития деформаций здания, вызванных неравномерными осадками фундамента, вследствие влияния вибрации на грунты основания.

Показано рассмотрение описанных различий в подходе к оценке влияния вынужденных колебаний на конкретном примере. Один из корпусов ансамбля «Новая Голландия» находился в зоне влияния строительства дюкерного перехода через канал [11]. Работы включали в себя устройство ограждения котлована из шпунтовых свай. Ограждение устраивалось методом вибропогружения (рис. 3).

Рис. 3. Вибропогружение шпунта в непосредственной близости от объекта культурного наследия (исторический ансамбль зданий на о-ве Новая Голландия, г. Санкт-Петербург)

Вибропогружатель работал на частоте 27,1 Гц, амплитудно-частотный спектр представлен на рис. 4.

Рис. 4. Амплитудно-частотные спектры колебания сохраняемого здания при вибропогружении шпунта

В соответствии с ТСН 50-302-2004 [7] для данного типа сохраняемого здания и геотехнической категории допустимое ускорение вертикальных колебаний фундамента принимается равным $0,15 \text{ м/с}^2$ (как упоминалось выше – требование непревышения фоновых колебаний не выполнимо). Если пересчитать данный критерий в виброскорость на частоте 27,1 Гц (принимая фиксируемые колебания за гармонические), то полученное значение составит 0,88 мм/с. Немецкий DIN 4150-3:2016 [10] (или приложение «Б» отечественного ГОСТ Р 52892-2007 [2]) в данной ситуации рекомендует использовать предельное значение скорости колебаний, равное 5 мм/с, или, в пересчете в ускорения – $0,85 \text{ м/с}^2$ (табл.).

Таблица

Критерии оценки вибрации

Название НТД	Критерий		Фактические значения	
	Из НТД (для исторических зданий)	Пересчитанный (для частоты 27,1 Гц)	Пиковое виброускорение	Пиковая виброскорость
ВСН 490-87 [1] / ТСН 50-302-2004 [7]	150 мм/с ²	0,88 мм/с	65 мм/с ²	1,2 мм/с
DIN 4150-3:2016 [10]	5 мм/с	850 мм/с ²		

Из представленных в табл. значений видно, что в первом случае «подведение» критерия из ВСН (ТСН) под логику DIN приводит к более чем четырехкратному занижению уровня предельной скорости вибрации, а обратная операция, наоборот, – к пятикратному завышению допустимого уровня виброускорения. Исходя из этого, можно сделать вывод, что несмотря на допущения, принятые для данного сравнения (в реальности колебания, возникающие при вибропогружении шпунта, нельзя считать гармоническими в чистом виде), использование в инженерной практике вибромониторинга одного НТД неминуемо приведет к либо недооценке фиксируемых параметров, что весьма существенно при контроле состояния исторических зданий, или наоборот к их переоценке, что повлечет за собой трудности при производстве строительных работ.

Временным решением сложившейся ситуации (поскольку очевидно, что необходимость разработки нового НТД назрела давно) может служить применение автоматизированных виброметрических комплексов, позволяющих осуществлять непрерывную регистрацию колебаний и передачу данных для последующей обработки в режиме реального времени. Современные цифровые программно-аппаратные комплексы позволяют осуществлять интегрирование или дифференцирование поступающего сигнала (в зависимости от типа установленного на объекте оборудования) и, в случае

превышения одного из заданных критериев, передавать соответствующее сообщение в мессенджер ответственным лицам [12].

Список литературы

1. ВСН 490-87 Проектирование и устройство свайных фундаментов и шпунтовых ограждений в условиях реконструкции промышленных предприятий и городской застройки.
2. ГОСТ Р 52892-2007 Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию.
3. Мангушев Р.А., Гурский А.В., Полунин В.М. Оценка динамического воздействия от вибропогружения шпунтовых свай на здания окружающей застройки в условиях слабых водонасыщенных грунтов // *Construction and Geotechnics*. 2020. Т. 11. № 3. С. 102–116.
4. Мониторинг зданий и сооружений при строительстве и эксплуатации / А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин, С.Г. Богов, В.А. Шашкин, М.А. Шашкин. СПб.: Изд-во института «Геореконструкция», 2021. 640 с.
5. Рутман Ю.Л., Островская Н.В. Динамика сооружений: сейсмостойкость, сейсмозащита, ветровые нагрузки. СПб: Изд-во СПбГАСУ, 2019. 253 с.
6. Савин С.Н., Смирнова Е.Э. Совершенствование требований ТСН 50-302-2004 по обеспечению безопасности конструкций зданий при динамических нагрузках в условиях уплотнительной застройки // *Материалы 73-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета СПбГАСУ*. СПб: Изд-во СПбГАСУ, 2017. Ч. II. С. 169–171.
7. ТСН 50-302-2004 Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге.
8. Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Гид по геотехнике. Путеводитель по основаниям, фундаментам и подземным сооружениям. СПб.: Изд-во института «Геореконструкция», 2012. 288 с.
9. Шашкин М.А. Вибродинамический мониторинг здания в режиме реального времени с функцией управления технологией ремонтно-строительных работ // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 12. С. 53–59.
10. DIN 4150-3:2016 Vibrations in buildings – Part 3: Effects on structures.
11. Sakharov I.I., Shashkin M.A., Nizovtsev S.I. Real-time vibration monitoring // *Proceedings of the International Conference on geotechnics fundamentals and applications in construction: new materials, structures, technologies and calculations*, GFAC 2019. London: CRC Press, 2019. P. 301–306. <https://doi.org/10.1201/9780429058882>.
12. Shashkin A.G., Shashkin M.A., Kondratiev S.O., Bakusov P.A. Telemetric vibration measuring complex for monitoring mechanical safety of cultural heritage object: “Russian Renault” // *Reconstruction and restoration of*

architectural heritage. London: CRC Press, 2021. P. 297–302. <https://doi.org/10.1201/9781003136804>.

M.A. Shashkin

Design Institute Georekonstrukciya LLC, Saint Petersburg, mshashkin91@vibromon.ru

DIFFERENCE IN APPROACHES TO ASSESSING THE INFLUENCE OF VIBRODYNAMIC IMPACT ON ARCHITECTURAL MONUMENTS IN RUSSIA AND IN GERMANY

Abstract. The publication deals with the issue of differences in approaches to assessing the influence of vibrodynamic impacts on historical buildings in our country and in Germany. The analysis of the main regulatory documents on this subject is given – domestic VSN 490-87 “Design and construction of pile foundations and sheet piles fences in conditions of reconstruction of industrial enterprises and urban development” and TSN 50-302-2004 “Design of foundations of buildings and structures in Saint Petersburg”, and German DIN 4150-3 “Vibrations in buildings – Part 3: Effects on structures”. Using an example from engineering practice, conceptual differences are demonstrated in the methods of assessing the vibration that occurs when a sheet pile is immersed in difficult engineering-geological conditions.

Key words: dynamic impact; vibrations; vibration monitoring of buildings; vibration regulation; vibration immersion of sheet pile; geotechnical monitoring; vibrometric methods.

Федоренко Е.В.

ООО «НИП-Информатика», г. Санкт-Петербург, eugeniy.fedorenko@nipinfor.ru

ГЕОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВА НАСЫПЕЙ НА СЛАБЫХ ОСНОВАНИЯХ

Аннотация. В публикации рассмотрены основные проблемы расчетного обоснования конструкций насыпей на слабых основаниях. Недостатки нормативного подхода – неучет природного состояния грунтов; трудоемкость методики учета упрочнения при консолидации; практические сложности оценки нестабилизированного состояния. Предложены пути решения указанных проблем, основанные на оценке сопротивления сдвигу в эффективных напряжениях с учетом природного состояния (переуплотнения) и изменения сопротивления сдвигу в процессе консолидации за счет изменения порового давления.

Ключевые слова: плотность-влажность; сопротивление сдвигу; прочность; упрочнение грунтов; нестабилизированное состояние; консолидация.

Введение

Один из основных документов по проектированию насыпей на слабых основаниях – «Пособие по проектированию автомобильных дорог на слабых грунтах» (далее – Пособие) [8] основано на Методических указаниях 1968 г. [7]. Причем в ранней версии [8] область применения распространялась и на железные дороги. Как ни странно, это был единственный методический документ, в котором применительно к насыпям железных дорог было расписана методика расчета консолидации. В действующих нормативных технических документах (НТД) понятие консолидации практически отсутствует. Во многом это связано с практикуемым подходом в проектировании, основанном на типовом проектировании. В большинстве случаев типовые проектные решения позволяют обходиться без расчетного обоснования, что экономит время. Однако совсем обойтись без выполнения геотехнических расчетов не получится. Проблема слабых грунтов встречается довольно часто, хотя для протяженных линейных объектов носит локальный характер, это не уменьшает сложности этой проблемы.

Истоки транспортной геотехники применительно к слабым основаниям во многом основаны на работах И.Е. Евгеньева и В.Д. Казарновского [5], которые в прошлом веке решали основную задачу того времени – обеспечение доступа к нефтегазовым месторождениям Восточной Сибири, преимущественно по торфяным грунтам. Предложенные ими методики расчетов в основном определялись уровнем развития механики грунтов на тот момент и ограничениями в вычислительных мощностях. Таким образом, действующее сегодня Пособие [8] оперирует уже устаревшими методиками расчета, ограниченными, в первую очередь, необходимостью выполнять расчет вручную. Кратко рассмотрены основные допущения и упрощения этого документа.

Природное напряженное состояние

В настоящее время в практике выполнения расчетов насыпей часто встречается расчет осадки на основе модуля деформации. Это весьма простой способ взятия выданного в отчете по результатам проведения инженерно-геологических изысканий модуля и внесения его в программу. Однако такой способ ошибочный. Прежде всего, такие сооружения как насыпи имеют существенно различную высоту, следовательно, и напряжения. Модуль деформации не может быть постоянным даже для прочного грунта в силу его зависимости от действующих напряжений. Да и формулы расчетов осадки как в автодорожных документах, так и в железнодорожных не ориентированы на модуль деформации, а оперируют модулем осадки и коэффициентом пористости, соответственно.

Следует отметить, что в Пособии [8] расчет осадки ведется без учета природного напряженного состояния. По результатам компрессионных испытаний модуль осадки принимается от начала кривой, т.е. с учетом уже реализованных за геологическое время осадок от собственного веса. Это является допущением в запас, иногда существенным. Однако часто встречаются случаи, когда слабые грунты обладают незначительной степенью переуплотнения, это может быть и у илов, и у послеледниковых четвертичных отложений [1]. Наличие переуплотненного состояния изменяет картину развития избыточного порового давления и времени его рассеивания (консолидация). И если величина стабилизированной осадки не имеет существенного значения в дорожном строительстве (компенсируется досыпкой), то время консолидации – это нормативный критерий. «Запасы» в отношении этого результата приводят к нецелесообразным затратам на мероприятия по стабилизации и ускорению времени консолидации. Кроме того, в 2019 г. был введен ГОСТ Р 58326-2018 [4], согласно которому появилась возможность определять параметры природного напряженного состояния.

Сопротивление сдвигу

Особенность линейных сооружений и слабых грунтов слабо отражена в повсеместно используемом для проведения испытаний грунтов ГОСТ 12248.1-2020 [2]. Поэтому был выпущен отраслевой документ ГОСТ Р 54476-2011 [3]. В его основе теория «плотности-влажности», внедренная Н.Н. Масловым [6]. Результатом испытаний по этому документу должны быть графики зависимости сцепления и угла трения от влажности. За десять лет существования этого НТД его использование в проектировании крайне редкое, а в практике автора статьи – невозможное со стороны грунтовых лабораторий. Идея, выдвинутая Н.Н. Масловым [6] заключалась в том, что измерение порового давления в то время и на тех приборах было сложным, а выполнение расчетов с учетом порового давления – затруднительным; предложенное

решение исключало обе проблемы и было основано на учете влияния влажности на сопротивление сдвигу. Но, как показала многолетняя практика, применение этого подхода так и не было реализовано.

Сегодня уровень развития оборудования и программных комплексов позволяет использовать теорию эффективных напряжений К. Терцаги и избежать упрощенного подхода «плотности–влажности».

Основной проблемой является экономическая целесообразность принятых проектных решений, которая часто определяется избыточными перезапасами прочности, скрытыми в разных местах расчетного обоснования. Например, использование прочностных характеристик в нестабилизированном состоянии для всего расчета, в т.ч. и для стадии эксплуатации, когда консолидация уже должна быть завершена. Другая распространенная проблема, с которой приходится сталкиваться сегодня – это уширение существующих дорог и строительство обходов. С позиций геотехники это проблема учета существующего земляного полотна, консолидированного под ним основания и возведения уширения или съезда на слабых, еще не уплотненных грунтах. В обоих случаях требуется учет упрочнения грунтов в процессе консолидации. В Пособии [5] приводится методика учета упрочнения, но она весьма громоздкая, применима только к одной точке пространства и основана на недостижимых на практике зависимостях прочностных характеристик от влажности.

Нестабилизированное состояние

Слабые водонасыщенные глинистые грунты требуют особого подхода при проектировании. Нестабилизированное состояние принято оценивать двумя способами: на основе недренированной прочности C_u (в мировой практике) или на основе параметров начальной прочности $C_{нач}$ и $\phi_{нач}$ (по [8]). Если первый способ считается достаточно консервативным, поскольку не учитывает темп возведения, время строительства и упрочнение грунта, то второй способ не позволяет проконтролировать изменение сопротивления сдвигу в процессе расчета.

Проектно-изыскательские организации транспортного комплекса используют в качестве основного поставщика информации о прочности слабых грунтов испытания в приборе одноплоскостного среза по схеме неконсолидированный (быстрый) сдвиг. Однако в переизданном ГОСТ 12248.1-2020 [2] этот метод испытаний исключен. Можно предположить недоумение всех пользователей указанной методики оценки прочности слабых грунтов таким решением, однако оно вполне логично. Практический пример: насыпь на слабом основании была проанализирована в программе для аналитических расчетов устойчивости PLAXIS LE. Поверхность скольжения задана постоянной и разделена на пять участков в пределах слоя основания (рис. 1):

1. Полевая сторона (только собственный вес). Для каждого отсека проверяется рост сопротивления сдвигу по глубине (проверка правильности ввода данных).

2. Горизонтальный участок (полевая сторона). Проверка постоянства сопротивления сдвигу.

3. Откосная часть. Напряжения изменяются по мере высоты насыпи.

4. Основная площадка насыпи. Напряжения постоянные, но отличаются от участка № 2.

5. Наклонный участок для проверки сопротивления сдвигу по глубине.

На рис. 1 показан пример двух расчетов, выполненных с использованием недренированного сопротивления сдвигу C_u ($K_{уст} = 1,7$) и начальных параметров прочности ($K_{уст} = 3$) $C_{нач}$ и $\phi_{нач}$ (по Пособию [5]).

Рис. 1. Результаты сравнительных расчетов устойчивости

Как следует из графика сопротивления сдвигу по отсекам, вариант расчета с использованием недренированного сопротивления сдвигу дает более консервативную оценку потому, что не позволяет мобилизоваться силам трения, зависящим от действующих напряжений и угла внутреннего трения. Вариант с использованием сопротивления сдвигу в виде сцепления и трения ($C_{нач}$ и $\phi_{нач}$) только на первый взгляд является аналогом. В действительности этот вариант предполагает зависимость сопротивления сдвигу от напряжений, что видно на рис. 2 по подъему соответствующей линии на участке № 3 (координата X от 10 м до 13 м) и высоком значении на участке № 4 (координата X от 13 м до 16 м). Рост сопротивления сдвигу обусловлен задействованием сил

трения, но его сложно контролировать, т.е. оценивать адекватность влияния на устойчивость сооружения.

Предлагаемый подход

С учетом перечисленных основных допущений и упрощений действующей методики предлагается новый подход [11], основанный на достижениях современной мировой геотехники – комплексная методика индивидуального геотехнического проектирования насыпей на слабых грунтах. Методика сформирована на работах А.Б. Фадеева [9, 10] на основе определяющих уравнений упругопластических моделей грунта с учетом теории критической пористости или критического состояния (постоянство объемных деформаций при сдвиге), которая рассматривает это состояние как не зависящее от первоначального. Вводится поверхность в пространстве $(p-q)$ «среднее напряжение–девиатор», ограничивающая все возможные статические равновесные состояния для каждого элемента грунтового массива. Внутри этой поверхности действуют законы упругого деформирования, пластические деформации происходят при движении точки напряженного состояния по поверхности или при изменении положения поверхности вследствие нагружения.

Заключается предлагаемый подход в следующих основных положениях.

1. ***Принцип эффективных напряжений*** для учета упрочнения грунта в процессе консолидации.

Результаты расчетов в виде осадки, времени консолидации и устойчивости определяются на основании расчета эффективных напряжений. Нестабилизированное состояние также может быть оценено в эффективных напряжениях на основании теории К. Терцаги за счет определения избыточного порового давления и смещения круга Мора в сторону предельной огибающей, заданной с эффективными параметрами прочности C' и ϕ' .

2. ***Связь недренированного сопротивления сдвигу*** с эффективными параметрами для возможности оценки нестабилизированного состояния в эффективных напряжениях.

3. ***Влияние степени переуплотнения*** на сопротивление сдвигу и поровое давление для учета влияния природного напряженного состояния на расчет консолидации. Построение эффективных траекторий напряжений с учетом упругопластического поведения обеспечивает разницу в величине избыточного порового давления для упругого (переуплотненного) и упругопластического (нормальноуплотненного) состояния.

4. ***Учет механизма деформационного упрочнения*** для обоснования наличия небольшой степени переуплотнения в слабых грунтах, что важно для расчетов осадки, консолидации и устойчивости. В качестве допущения принят механизм переуплотнения за счет ползучести, основанный на совместном (одновременном) протекании первичной и вторичной консолидации. Для

грунтов в недренированных условиях (затруднена фильтрация) снижение порового давления приводит к росту эффективных напряжений и проявлению ползучести, которая вызывает пластические деформации, т.е. изменение объема, что в свою очередь приводит к незначительному росту избыточного порового давления. Такой рост снижает эффективные напряжения, что снижает скорость ползучести. Комбинация указанных явлений в грунте приводит к незначительному переуплотнению слабых водонасыщенных отложений.

5. Зависимость изменения коэффициента фильтрации от изменений коэффициента пористости в процессе уплотнения для учета снижения проницаемости в расчетах консолидации.

Практическое применение комплексной методики

Принцип оценки надежности возведения земляного полотна на слабом основании заключается в оптимальном выборе величины слоя отсыпки и времени его выдержки с минимальными затратами времени и с обеспечением требуемой устойчивости насыпи и стабильности основания. На рис. 2 показан принцип оценки поэтапной отсыпки земляного полотна на примере возведения насыпи в четыре этапа для точки в основании насыпи по ее оси. Точка 1 соответствует природному напряженному состоянию (в этом примере нормальноуплотненное состояние, $OCR = 1$), она расположена на линии K_0 -консолидации, которая присуща природным грунтовым массивам. После отсыпки первой части насыпи на слабый водонасыщенный глинистый грунт происходит рост избыточного порового давления, что приводит к отклонению эффективной траектории напряжений в левую сторону. Небольшой вес первой части не приводит к достижению траекторией предельной линии (точка 2), а последующая выдержка (консолидация до рассеивания избыточного порового давления) приводит траекторию в точку 3, лежащую на линии K_0 . В том случае, если насыпь будет отсыпана сразу на полную высоту произойдет ее разрушение по причине недостаточной прочности основания (недренированное сопротивление сдвигу для начального нестабилизированного состояния грунта $C_{u1} = q/2$), что показано на рис. 2 пересечением траекторией нагружения линии предельного состояния в точке 10.

Используя принцип поэтапного строительства, после выдержки первого слоя (точка 3) производится отсыпка следующего слоя и его выдержка (точки 4, 5), которая способствует повышению сопротивления сдвигу $C_{u1} < C_{u2}$. Аналогичным образом осуществляется оценка для всех оставшихся слоев (см. рис. 2) с учетом упрочнения грунта: $C_{u1} < C_{u2} < C_{u3} < C_{u4}$. После завершения отсыпки (точка 8) выполняется расчет выдержки земляного полотна до достижения требуемого критерия начала запуска движения (траектория 8-9).

Эта схема предполагает оценку в эффективных напряжениях и эффективной прочности. Преимущества такого варианта заключаются в том,

что эффективные характеристики прочности в меньшей степени подвержены влиянию расструктурирования образцов (их качества).

Рис. 2. Принцип поэтапного строительства

Заключение

Рассмотренные допущения и упрощения действующего НТД по расчетам насыпей на слабых основаниях [8] предлагается устранить за счет использования теоретических принципов современной механики грунтов на основе теории критического состояния (критическая пористость), моделей упругопластического поведения, эффективных напряжений и учета сочетания двух состояний (нормальноуплотненного и переуплотненного) с двумя типами поведения (дренированное и недренированное) в траекториях напряжений.

Такой принцип оценки надежности отсыпки насыпи на слабое основание в виде построения траекторий нагружения позволяет на основе итерационных расчетов выявить оптимальную величину выдержки каждого слоя и его толщину, тем самым обеспечив снижение общего срока строительства при минимизации затрат на мероприятия по стабилизации и усилению. Вариативность подхода обеспечивает разнообразные графики отсыпки, которые могут быть гибко подстроены под требования проекта организации строительства и других подразделений совместного проектирования объекта.

Список литературы

1. Васенин В.А. Исследование сжимаемости глинистых отложений в условиях компрессии для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Геотехника. 2018. Т. X. № 5–6. С. 18–33.

2. ГОСТ 12248.1-2020 Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза.
3. ГОСТ Р 54476-2011 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик сопротивляемости сдвигу грунтов в дорожном строительстве.
4. ГОСТ Р 58326-2018 Грунты. Метод лабораторного определения параметров переуплотнения.
5. Евгенийев И.Е., Казарновский В.Д. Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах. М.: Транспорт, 1976. 271 с.
6. Маслов Н.Н. Условия устойчивости склонов и откосов в гидроэнергетическом строительстве. М., Л.: Госэнергоиздат, 1955. 468 с.
7. Методические указания по проектированию земляного полотна на слабых грунтах. М.: Оргтрансстрой, 1968.
8. Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах. М.: ФДА, 2004. 191 с.
9. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987. 221 с.
10. Фадеев А.Б. Механические свойства геологических сред и их реализация методом конечных элементов // Межвузовский тематический сборник трудов «Возведение и реконструкция фундаментов на слабых грунтах» СПб.: Изд-во СПбИСИ, 1992. С. 13–23.
11. Fedorenko E. Considering the strength soils variability in the consolidation by numerical modeling // Transportation soil engineering in cold regions. Vol. 2. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 50. / A. Petriaev, A. Konon (eds). Singapore: Springer, 2020. P. 147–152. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_15.

E.V. Fedorenko

NIP-Informatica LLC, Saint Petersburg, eugeniy.fedorenko@nipinfor.ru

GEOTECHNICAL SUPPORT FOR THE CONSTRUCTION OF EMBANKMENTS ON SOFT SOIL

Abstract. The paper deals with the main problems of the design of embankment on soft soil. The disadvantages of this approach are the lack of consideration of the natural state of soils; complexity of the method of increasing strength during consolidation; practical difficulties in assessing undrained behavior. The ways of solving these problems are proposed, based on the effective strength taking into account the natural state (over-compaction) and the increase of untrained strength in the consolidation process.

Key words: density-moisture; shear resistance; strength; soil consolidation; undrained behavior.

Мирный А.Ю., Бершов А.В.

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии,
MirnyyAY@mail.ru

ОПЫТ КАЛИБРОВКИ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ НА ОСНОВАНИИ ПРЕССИОМЕТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Аннотация. В работе описан опыт калибровки параметров и верификации расчетной численной модели на основании испытаний радиальным прессиометром. Показаны основные принципы данной процедуры и ее преимущества по сравнению с использованием штамповых испытаний в качестве основания для верификации. В ходе верификации по прессиометрическим испытаниям есть возможность оценки качества моделирования упругой и упруго-пластической работы, а также (косвенно) параметров сопротивления сдвигу, упрочнения и начального напряженного состояния. Предложенная методика может успешно применяться, но требует нормативного обеспечения.

Ключевые слова: верификация; нелинейная модель; численное моделирование; радиальный прессиометр; параметры физико-механических свойств.

В соответствии с требованиями нормативных технических документов (НТД) применение нелинейных моделей поведения грунтов при численном моделировании напряженно-деформированного состояния инженерно-геологических массивов оснований должно сопровождаться верификацией – сопоставлением результатов расчета с фактическими экспериментальными данными. Поскольку большинство современных моделей поведения построена на анализе лабораторных данных, возникает необходимость сопоставления лабораторных и полевых экспериментов по измерению отклика грунтов на механическое воздействие, при приоритете полевых данных. Процедура верификации позволяет перед проведением расчета удостовериться, что выбранная инженерно-геологическая модель и принятые значения параметров отражают поведение инженерно-геологического массива основания с приемлемой точностью. В ходе верификации также могут быть определены подбором те параметры модели, которые в силу различных причин не определялись непосредственно.

Результаты лабораторных испытаний (зависимости деформаций от напряжений при трехосном и компрессионном сжатии) могут применяться для верификации лишь ограниченно: сопоставление с ними результатов расчета позволяет проверить только корректность определения параметров моделей, и при необходимости откорректировать их – выполнить калибровку. Но при моделировании инженерно-геологического массива основания решается краевая задача, в которой результат расчета определяется не только параметрами модели поведения грунтов, но и его исходным природным или природно-техническим напряженным состоянием. Таким образом,

комплексную верификацию модели следует выполнять на основании результатов испытаний прямыми полевыми методами.

Традиционно в качестве такого метода рассматриваются в первую очередь статическое нагружение грунта вертикальной нагрузкой в горных выработках или в массиве штампом. Действительно, испытания плоским штампом воспроизводят задачу деформирования массива основания под вертикально действующей нагрузкой, при этом осадка штампа складывается из объемной и сдвиговой составляющих деформации. В случае, если штамп был доведен «до срыва», в ходе верификации могут быть также проверены и параметры сопротивления сдвигу, принятые для выбранной упруго-пластической модели. Однако выполнение штамповых испытаний обладает рядом ограничений, которые для сооружений с развитой подземной частью значительно сокращают область их применения. В первую очередь к таким ограничениям следует отнести проведение опыта в шурфе или котловане, ведь проведение опыта в скважине, сопоставимой по диаметру с размерами штампа, не позволяет получить выраженные пластические зоны и корректно верифицировать упруго-пластическую модель. Вопросы же возможности проведения винтовых штампов в скважинах требуют отдельного рассмотрения, но по мнению авторов такой вид испытаний вообще должен быть вынесен за рамки действующего государственного стандарта.

Применение в качестве обоснования верификации результатов прессиометрических испытаний представляется не менее, а иногда и более удобным и правильным. Испытания радиальным прессиометром в скважине не имеют существенных ограничений по глубине (в пределах толщи, используемой в качестве оснований сооружений). Испытания проводятся при значительно меньшем нарушении массива, чем штамповые, и при этом при естественном напряженном состоянии. В ходе опыта, выполняемого на любой глубине, может быть получен нелинейный участок кривой, соответствующий упруго-пластическому деформированию. Кроме того, сами испытания могут использоваться не только для определения параметров деформируемости, но и для оценки бытового горизонтального напряжения [1, 2, 7, 8].

Верификация на основании прессиометрических испытаний выполнялась на строящемся объекте третьей геотехнической категории с развитой подземной частью в г. Москве. До глубины 30 м основание сложено преимущественно четвертичными отложениями аллювиального и флювиогляциального генезиса, залегающими невыдержанно, с выклиниваниями и множественными линзами. В общей сложности на площадке было выделено 28 инженерно-геологических элементов (ИГЭ), что не позволяет определить все необходимые характеристики многопараметрических моделей непосредственно – как в связи с техническими ограничениями (невозможность отбора необходимого количества образцов), так и по экономическим причинам.

Строительство осложняется непосредственным примыканием к бровке котлована глубиной 12–15 м исторического кирпичного сооружения, являющегося объектом культурного наследия. В этих обстоятельствах выбор геотехнических решений для обеспечения сохранности окружающей застройки напрямую определяется расчетом влияния, а его качество, в свою очередь – точностью выбора параметров нелинейных моделей.

На площадке были выполнены работы по прессиометрическим испытаниям наиболее представительных ИГЭ, определяющих величину влияния на окружающую застройку. Параллельно на основании имеющихся результатов лабораторных испытаний были определены параметры моделей Hardning Soil и Soft Soil для программного комплекса PLAXIS. Необходимо отметить, что работы по определению параметров выполнялись в условиях крайне ограниченных исходных данных. Инженерно-геологические изыскания различных этапов на площадке выполнялись различными компаниями, и не всегда была возможность сопоставления их результатов. По большей части ИГЭ отсутствовали испытания трехосного или компрессионного сжатия, еще часть была признана недостоверными по результатам сопоставления с контрольными испытаниями.

Верификация производилась путем сопоставления результатов расчета тестовой задачи с экспериментальной кривой. Расчет производился в осесимметричной постановке. На стенку вертикальной выработки ступенями прикладывалась равномерно распределенная нагрузка. В краевых зонах для исключения влияния концентрации касательных напряжений выполнены области линейно-упругого материала. По верхней грани массива грунта прикладывалась вертикальная нагрузка, соответствующая бытовому давлению на глубине выполнения опыта. По нижней грани приложены условия в виде невозможности вертикальных перемещений. По внешней грани ограничены горизонтальные перемещения. Расчетная схема представлена на рис. 1.

Рис. 1. Расчетная схема модели верификации

На рис. 2 показано сопоставление результата первоначального моделирования с экспериментальной кривой. Хорошо видно, что в модели завышается жесткость на этапе упругого сжатия (начальная часть линейного участка экспериментальной кривой) – это корректируется величиной E_{ur}^{ref} в модели Hardening Soil [9, 10]. Величину деформаций на более нелинейном участке можно откорректировать путем изменения параметров объемной, а далее и сдвиговой жесткости, но в данном случае это не требуется, т.к. расхождение наблюдается только при нагрузках > 1 МПа, которые превышают проектные нагрузки.

Для модели Soft Soil [6, 11] аналогичная операция выполняется путем последовательного изменения коэффициента относительного объемного расширения κ^* (участок упругого сжатия) и коэффициента относительного объемного сжатия λ^* (участок первичного уплотнения).

Рис. 2. Сопоставление расчетных кривых с экспериментальной до и после оптимизации

В ходе верификации выявляются также несоответствия параметров сопротивления сдвигу фактическим. На рис. 3 представлено сопоставление экспериментальной и расчетной кривой после оптимизации для модели Hardening Soil. Для песка мелкого плотного по данным лабораторных испытаний получены значения угла внутреннего трения $\varphi = 29^\circ$ и удельного сцепления $c = 8$ кПа. Однако сопоставление расчета с экспериментальными данными показывает, что в расчете переход к упруго-пластическому

деформированию происходит значительно раньше, чем в реальных условиях. Точка выраженного перелома определяется в первую очередь параметрами сопротивления сдвигу. Очевидно, что заниженные значения параметров сопротивления сдвигу, полученные в лабораторных условиях, связаны с некорректными условиями опыта или качеством отобранных образцов. Для песков наиболее вероятным источником ошибки представляется сложность воспроизведения плотности сложения в приборах трехосного сжатия, при значительной неопределенности оценки плотности песков в массиве. Повысить сходимость экспериментальной кривой с расчетом можно было бы путем повышения параметров сопротивления сдвигу, либо угла дилатансии (величина которого для данного ИГЭ по эмпирическим формулам [5] и так очень высока – $\psi = 13,7^\circ$). Тем не менее, для обеспечения запаса надежности параметры сопротивления сдвигу корректировке не подвергались в связи с недостаточной обоснованностью такого решения.

Рис. 3. Результаты определения параметров по серии трехосных испытаний

Реализованная на данном объекте методика верификации параметров нелинейных упругопластических моделей на основании результатов прессиометрических испытаний может с успехом применяться в практике инженерно-геологических изысканий и геотехнического строительства. Тем не менее, для повсеместного внедрения данной методики необходимо ее нормативное обеспечение – в настоящий момент НТД (в первую очередь

СП 22.13330.2016 [3]) предписывают выполнение верификации, но не содержат пояснений по методике ее проведения и, что наиболее важно – процедуре корректировки параметров модели.

В рамках действующих требований, когда ответственность за значения параметров физико-механических свойств полностью возложена на организацию, выполнявшую инженерно-геологические изыскания, а методика выполнения верификации отсутствует, применение данной процедуры сильно ограничено. При этом проектная организация изменять значения нормативных и расчетных показателей не имеет права. Таким образом сложилась неоднозначная ситуация, требующая срочной корректировки норм – СП 22.13330 [3] и СП 47.13330.2016 [4] одновременно. Между тем, верификация – это не только инструмент повышения точности численного расчета, но и способ выявления недостоверных исходных данных, при условии выполнения полевых испытаний квалифицированным исполнителем.

Список литературы

1. Бершов А.В. Прессиометрические и штамповые испытания лондонской глины. Часть 1 // Независимый электронный журнал «Геоинфо». 2021. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.geoinfo.ru/products-pdf/pressiometricheskie-i-shtampovye-ispytaniya-londonskoj-gliny-chast-1-sravnenie-metodov-analiza.pdf> (дата обращения: 15.11.2021).
2. Бершов А.В. Прессиометрические и штамповые испытания лондонской глины. Часть 2. // Независимый электронный журнал «Геоинфо». 2021. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.geoinfo.ru/products-pdf/pressiometricheskie-i-shtampovye-ispytaniya-londonskoj-gliny-chast-2-sravnenie-rezultatov.pdf> (дата обращения: 15.11.2021).
3. СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*» с изменениями № 2 от 24.01.2019.
4. СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96*».
5. Bolton M.D. The strength and dilatancy of sands // *Geotechnique*. 1986. No. 1(36). P. 65–78.
6. Brinkgreve R.B.J. Geomaterial models and numerical analysis of softening: PhD Thesis. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, 1994. 169 p.
7. Mair R.J., Wood D.M. Pressuremeter devices and test procedures. London: Elsevier, 1987. P. 3–27. <https://doi.org/10.1016/B978-0-408-02434-1.50006-4>.
8. Marsland A., Randolph M.F. Comparisons of the results from pressuremetre STS and large in situ plate tests in London Clay // *Geotechnique*. 1977. No. 2(27). P. 217–243.
9. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. The hardening soil model: formulation and verification. Rotterdam: Balkema, 1999. P. 1–16.

10. Vermeer P.A., De Borst R. Non-associated plasticity for soils, concrete and rock. Delft, The Netherlands: Heron, 1984. Vol. 29. No. 3. P. 3–64.
11. Vermeer P.A., Neher H.P. A soft soil model that accounts for creep. Rotterdam: Balkema, 1999. P. 249–261.

A.Yu. Mirnyy, A.V. Bershov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, MirnyyAY@mail.ru

EXPERIENCE OF NONLINEAR NUMERICAL MODEL PARAMETERS CALIBRATION BASED ON PRESSIOMETER TESTS

Abstract. The paper describes the experience of numerical model parameters calibration based on tests with a radial pressiometer. The basic principles of this procedure and its advantages in comparison with the use of stamp tests as a basis for verification are shown. During verification by pressiometer tests, it is possible to evaluate the quality of modeling elastic and elastoplastic behaviour, as well as (indirectly) the parameters of shear resistance, hardening and initial stress state. The proposed methodology can be successfully applied, but requires regulatory support.

Key words: verification; nonlinear model; numerical simulation; radial pressiometer; parameters of physical and mechanical properties.

СЕКЦИЯ «ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ НА ШЕЛЬФЕ»

Локтев А.С.

ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова», г. Москва, andreiloktev@mail.ru

РАЗРАБОТКА ГОСТ Р «МОРСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРУНТОВ»

Аннотация. Новый стандарт разрабатывается для инженерных изысканий под объекты нефтегазовой инфраструктуры на шельфе. Основой для него послужил международный стандарт ISO 19901-8:2014 Petroleum and natural gas industries – Specific requirements for offshore structures – Part 8: Marine soil investigations. Национальный ГОСТ будет являться ведомственным нормативом, содержащим требования и правила выполнения различных видов геотехнических работ в составе инженерных изысканий. В отечественной практике данные виды исследований практически не регламентируются или подразумевают значительное использование международного опыта. Новый российский стандарт будет содержать описание и положения по подготовке, организации, выполнению и обработке материалов данных инженерно-геологического бурения и пробоотбора, полевых испытаний грунтов (*in situ*), лабораторных исследований грунтов шельфа; а также по форме и предоставлению результатов геотехнических исследований.

Ключевые слова: шельф; геотехнические исследования; грунт; испытания «в массиве»; статическое зондирование; пробоотбор; инженерно-геологическое бурение.

ГОСТ Р «Морские исследования грунтов» (далее – ГОСТ Р) разрабатывается в соответствии с Программой национальной стандартизации на 2020 г. (ПНС-2020) Технического комитета по стандартизации ТК 023 «Нефтяная и газовая промышленность» подкомитета «Морская нефтегазодобыча». Шифр темы – ПНС-1.2.023-1.232.19. Разработчиком стандарта является МГУ имени М.В. Ломоносова, заказчиком – ООО «ЛУКОЙЛ – Нижневолжскнефть».

Проект стандарта прошел публичные обсуждения и согласование в ТК 023 для передачи его в Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии для подготовки окончательной редакции. Плановый срок выхода норматива – 2022 г. При подготовке национального стандарта было получено и обработано 286 замечаний и предложений от различных организаций, выполняющих изыскания, проектирование и строительство нефтегазовых сооружений на континентальном шельфе.

Работа выполнялась с соблюдением требований и нормативов, регламентирующих деятельность в области стандартизации, включая ГОСТ Р 1.0-2012, ГОСТ Р 1.2-2020, ГОСТ Р 1.5-2012, ГОСТ Р 1.7-2014, ГОСТ 1.12-2020 и др. [2, 6–9].

ГОСТ Р разрабатывался на основе перевода международного стандарта ИСО 19901-8:2014 «Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения нефтегазопромысловые морские. Исследования морского грунта» (ISO 19901-

8:2014 Petroleum and natural gas industries – Specific requirements for offshore structures. Part 8: Marine soil investigations) [16].

Норматив является неэквивалентным стандарту ИСО 19901-8:2014 [16], т.к. содержит многочисленные технические отклонения и различия по форме представления [1, 9]. Проект национального стандарта учитывает специфику системы технического регулирования в РФ в области строительства, в т.ч. на континентальном шельфе, практический опыт инженерных изысканий на шельфе, применявшиеся и используемые нормативные технические и методические документы в области изысканий для морских нефтегазовых сооружений. Структура и содержание стандарта максимально сохранены относительно ИСО 19901-8:2014 [16]. В части наличия отечественных требований и регулирующих документов внесены соответствующие корректировки и изменения. Проект стандарта содержит ссылки на отечественные нормативные акты, а также на международные стандарты (ISO – Международной организации по стандартизации, ASTM – Американского общества по тестированию и материалам, BS – Британские стандарты, EN – Европейские стандарты), где это применимо. В частности, проект национального стандарта включает ссылки на ASTM, BS, ISO для определения требований при выполнении лабораторных исследований; на ISO, EN – в области полевых исследований грунтов; т.к. отечественные регламентирующие документы содержат такие требования и рекомендации частично или не содержат вообще.

Проект стандарта также учитывает национальную специфику выполнения инженерно-геологических изысканий, документооборот, требования в области получения различных разрешений, хранения и передачи данных и материалов; отечественную систему классификации грунтов [5]. Проект стандарта содержит информацию и требования в части инженерно-геологических изысканий, относящихся к инвазивным методам исследований грунтов (инженерно-геологическое бурение, пробоотбор, испытания грунтов «в массиве» – *in situ*, лабораторные исследования) [10–12]. Геофизические, не инвазивные, методы исследований не включены в проект настоящего стандарта по аналогии с ИСО 19901-8:2014 [16] и могут быть стандартизованы отдельным нормативом, по аналогии с ИСО 19901-10:2021 (ISO 19901-10:2021 Petroleum and natural gas industries – Specific requirements for offshore structures – Part 10: Marine geophysical investigations) [15], который еще не завершен.

Система инженерно-геологических изысканий в РФ имеет определенную специфику и отличия от международной практики, и стандартов. В частности, национальная система классификации грунтов имеет генетическую основу и регламентируется ГОСТ 25100-2020 [5] (обязателен к применению в РФ, согласно [14]). Отечественная классификация не эквивалентна разнообразным зарубежным системам, используемым в ИСО 19901-8:2014 [16]. Определение ряда классификационных параметров производится на отличной физической базе, иными приборами и технологиями и поэтому не имеет прямого перевода

– точных аналогов, т.е. они не могут быть просто или механически «преобразованы». Это накладывает отпечаток и на возможность использования стандартов в области лабораторных исследований свойств грунтов (или их части).

Национальная практика также требует проведения конкретных видов и объемов работ при инженерно-геологических изысканиях [10–13]) при полной независимости от заказчика. В отличие от этого подхода ИСО 19901-8:2014 [16] в соответствии с западной практикой подразумевается определение видов и объемов изысканий именно заказчиком при возможности им же корректировать такие объемы (при необходимости).

В российской практике используются иные технологии и оборудование при выполнении геотехнических исследований на шельфе, иные требования к ним, в отличие от ряда положений ИСО 19901-8:2014 [16] в области выполнения геотехнических работ и требований к ним (российские положения часто менее требовательны, чем западные, в силу естественных причин и имеющейся в наличии техники, и оборудования; в силу чего такие требования могут быть просто невыполнимыми).

Разработчиком было также внесено изменение в наименование национального стандарта относительно наименования по ПНС-2020 (п. 5.2.1.3 ГОСТ Р 1.2-2020) [7]. В последней был использован прямой перевод ISO 19901-8 с английского языка «Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения нефтегазопромысловые морские. Исследования морского грунта» на «Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения нефтегазопромысловые морские. Морские исследования грунтов». Предлагаемое наименование ГОСТ Р имеет формально незначительное изменение: «Морские исследования грунтов», вместо «Исследование морского грунта». Перевод может быть и такой, т.к. оба существительных (marine soil), стоящих перед главным существительным (investigations), по сути, являются прилагательными. Для западной практики (и ИСО 19901-8:2014 [16], в частности) нет принципиальной разницы в таком обороте речи. В отечественной же практике, как указывалось выше, классификация грунтов и вообще понятие инженерной геологии основаны на генетическом подходе.

При дословном следовании варианту названия проекта стандарта как «исследование морского грунта», подразумевается исследование только грунта (грунтов), имеющего морской генезис. А это некорректно для отечественной практики. В западной практике подход не генетический и важны физико-механические и иные свойства грунтов при построении грунтовой модели, когда генезис может даже и не определяться. ГОСТ 20522-2012 [4] (обязательный) разделяет выделяемые по результатам инженерных изысканий инженерно-геологические элементы с учетом их генезиса (что отражается в самом названии), при разработке модели грунтовой толщи [4]. Т.е. выполняются исследования, изыскания различных по генезису грунтов (не только морских), т.к. в море, а особенно на шельфе, морские отложения не

единственные, и даже не самые распространенные. Морские условия осадконакопления установились в период последней трансгрессии, когда море покрыло часть континентальной равнины, и образовался континентальный шельф. До этого (более 20 тыс. лет назад) эта территория являлась сушей и на ней накапливались терригенные отложения. Хотя в более ранние периоды существовали и морские условия, т.е. процесс изменчивый и генезис отложений разнообразный. Поэтому простая перемена местами прилагательных в названии проекта стандарта имеет существенный генетический смысл и точнее соответствует отечественной практике и инженерно-геологической философии.

Новый ГОСТ включает следующие основные разделы:

- цели, планирование и состав геотехнических исследований;
- используемое оборудование;
- инженерно-геологическое бурение;
- испытания грунтов «в массиве»;
- пробоотбор;
- лабораторные исследования;
- отчет.

Эффективность выполняемых инженерно-геологических изысканий, включая геотехнические виды исследований, определяется правильной подготовкой и планированием работ, особенно в сложных природно-климатических условиях шельфа. Выбор необходимого и пригодного оборудования и судов (носителей) также оказывает существенное влияние на полноту, пригодность получаемых результатов и, как следствие, на их достоверность. Для выбора технических средств выполнения геотехнических работ необходимо понимание всеми сторонами процесса (заказчик, проектировщик, изыскатель) конкретных целей и задач. В конечном итоге должна быть получена реалистичная модель природной среды (грунтовой толщи) с набором необходимых и достаточных параметров, достоверно ее характеризующих. В морских условиях и при работе в удаленных районах (переходы могут составлять месяц и более) необходимо иметь широкий комплекс приборов и оборудования (иногда двойной на случай поломки и ремонта), подобранный именно под конкретные цели и задачи исследований. В правильную организацию даже входит подбор квалифицированных и необходимых специалистов, включая судовой и медицинский персонал, т.к. количество мест на судне ограничено и наличие «туристов» усложняет работу.

Выбор судна или иного носителя (пonton, баржа, платформа, неспециализированное плавсредство и пр.) определяется требованиями проекта (задания, спецификациями) и должен выполняться сторонами (заказчиком и изыскателем) с полным пониманием задач, возможности их выполнения, пригодности и ограниченности технических средств. Например, при соблазне использования недорогих понтонов или барж для геотехнических исследований в мелководной части шельфа следует понимать, что они требуют сопутствующую дополнительную инфраструктуру (судно сопровождения,

носитель для жизнеобеспечения и проживания и пр.). При этом они могут иметь существенные ограничения выполнения различных работ (бурение, испытания «в массиве»); например, из-за необходимости удержания носителя в точке проходки скважины, создания достаточной нагрузки на забой, при проходке скважины или выполнении СРТ (cone penetration test), отсутствии палубного и подсобного пространства, автономности, подверженности вертикальной качке и пр. Недооценка таких параметров и ограничений может привести к невыполнению запланированных работ, глубинности, целей и, как следствие, получению недостаточных и недостоверных данных или необходимости повторных работ, увеличению затрат и пр.

Объем работ в отечественной практике регламентируется нормативными документами. Соответствующая информация содержится и в новом стандарте применительно к морским нефтегазовым сооружениям. Вместе с тем, следует понимать, что любое морское сооружение по-своему уникально, т.е. может потребовать дополнительных видов или объемов исследований, например, для оценки различных геологических опасностей. А унифицировать такие задачи и требования не представляется логичным и возможным. Поэтому следует правильно определять (оценивать) степень сложности природных условий, инженерно-геологических условий района изысканий и задавать необходимые виды и объемы работ (не минимальные или «соответствующие бюджету проекта») и позволяющие детально охарактеризовать изучаемую среду. И это должно быть четко понятно как заказчику, так и изыскателю.

Геотехнические исследования связаны с выполнением различных претензионных измерений. Следует четко понимать, выполнять и отражать соответствующую информацию о таких работах в составе изысканий. ГОСТ Р содержит требования к определению класса точности, принятом на проекте. В частности, важнейшим фактором является точное определение глубины (моря, кровли или подошвы пласта). Объективная практика подразумевает максимально приемлемую для шельфа погрешность вертикальных измерений 10 см. В то время, как «стандартный» класс соответствует погрешности 2,0 м (табл.).

Таблица

Классы точности измерения глубины относительно поверхности морского дна

Класс точности	Допустимая погрешность измерения, м
Z1	0,1
Z2	0,5
Z3	1,0
Z4	2,0
Z5	> 2,0

В стандарте содержатся требования по определению вертикальных измерений в т.ч. вдоль ствола скважины (иной выработки) в ходе инженерно-

геологических изысканий, информация о возможных отклонениях и способах решения таких проблем. Необходима объективная оценка точности измерений и самих получаемых результатов, т.к. при глубинах моря более 100 м простое искривление бурильной колонны или колонны испытательных штанг может дать ошибку в измерениях, соизмеримую с мощностью изучаемых геологических тел, слоев.

Погрешность измерений также важна и определяется требованиями к полевым испытаниям и лабораторным исследованиям грунтов. Если лабораторные испытания регламентируются многочисленными нормативами, то испытания «в массиве» на шельфе не имеют таковых регламентов. Чаще всего используются внутренние процедуры или международные стандарты. В любом случае требования к процедурам испытаний, получаемым и рассчитываемым параметрам должны быть четко определены и понятны. Например, в отечественной практике статическое зондирование выполняется с использованием обычных, «стандартных» зондов. Под «стандартным» следует понимать ссылку на ГОСТ 19912-2012 [3] (испытание грунтов статическим и динамическим зондированием). Однако, данный ГОСТ не регламентирует использование датчика порового давления, а для водонасыщенных грунтов шельфа соответствующая погрешность неучета порового давления может быть соизмеримой с определяемой величиной удельного сопротивления конуса (лобового сопротивления). Поэтому результат может оказаться просто «ничтожным».

Также широкая практика использования одного типа зондов для разных типов разрезов (слабые или слоистые грунты, плотные, глинистые или песчаные и пр.). Новый ГОСТ вводит требования к применимости различных зондов, датчиков и диапазону измеряемых параметров в зависимости от типа грунтовой толщи. Норматив регламентирует набор и форму предоставляемых данных геотехнических исследований. Часто это необходимо для оценки достоверности результатов (например, при сопоставлении разных данных). Такие же требования устанавливаются помимо СРТ и к другим типам зондирования.

Важной составляющей достоверности данных является пригодность образцов. Необходимо не просто отобрать пробу, но сделать это с минимальной нарушенностью образца, его состоянием, составом. ГОСТ Р содержит информацию о применимых видах отбора проб и образцов из различных грунтов, требования к извлечению керна, его нарушенности, сохранности.

ГОСТ Р включает требования и информацию, в т.ч. ссылки на дополнительные источники информации по проведению как полевых, так и лабораторных испытаний грунтов.

В приложениях ГОСТ Р содержится информация о полном наборе проектных документов, схеме и взаимодействии сторон проекта; а также различные детализирующие сведения о различных видах геотехнических исследований и процедурах их выполнения.

Стандарт подготовлен с учетом действующих нормативных актов в РФ и дополняет их в части требований к ведению инженерных изысканий на шельфе для морских нефтегазовых сооружений. Часть информации отсутствует в отечественных сводах правил в области инженерно-геологических изысканий и может быть применена и к другим видам сооружений, т.е. не ограничивается только нефтегазовой отраслью.

Список литературы

1. ГОСТ 1.1-2002 Межгосударственная система стандартизации. Термины и определения.
2. ГОСТ 1.12-2020 Стандартизация в Российской Федерации. Термины и определения.
3. ГОСТ 19912-2012 Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием.
4. ГОСТ 20522-2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний.
5. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация.
6. ГОСТ Р 1.0-2012 Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения.
7. ГОСТ Р 1.2-2020 Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила разработки, утверждения, обновления, внесения поправок и отмены.
8. ГОСТ Р 1.5-2012 Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные. Правила построения, изложения, оформления и обозначения.
9. ГОСТ Р 1.7-2014 Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные. Правила оформления и обозначения при разработке на основе применения международных стандартов.
10. СП 11-114-2004 Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазовых сооружений.
11. СП 446.1325800.2019 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.
12. СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96*».
13. СП 504.1325800.2021 Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе.
14. Федеральный закон № 384-ФЗ от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».
15. ISO 19901-10:2021 Petroleum and natural gas industries – Specific requirements for offshore structures – Part 10: Marine geophysical investigations.

16. ISO 19901-8:2014 Petroleum and natural gas industries – Specific requirements for offshore structures – Part 8: Marine soil investigations.

A.S. Loktev

Lomonosov Moscow State University Marine Research Center LLC, Moscow, andreiloktev@mail.ru

DEVELOPMENT OF THE RUSSIAN STANDARD GOST R “MARINE SOIL INVESTIGATIONS”

Abstract. The new standard is developed for offshore oil and gas industry constructions engineering surveys. It is based on the international standard ISO 19901-8:2014 Petroleum and natural gas industries – Specific requirements for offshore structures – Part 8: Marine soil investigations. The national normative will cover the industry requirements and regulations for implement of various geotechnical investigation within engineering-geological survey. Most of them are not covered and not regulated by normatives and refer to sufficient international practice. The new national standard contains information and description of the offshore survey organization, preparation, implementation, and data processing of sampling, drilling, in situ testing, and lab testing. The document provides also requirements on the form and format of geotechnical investigation results.

Key words: shelf; geotechnical investigation; soil; in situ testing; cone penetration testing; sampling; engineering-geological drilling.

Пронин И.С.¹, Потемка А.К.¹, Бирюков Е.А.¹, Токарев М.Ю.²

¹ООО «Сплит», г. Москва, info@split-k.com

²МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, г. Москва

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В НОВОМ СВОДЕ ПРАВИЛ ПО ИНЖЕНЕРНЫМ ИЗЫСКАНИЯМ НА КОНТИНЕНТАЛЬНОМ ШЕЛЬФЕ

Аннотация. Для решения задач выявления и идентификации опасных геологических процессов и изучения верхней части разреза на шельфе геофизические методы, прежде всего сейсмические, являются основными. Разнообразие методических подходов, программно-аппаратных решений на рынке при отсутствии единой нормативно-правовой базы затрудняют применение эффективных и современных подходов при инженерных изысканиях. В ходе разработки СП 504.1325800.2021 «Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования» сейсмические и сейсмоакустические методы были систематизированы с учетом гибкости в возможном наборе методов и модификаций с учетом решаемых задач, в т.ч. задач выявления и идентификации опасных геологических процессов, стадийности исследований, природными условиями, сложностью инженерно-геологических условий и пр.

Ключевые слова: сейсмоакустика; инженерные изыскания; морская сейсморазведка; геологические опасности.

Современное состояние и потребности рынка морских инженерных изысканий определяются увеличением информативности получаемых результатов исследований (разрешающей способности, полноты, комплексированности) при повышении эффективности применения методов и технологий съемки. Именно это позволяет достичь инвестиционных показателей проекта разведки, обустройства, эксплуатации месторождения за счет сокращения общих сроков и повышении эффективности на каждом этапе и стоимости при увеличении достоверности прогнозных оценок для принятия обоснованных проектных решений.

Указанные выше потребности индустрии обеспечиваются активным развитием технических средств геофизических наблюдений, разнообразием методических вариантов и их комплексированием. Темпы освоения шельфовых месторождений, стоимость ведения хозяйственной деятельности в пределах лицензионных участков для нефтегазовых компаний связаны с необходимостью учета сложных инженерно-геологических, гидрометеорологических, навигационных условий, что также стимулирует техническое и технологическое развитие средств и методов геофизических исследований на акваториях.

Таким образом, стоимость реализации проектов бурения или освоения месторождений, а также достоверная оценка возможных рисков для нефтегазовых компаний, осуществляющих хозяйственную деятельность на шельфе, в рамках реализации инвестиционных проектов являются

приоритетными и связаны в т.ч. с детальным изучением верхней части геологического разреза и выявлением опасных геологических процессов и явлений (ОГПиЯ).

Для решения задач выявления и идентификации ОГПиЯ и изучения верхней части разреза на шельфе геофизические методы, прежде всего сейсмические, являются основными. При этом, как было сказано выше, разнообразие методических подходов и программно-аппаратных решений на рынке при отсутствии единой нормативно-правовой базы (или при наличии устаревших регламентов, что еще хуже) затрудняют применение эффективных и современных подходов для решения указанных задач при инженерных изысканиях. Более того, отсутствие четких регламентов позволяет исполнителям предлагать решения, исходя из своего опыта, имеющейся материально-технической базы, что в итоге формирует далеко не всегда эффективное предложение.

Если говорить о нормативных документах, используемых в современной практике инженерных изысканий на континентальном шельфе, то до недавнего времени фактически единственным таким документом был СП 11-114-2004 [1]. Этот норматив имеет известные ограничения, а именно – ограниченную континентальным шельфом область применения, а также не распространяется на морские трубопроводы и гидротехнические сооружения. С декабря 2019 г. введен в действие СП 446.1325800.2019 [2]. Норматив определяет общие требования к производству инженерно-геологических изысканий, в т.ч. на шельфе. Этот свод правил содержит многочисленные ссылки на особые условия шельфа и необходимость дополнительных требований к видам и объемам работ. В двух указанных выше нормативных документах приведены технические характеристики геофизических методов, в частности в СП 11-114-2004 [1] – только варианты метода непрерывного сейсмического профилирования, а в СП 446.1325800.2019 (нормативе более высокого уровня) – более широкий набор модификаций сейсмических и сейсмоакустических методов, требующих детализации в нормативе уровнем ниже. Различные классификации сейсмических и сейсмоакустических методов нашли отражение и в зарубежных нормативных документах и различных стандартах как, например, классификация ISO 19901-10:2021 [6].

Таким образом, давно назрела необходимость актуализации, систематизации и детализации подходов, регламентирующих проведение инженерно-геофизических исследований при инженерных изысканиях на акваториях, что было реализовано при разработке СП 504.1325800.2021 [4]. Данный норматив утвержден в текущем 2021 г. и вводится в действие с января 2022 г. Подход предполагает гибкость в возможном наборе методов и модификаций с учетом решаемых задач, в т.ч. задач выявления и идентификации ОГПиЯ, стадийности исследований, природных условий, сложности инженерно-геологических условий и пр.

Сейсмические методы в различных модификациях и частотных диапазонах являются основными при геофизических исследованиях и выполняются на всех этапах градостроительной деятельности. Выбор методов, как правило, учитывает требования к следующим параметрам: детальность исследований, разрешающая способность, глубинность. Последняя определяется исходя из предполагаемого взаимодействия с грунтами и средой основания фундамента инженерного сооружения.

Безусловно, определяющим для выбора комплекса сейсмических методов является целевой интервал глубин исследования, в свою очередь напрямую зависящий от типа деятельности или проектируемого сооружения. Для изучения верхней части разреза до глубин 5–10 м, что в целом отвечает требованиям задач исследования территории и выявления приповерхностных ОГПиЯ (локальные неоднородности дна, литологические разности донных отложений, выход скальных грунтов, зоны разгрузки флюидов и пр.) под проектирование и строительство трубопроводов, участков раскладки якорей и иных, применяются комплексы методов в составе: гидроакустические – с использованием гидролокации бокового обзора, многолучевого эхолотирования; акустическое профилирование; сейсмоакустические в высокочастотных модификациях – сейсморазведка ультравысокого разрешения, высокочастотное непрерывное сейсмоакустическое профилирование. Для изучения инженерно-геологического строения грунтовой толщи до десятков метров (10–100 м) и выявления малоглубинных ОГПиЯ, таких как свободный газ в придонном слое, разрывные нарушения, палеоврезы, газонасыщенные грунты, в качестве основных следует применять сейсмоакустические методы в низкочастотных модификациях (сейсморазведка высокого разрешения, сейсморазведка сверхвысокого разрешения), низкочастотное непрерывное сейсмоакустическое профилирование. Данный диапазон глубин по грунту, как правило, соответствует группе задач исследований для проектирования строительства таких сооружений, как буровые и стационарные платформы, подводные добычные комплексы, причальные сооружения. Для выявления глубинных ОГПиЯ (тектонические нарушения, газовые гидраты, зоны вертикальной миграции флюида, зона повышенного пластового давления и пр.) и изучения грунтового массива на глубину до 1 км при решении задач геофизического обеспечения проходки глубоких скважин (поисково-оценочных, эксплуатационных) применяют более низкочастотные сейсмические методы, такие как сейсморазведка сверхвысокого разрешения в совокупности с данными стандартной 2D/3D-сейсморазведки после специальной обработки [3].

Немаловажным, а зачастую и определяющим эффективность комплекса сейсмических методов фактором являются природные условия района работ: глубины моря, гидрометеорологическая и навигационная обстановка, ледовые условия, ограниченный период выполнения работ. По глубине моря выделяют следующие условные зоны: предельного мелководья (менее 10 м), мелководная

зона шельфа (10–100 м) и глубоководная зона шельфа (более 100 м). Деление основано на специфике применения аппаратных комплексов и технологий проведения геофизических работ на соответствующих глубинах. Каждому интервалу глубин моря в зависимости от задач соответствует свой набор основных и вспомогательных методов. Так, например, в зоне предельного мелководья (до 10 м) работы ведутся с маломерных плавсредств, сейсмические исследования в основном выполняются с донными системами. Мелководные районы (10–100 м) позволяют наиболее широко применять и комплексировать различные сейсмические методы. В данном диапазоне глубин эффективно могут применяться как приповерхностные наблюдения, так и с заглубленными системами. При этом следует отметить, что в настоящий момент широко применяются разночастотные сейсмоакустические комплексы (~ 250, ~ 500 и ~ 1000 Гц), работающие одновременно в один проход судна совместно с гидроакустическими методами (многолучевым эхолотированием, акустическим профилированием, гидролокацией бокового обзора) [5, 7]. В глубоководной части шельфа (более 100 м) наиболее эффективно применение заглубленных систем и наблюдения в 10–20 м над дном, а на глубинах более 250 м коммерчески целесообразно применение автономного и телеуправляемого необитаемых подводных аппаратов для детальных исследований, т.к. производительность по сравнению с буксируемыми комплексами с увеличением глубины моря может возрастать кратно.

Уровень современного развития технологий, в частности многоканальных 2D/3D-систем, комплексирование различных методов позволяет решать инженерные задачи на новом уровне. Выполнение геофизических исследований на ранних стадиях освоения месторождений и при геологоразведочных работах, а также анализ данных 2D/3D-сейсморазведки с целью изучения верхней части разреза позволяет сократить цикл проектно-изыскательских работ за счет выявления геологических опасностей в пределах лицензионных участков. Комплексный анализ такого массива данных позволяет значительно повысить достоверность результатов для обоснования принятия решений, что в свою очередь обеспечивает экономический эффект для инвестора. Широкий набор сейсмических методов как инструмента решения инженерных задач теперь классифицирован в СП 504.1325800.2021 [4] и уже позволяет исполнителям предлагать правильный, эффективный в каждом отдельном случае набор методов и технологий наблюдений.

Список литературы

1. СП 11-114-2004 Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений.
2. СП 446.1325800.2019 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.

3. СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96*».
4. СП 504.1325800.2021 Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования.
5. Amplilov Y.P., Terekhina Y.E., Tokarev M. Yu. Applied aspects of different frequency bands of seismic and water acoustic investigation on the shelf // Izvestiya, Atmospheric and Ocean Physics. 2019. Vol. 55. P. 705–720. <https://doi.org/10.1134/S0001433819070028>.
6. ISO 19901-10:2021 Petroleum and natural gas industries – Specific requirements for offshore structures – Part 10: Marine geophysical investigations.
7. Simultaneous two-level seismic observations in ultra-high-, very-high- and high-frequency regimes for quantitative evaluation of near-surface geohazards / A. Pirogova, M. Tokarev, R. Isaenkov, Y. Terekhina, A. Kolyubakin // SEG Global Meeting abstracts. Al Ain, United Arab Emirates: SEG, 2017. P. 284–287. <https://doi.org/10.1190/iceg2017-051>.

I.S. Pronin¹, A.K. Potemka¹, E.A. Biryukov¹, M.Yu. Tokarev²

¹SPLIT LLC, Moscow, info@split-k.com

²Lomonosov Moscow State University, Moscow

SEISMIC SURVEY IN THE NEW CODE OF PRACTICE FOR ENGINEERING SURVEYS ON THE CONTINENTAL SHELF

Abstract. Geophysical methods, primarily seismic, are the main ones for geohazard assessment and identification and studying the upper part of the section on the shelf. A variety of methodological approaches, software, and hardware solutions on the market in the absence of a unified regulatory system make it difficult to apply effective and modern approaches to solving problems of identifying hazardous processes during engineering surveys. When developing SP 504.1325800.2021 “Engineering surveys for construction on the continental shelf. General requirements”, seismic and seismoacoustic methods were systematized taking into account the flexibility in a possible set of methods and modifications, taking into account the tasks to be solved, including the problems of searching and identifying of geohazards, research stages, natural conditions, the complexity of engineering-geological conditions, etc.

Key words: seismoacoustic methods; engineering survey; marine seismic; geological hazards.

Рокос С.И., Куликов С.Н.

АО «Арктические морские инженерно-геологические экспедиции», г. Мурманск, amige@rusgeology.ru

НОВЫЙ АСПЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ШЕЛЬФЕ – ОЦЕНКА ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ СТРОИТЕЛЬСТВА МОРСКИХ НЕФТЕГАЗОВЫХ СКВАЖИН С ПОМОЩЬЮ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Аннотация. В последнее время заказчики изысканий для постановки буровых платформ требуют проводить также и оценку условий крепления и бурения нефтегазовых скважин в верхней части разреза по материалам инженерно-геологических работ. В публикации сформулированы цель и задачи таких исследований, разработан перечень подлежащих выявлению геологических рисков, а также методов и критериев их выявления и оценки. Рассмотрены виды изыскательских работ, по материалам которых будут решаться поставленные задачи. Рекомендованы дополнительные (по отношению к инженерно-геологическим) методы исследований, которые поспособствуют получению более полных данных. Предложено разработать нормативный документ, регламентирующий проведение исследований горно-геологических условий инженерно-геологическими методами.

Ключевые слова: шельф; верхняя часть разреза; инженерно-геологические изыскания; горно-геологические условия; геологические риски; нефтегазовое бурение.

Введение

В основном инженерно-геологические изыскания для морских буровых платформ направлены на оценку, в первую очередь, пенетрации опорных колонн самоподъемных буровых установок, держащей силы якорей стабилизации полупогружных установок, осадки фундаментов стационарных гравитационных платформ и т.п. Кроме того выявляются и оцениваются факторы, влияющие на устойчивость грунтового основания: многолетнемерзлые породы, подземные воды, а также опасные геологические процессы (размывы, склоновые смещения, сейсмичность и пр.). Однако в последнее время заказчики работ требуют оценивать в ходе инженерно-геологических изысканий горно-геологические и горнотехнические условия крепления нефтегазовых скважин и бурения в верхней части разреза. Таким образом, необходимо проводить изучение и оценку горно-геологических и горно-технических условий по материалам инженерно-геологических изысканий.

Цели и задачи

Основной целью изучения горно-геологических условий верхних интервалов осадочного разреза является обеспечение геологическими данными проектирования и строительства нефтегазовых скважин.

Основные задачи:

- изучение строения, состава и физико-механических свойств отложений верхней части осадочного разреза;
- выявление и оценка геологических рисков, которые могут привести к осложнениям и авариям при креплении и бурении скважин в верхних интервалах осадочной толщи.

Инженерно-геологические и горно-геологические условия

В целом категории «инженерно-геологические условия», исследуемые собственно при изысканиях, и «горно-геологические условия» весьма близки по своему смысловому значению. Согласно СП 11-114-2004 [6] под инженерно-геологическими условиями понимается «совокупность характеристик компонентов геологической среды исследуемой территории (рельефа, состава и состояния горных пород и грунтов, условий их залегания, подземных вод, геологических и инженерно-геологических процессов и явлений), влияющих на условия проектирования и строительства, а также на эксплуатацию инженерных сооружений соответствующего назначения». Под горно-геологическими условиями обычно понимаются: строение, литология и свойства горных пород (включая пластовое давление и давление гидроразрыва), гидрогеологические условия, структура и тип залежи полезного ископаемого и пр. (единое общее определение горно-геологических условий на сегодняшний день отсутствует). Горнотехнические условия являются детализацией горно-геологических относительно характеристик используемых технических средств.

Таким образом, можно сказать, что объекты инженерно-геологических изысканий и исследований горно-геологических условий очень близки. Это толща горных пород и геологических осадков (наносов), которые с точки зрения инженерной геологии являются грунтами, ее строение, состав и физико-механические свойства, подземные воды и пр. Специфика изучения горно-геологических условий (относительно инженерно-геологических) для строительства скважин в верхних интервалах разреза заключается в основном в определении таких характеристик, как пластовые давления, давления гидроразрыва, абразивность и некоторых других.

Глубинность

Обычно глубинность морских инженерно-геологических работ ограничивается мощностью сжимаемой зоны, заглублением свайных фундаментов, якорей стабилизации и т.п. и, как правило, не превышает 50–70 м от дна. Очевидно, что исходя из последних требований заказчиков работ изучение горно-геологических условий крепления и бурения нефтегазовых скважин в верхних интервалах потребует увеличения глубины исследований до 300–500 м от дна.

Основные геологические риски

Геологические факторы, которые могут вызвать осложнения при бурении и креплении нефтегазовых скважин принято в настоящее время называть «геологическими рисками». Перечень основных геологических рисков и соответствующих способов и/или критериев их выявления и оценки по материалам инженерно-геологических изысканий и дополнительных методов исследований представлен в табл. 1.

Таблица 1

Перечень основных геологических рисков и соответствующих методов или критериев их выявления

№	Геологический риск	Способ или критерий выявления и оценки
1.	Локальные залежи приповерхностного газа или газогидратов с аномально высоким пластовым давлением	Наличие амплитудных аномалий типа «яркое пятно» на сейсмических временных разрезах. Газопроявления при пилотном бурении.
2.	Многолетнемерзлые породы	Потеря сейсмической корреляции, сосредоточенные дифракционные оси и наличие акустических неоднородностей на сейсмических временных разрезах. Наличие отрицательных температур отложений околоскважинного пространства. Наличие льда в керновом материале. Повышенные скорости сейсмических волн по данным акустического каротажа.
3.	Разломы и связанная с ними трещиноватость	Выделяются на временных сейсмических разрезах. Наблюдение за режимом работы насосов при пилотном бурении. Нарушения сплошности керна.
4.	Интервалы неустойчивых пород	По механическому каротажу при пилотном бурении. Лабораторные определения физико-механических свойств по керновому материалу.
5.	Кавернообразование в результате выщелачивания и растворения пород, а также протаивания выскользистых отложений	Лабораторные определения растворимости, размокаемости и мерзлотной усадки по керновому материалу. Кавернометрия в скважинах.
6.	Интервалы набухающих пород, сужение стволов скважин	Лабораторные определения давления и относительной деформации набухания по керновому материалу. Кавернометрия в скважинах.
7.	Гидроразрыв, интервалы отложений с высокой проницаемостью	Выделение проницаемых отложений в керне. Выделение интервалов возможного гидроразрыва расчетным методом на основании лабораторного определения свойств по керновому материалу.

№	Геологический риск	Способ или критерий выявления и оценки
		Скважинные испытания в изолированных пакерами интервалах.
8.	Наличие обломков твердых высокоабразивных пород и минеральных новообразований	Сосредоточение дифракционных осей на сейсмических временных разрезах. По керновому материалу. По механическому каротажу при пилотном бурении.

Данный перечень составлен в соответствии с публикациями [1–4, 10] и требованиями нормативных документов [5, 7–9], а также на основании требований заказчиков изыскательских работ на последних проектах.

Методы и виды работ

Для решения поставленных задач планируется использовать бурение и сейсморазведку модификаций высокого и сверхвысокого разрешения, а также каротажные измерения и скважинные гидравлические испытания.

Методика и технические средства сейсмических работ, выполняемые при изысканиях, для решения задач по изучению горно-геологических условий верхней части разреза не требуют никаких существенных изменений и модернизации.

Инженерно-геологическое бурение с отбором керна, проводимое при изысканиях, не имеет достаточной глубинности. Обычно оно ограничивается отметками $-50 \div -70$ м от поверхности дна. Для частичного решения поставленных задач применяется пилотное бурение на глубину до 500 м и более, которое на данный момент не относится к собственно изыскательскому виду работ. Это бурение проводится одновременно с каротажом по технологии LWD (logging while drilling) без отбора керна. При каротаже ведется запись режимов бурения или механический каротаж (нагрузки на долото, скорости вращения бурового снаряда, скорости проходки и режима работы насосов). Также выполняются измерения естественной радиоактивности отложений (γ -каротаж), индукционный электрический каротаж и инклинометрия.

Для решения указанных задач и выявления описанных рисков пилотное бурение предлагается проводить с чередованием интервалов каротажа LWD с интервалами отбора керна. Изучение и лабораторные анализы кернового материала позволят получить значительно более полные данные, позволяющие решать широкий круг задач в рассматриваемой области.

Также предлагается проводить в пилотной скважине измерение скоростей распространения сейсмических волн вертикальным сейсмическим профилированием (ВСП) с помощью оставляемой в скважине при ликвидации оптоволоконной косы. Такие работы в последнее время начали выполняться при изысканиях в относительно неглубоких инженерно-геологических скважинах.

Кроме того, представляется необходимым выполнение также и термометрии (термокаротажа) в выстоявшихся после бурения скважинах. Этот вид работ также начал в последнее время производиться при инженерно-геологических изысканиях на арктическом шельфе. Для термокаротажа может использоваться та же оптоволоконная линия, которая применялась при ВСП.

Применение некоторых других дополнительных методов каротажных измерений и скважинных гидравлических испытаний позволит значительно увеличить достоверность и степень полноты получаемых данных при достаточно небольших затратах.

Перечень методов исследований и соответствующих получаемых результатов представлен в табл. 2.

Таблица 2

Методы исследований и соответствующие результаты

№	Метод	Получаемый результат
1.	Сейсмическое профилирование в модификациях высокого и сверхвысокого разрешения	Расчленение и стратификация осадочной толщи на слои и выявление сейсмических аномалий и неоднородностей, потенциально связанных с рисками. Определение скоростей распространения сейсмических волн (скоростной анализ).
2.	Пилотное бурение с каротажом LWD	Оценка буримости и прочности пород по данным механического каротажа. Выделение интервалов глинистых отложений (по данным γ -каротажа) и проницаемых водонасыщенных горизонтов по данным индукционного электрического каротажа.
3.	Пилотное бурение с отбором керна	Оценка состава отложений и получение проб для лабораторных определений физико-механических свойств.
4.	Вертикальное сейсмическое профилирование с помощью оптоволоконных линий	Оценка скоростей распространения сейсмических волн, выделение интервалов многолетнемерзлых и газосодержащих пород, определение динамических упругих характеристик.
5.	Термометрия в выстоявшихся скважинах	Оценка температурного режима месторождения (структуры), определение величины теплопотока и теплофизических свойств.
<i>Дополнительные каротажные и скважинные гидравлические исследования</i>		
6.	Кавернометрия	Выявление интервалов неустойчивых пород, сужений ствола скважины, сильного протаивания многолетнемерзлых пород.
7.	Скважинные гидравлические испытания в интервалах, изолированных с помощью пакеров	Определения давления гидроразрыва. Выделение высокопроницаемых интервалов. Определения коэффициента проницаемости (фильтрации).

Выводы и рекомендации

В целом очевидно, что оценка горно-геологических условий строительства морских нефтегазовых скважин (включая крепление) в верхней части разреза по материалам инженерно-геологических изысканий возможна. При некотором дополнении методами, которые обычно при изысканиях не используются, появляется возможность получать полные наборы данных по всем основным компонентам горно-геологических условий.

Рекомендуется создать нормативный документ, регламентирующий описываемые исследования. Это может быть инструкция или методические рекомендации. Для его создания необходимо создать рабочую группу, состоящую, с одной стороны из специалистов в области инженерной геологии и изысканий, с другой – специалистов, занимающихся проектированием и строительством нефтегазовых скважин.

Список литературы

1. Журавель В.И., Журавель И.В., Мансуров М.Н. Практические вопросы учета аварийности морских скважин // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2015. № 2(22). С. 133–141.
2. Лисанов М.В., Сумской С.И., Савина А.В., Самусева Е.А. Аварийность на морских нефтегазовых объектах // Oil and Gas Journal Russia. 2010. № 5(39). С. 48–53.
3. Миронюк С.Г. Анализ геологических опасностей и рисков при строительстве морских трубопроводов и подводных добычных комплексов // Инженерная защита. 2015. № 6(11). С. 30–38.
4. Петренко В.Е., Оганов Г.С., Свиридова Т.А. Проектные решения для строительства скважин на морском шельфе в условиях наличия приповерхностного газа // Проектирование и разработка нефтегазовых месторождений. 2017. № 1. С. 43–47.
5. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 534 от 15.12.2020 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности “Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности”».
6. РД 39-00147001-767-2000 Инструкция по креплению нефтяных и газовых скважин.
7. СП 11-114-2004 Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений.
8. СТО Газпром 7.4-007-2011 Руководство по предупреждению аварий, осложнений и брака при строительстве скважин.
9. СТО Газпром РД 2.1,142,2005 Методика расчета допустимых значений параметров конструкции скважин, температурного режима их

эксплуатации, технических решений по обеспечению устойчивости и целостности устья и обсадных колонн.

10. Хоштария В.Н. Строительство скважин в условиях геологических осложнений, связанных с верхней придонной частью осадочного чехла // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. 2016. № 4. С. 18–26

S.I. Rokos, S.N. Kulikov

Arctic Marine Engineering Geological Expeditions JSC, Murmansk, amige@rusgeology.ru

NEW ASPECT OF OFFSHORE RESEARCH – AN ESTIMATION OF GEOLOGICAL CONDITIONS FOR CONSTRUCTION OF OFFSHORE OIL AND GAS WELLS USING ENGINEERING-GEOLOGICAL METHODS

Abstract. Recently, the customers of surveys for setting up drilling platforms also require an assessment of the conditions for securing and drilling oil and gas wells in the upper part of the section based on the materials of engineering-geological works. The publication formulates the purpose and objectives of such studies, developed a list of geological risks to be identified, as well as methods and criteria for their identification and assessment. The types of prospecting works are considered, based on the materials of which the assigned tasks will be solved. Additional (in relation to engineering-geological) research methods are recommended, which will contribute to obtaining more complete data. It is proposed to develop a normative document regulating the research of geological conditions by engineering-geological methods.

Key words: shelf; surface part of the geological section; engineering-geological surveys; geological conditions; geological risks; oil and gas drilling.

Кириллов С.А., Калениченко В.О.

ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова»,
г. Москва, s.kirillov@marine-rc.ru, v.kalenichenko@marine-rc.ru

О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ШЕЛЬФЕ

Аннотация. Рассматривается необходимость разработки единых методологических и методических подходов к проведению экологических исследований на море, что позволит обеспечить организации, осуществляющие хозяйственную и иную деятельность на шельфе, качественной информацией о состоянии окружающей среды и экологических рисках, связанных с указанной деятельностью.

Ключевые слова: экологические исследования; шельф; Мировой океан; Северный морской путь; мониторинг.

Стратегические цели и задачи морских экологических исследований определены «Морской доктриной Российской Федерации» [1].

Морские исследования проводятся в интересах обеспечения устойчивого развития и национальной безопасности РФ и включают:

- обеспечение систематических исследований морской среды, ресурсов и пространств океанов и морей, всего комплекса проблем, связанных с использованием Мирового океана;

- формирование и последующее развитие общегосударственного (межотраслевого) научно-технического комплекса, включающего единую систему мониторинга Мирового океана и его морей на основе дистанционного зондирования и контактных наблюдений, картографическое обеспечение и банки данных о морской среде.

Мониторинг состояния морской среды и прибрежных территорий проводится в целях информационного обеспечения безопасности морской деятельности для своевременной разработки и принятия комплексных мер по защите и сохранению морской среды, предупреждению и ликвидации последствий ее загрязнения.

Для этого должны проводиться исследования:

- экологической нагрузки на акватории Мирового океана, внутренних морских вод РФ, принципов и методов, направленных на ее снижение;

- биологического разнообразия океанов и морей как важнейшего фактора глобальной экологической устойчивости и оптимального использования возобновляемого ресурсного потенциала.

Для формирования и поддержания единого информационного пространства в области морской деятельности предусмотрено:

- совершенствование средств и технологий сбора, обработки, предоставления и распространения информации об обстановке в Мировом океане;

- обеспечение интеграции и рационального применения ведомственных и иных систем информации об обстановке в Мировом океане;
- обеспечение регламентированного обмена информационными ресурсами с аналогичными зарубежными системами на основе российских и международных стандартов взаимодействия и совместимости;
- интеграцию информационных ресурсов и средств информационных систем в области природоохранного и других видов обеспечения в общую инфраструктуру информационного обеспечения морской деятельности.

На Арктическом и Тихоокеанском региональных направлениях предусмотрено проведение комплексных научных исследований и мониторинга состояния и изменений морской среды в условиях активного антропогенного воздействия. При этом должна учитываться роль и место Арктического бассейна в глобальных климатических процессах.

Уникальность и уязвимость окружающей среды Арктической зоны относят охрану окружающей среды к основным национальным интересам РФ в данном регионе.

При этом согласно «Основам государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 г.» [5] в качестве одной из основных угроз национальной безопасности в Арктике указана неготовность системы мониторинга окружающей среды, размещенной в Арктической зоне РФ, к экологическим вызовам.

В связи с этим поставлена задача обеспечить совершенствование и развитие системы мониторинга окружающей среды, использование современных информационно-коммуникационных технологий и систем связи для осуществления измерений со спутников, морских и ледовых платформ, научно-исследовательских судов, наземных пунктов и из обсерваторий.

«Стратегией развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г.» [6] также предусмотрено:

- выделение приоритетных направлений научно-технологического развития и наращивание деятельности по проведению фундаментальных и прикладных научных исследований в интересах освоения Арктики;
- проведение регулярной оценки экологических и социально-экономических последствий антропогенного воздействия на окружающую среду Арктической зоны;
- развитие единой системы государственного экологического мониторинга (государственного мониторинга окружающей среды) с применением современных информационно-коммуникационных технологий и систем связи;
- предотвращение негативных экологических последствий при освоении природных ресурсов;
- устранение негативных последствий для окружающей среды хозяйственной и иной деятельности человека;

– создание системы оперативного информирования органов государственной власти и населения о возникновении или увеличении рисков вредного воздействия наиболее опасных загрязняющих веществ и микроорганизмов в связи с чрезвычайными ситуациями, обусловленными изменениями климата.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что цели и задачи проведения экологических исследований на шельфе установлены как элементы государственной политики и стратегии. Также определены основные направления и сферы применения результатов таких исследований.

В связи с этим возникает вопрос: готово ли государство, а также исследовательское сообщество к их реализации?

В соответствии со ст. 63.1 [8] Федерального закона от 10 января 2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» и ст. 33 Федерального закона от 30.11.1995 № 187-ФЗ «О континентальном шельфе Российской Федерации» [7] должна быть создана система Государственного мониторинга континентального шельфа.

Эта подсистема комплексной Государственной системы экологического мониторинга обеспечивает проведение на шельфе регулярных наблюдений за состоянием окружающей среды, включая морскую среду и донные отложения, в т.ч. за показателями химического и радиоактивного загрязнения, микробиологическими и гидробиологическими параметрами и их изменениями под влиянием природных и антропогенных факторов. Однако она до настоящего времени не сформирована.

Активное, увеличивающееся из года в год хозяйственное освоение Арктического и Дальневосточного регионов РФ приводит к соответствующему увеличению количества и масштабов проводимых экологических исследований.

Кроме государственных программ комплексных и целевых исследований (экспедиций) и наблюдений (включая сеть наблюдений Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды) государственными и коммерческими структурами проводится большое количество прикладных экологических исследований на шельфе, из которых наибольшее распространение имеют инженерно-экологические изыскания, фоновый экологический мониторинг, производственный экологический мониторинг и контроль, обследование устьев скважин, а также реализация программ сохранения биоразнообразия.

При этом при проведении указанных исследований в основном изучаются схожие параметры окружающей среды и ее компонентов с использованием соответствующей методической и приборной (инструментальной) базы. В связи с этим логично предположить, что результаты проводимых исследований также должны быть схожи и сопоставимы. Однако на практике этого не происходит.

Отсутствие единого порядка или регламента проведения экологических исследований на шельфе приводит к тому, что исполнителями конкретных

работ и (или) их заказчиками самостоятельно осуществляется выбор методических подходов, области исследований и периодичности и продолжительности наблюдений, перечней исследуемых показателей, методик проведения исследований и измерений. Это негативно влияет на сопоставимость результатов работ, выполненных разными исполнителями, и возможность их использования разными субъектами морской деятельности (в целях оценки состояния морской среды и принятия адекватных мер по ее охране) не только на региональном и федеральном, но также и на локальном уровнях.

Вместе с тем многочисленные и разнообразные экологические исследования, проводимые в морской акватории РФ, могут стать хорошей основой для создания открытой и стабильно функционирующей системы комплексного экологического мониторинга и информационного обеспечения экологической информацией органов государственной власти и организаций, планирующих и осуществляющих хозяйственную и иную деятельность на шельфе.

Для этого потребуется проведение инвентаризации накопленных знаний и результатов исследований, создание цифровой базы данных об актуальном состоянии окружающей среды, а также унификация подходов и методов выполнения различных видов экологических исследований (на локальном, региональном и федеральном уровнях) и разработка соответствующих регламентирующих документов (с учетом специфики различных видов исследований).

Другим важным фактором является обеспечение устойчивого развития Арктического и Дальневосточного региона и внедрение принципов «зеленой» экономики, которым придается большое значение на международной арене. В связи с этим важным конкурентным условием для реализации нефтегазовых проектов и экспорта сырьевой продукции становится обязательное соответствие не только российским, но и международным экологическим требованиям.

Поэтому система комплексных экологических исследований должна учитывать как российские, так и международные требования и наилучшие практики в данной области. При этом получаемые данные должны носить открытый характер, быть доступны для проверки и сравнения с результатами научных и прикладных программ в области изучения морских экосистем, в т.ч. зарубежных.

Важным стимулом для решения данной задачи может стать реализация крупнейших морских проектов, например, связанное с освоением Арктического региона и предусмотренное «Основами государственной политики...» [5] и «Стратегией развития Арктической зоны ...» [6] развитие Северного морского пути (СМП) как круглогодичной транзитной транспортной линии.

Именно экологические аспекты и риски, связанные с осуществлением хозяйственной деятельности, в т.ч. судоходства, в Арктике (например, «слабая

изученность оказываемого воздействия, создающего угрозу хрупким экосистемам Арктики» и «повышенная экологическая опасность»), используются противниками укрепления позиций РФ в Арктическом регионе в качестве аргументов против развития СМП.

В связи с этим для обеспечения национальных интересов РФ в Арктике Госкорпорация «Росатом» (исполнитель ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова») осуществляет активную деятельность в области разработки и внедрения системы мониторинга экологической безопасности акватории СМП, для чего ставит перед собой амбициозную задачу реализации пилотной программы регулярного экологического мониторинга акватории СМП, начиная с 2022 г. Данная программа разрабатывается при участии ведущих российских и зарубежных экспертов в области исследований Арктики с учетом наилучших практик, международных и российских требований.

С учетом активного развития столь широкомасштабного транспортно-инфраструктурного проекта, охватывающего все морские акватории Арктического региона, довольно острой становится проблема консолидации накопленных за многолетний период данных и создания общей базы результатов проведенных экологических исследований.

Также решается задача верификации результатов проводимых экологических исследований, регулярного обновления базы данных, систематизации и хранения большого массива информации, ее обработки и визуализации посредством цифровых геоинформационных сервисов и обеспечения доступа к ним заинтересованных лиц.

Учитывая изложенное, предлагается разработать единые методологические и методические подходы к проведению экологических исследований на море, что позволит обеспечить организации, осуществляющие хозяйственную и иную деятельность на шельфе, качественной информацией о состоянии окружающей среды и экологических рисках, связанных с указанной деятельностью.

Для этого возможно объединение усилий крупных компаний и подрядных организаций, выполняющих различные экологические исследования, а также саморегулируемых организаций в области инженерных изысканий. Также можно инициировать разработку соответствующего государственного стандарта (или серии стандартов) по организации и проведению экологических исследований на море.

При этом уже можно использовать документы, принятые в последнее время:

- Приказ Минприроды России № 524 от 30.07.2020 «Требования к проведению наблюдений за состоянием окружающей среды, ее загрязнением» [2];
- СП 502.1325800.2021 «Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ» [3];
- СП 504.1325800.2021 «Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования» [4].

Список литературы

1. Морская доктрина Российской Федерации. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/555631869> (дата обращения: 26.11.2021).
2. Приказ Минприроды России № 524 от 30.07.2020 «Требования к проведению наблюдений за состоянием окружающей среды, ее загрязнением».
3. СП 502.1325800.2021 Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.
4. СП 504.1325800.2021 Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования.
5. Указ Президента РФ № 164 от 05.03.2020 «Об Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года».
6. Указ Президента РФ № 645 от 26.10.2020 «Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г.».
7. Федеральный закон № 187-ФЗ от 30.11.1995 «О континентальном шельфе Российской Федерации».
8. Федеральный закон № 7-ФЗ от 10.01.2002 «Об охране окружающей среды».

S.A. Kirillov, V.O. Kalenichenko

Lomonosov Moscow State University Marine Research Center LLC, Moscow, s.kirillov@marine-rc.ru,
v.kalenichenko@marine-rc.ru

ON THE PROSPECTS OF APPLICATION OF THE RESULTS OF ECOLOGICAL RESEARCH ON THE SHELF

Abstract. The need to develop unified methodological approaches to ecological research at sea is considered, which will provide organizations carrying out economic and other activities on the shelf with high-quality information on the state of the environment and ecological risks associated with these activities.

Key words: ecological research; shelf; World Ocean; Northern Sea Route; monitoring.

**Терехина Я.Е.¹, Токарев М.Ю.¹, Горбачев С.В.², Хлебникова О.А.¹,
Соловьева М.А.¹, Гончарова А.М.³, Нурмухамедов Т.В.²**

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, г. Москва, ya.terekhina@sc-lmsu.com

²ООО «РН-Шельф-Арктика», г. Москва

³ООО «Арктический научный центр», г. Москва

ОПЫТ МУЛЬТИМАСШТАБНОГО ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ НА АКВАТОРИИ ПЕЧОРСКОГО МОРЯ

Аннотация. Развитие нефтегазовой отрасли в России напрямую зависит от технологических решений во всех направлениях этой сферы. Целью данного проекта была разработка технологии оценки инженерно-геологических условий на основе мультимасштабных данных на шельфе Печорского моря. Разработка такой методологии дает возможность принимать оптимальные управленческие и концептуальные решения при планировании и реализации геологоразведочных работ с учетом реальных инженерно-геологических особенностей региона и конкретной зоны

Ключевые слова: планирование; инженерно-геологические условия; Печорское море; инженерные изыскания; сейсморазведка.

Введение

Развитие нефтегазовой отрасли в России напрямую зависит от технологических решений во всех направлениях этой сферы. Одним из инструментов повышения эффективности хозяйственной деятельности является морское пространственное планирование (МПП) – комплекс аналитических, расчетных и оценочных мероприятий, направленных на обоснование формирования и развития определенных видов хозяйственной деятельности и их сочетаний в том или ином районе (ареале) моря, океана [2]. МПП определено Директивой Евросоюза 2014/89/ЕС [10] как «сквозной политический инструмент для государственных органов и заинтересованных сторон, применяемый для скоординированного, комплексного трансграничного подхода. Применение экосистемного подхода будет способствовать обеспечению устойчивого развития и роста морских и прибрежных экономик и устойчивого использования морских и прибрежных ресурсов» [6]. На разных стадиях оценки природно-ресурсного потенциала параллельно возможна оценка инженерно-геологических условий как одного из определяющих факторов успеха хозяйственной деятельности на арктическом шельфе.

Целью данного проекта была разработка технологии оценки инженерно-геологических условий на основе мультимасштабных данных на шельфе Печорского моря. Данная разработка дает возможность сформировать набор геолого-геофизической информации для принятия корректных управленческих и концептуальных решений для планирования и реализации геологоразведочных работ (ГРР), что в свою очередь помогает минимизировать риски и оптимизировать временные и финансовые издержки.

Данный проект консолидировал в себе более 6000 пог. км данных 2D стандартной сейсморазведки (СР), 1200 км² 3D СР, 5 площадок комплексных инженерных изысканий, включающих как первичную, так и вторичную информацию [3] (рис. 1Рис.). Также была обобщена гидрометеорологическая информация, построена цифровая модель региона с возможностью прогнозирования различных событий. Существенной особенностью данной работы был детальный анализ сейсмичности, который показал отсутствие системного изучения шельфовых территорий и возможные риски недоучетом этого фактора при проектировании сооружений. В результате сбора, анализа и систематизации большого массива разнородных материалов [8] на шельфе Печорского моря за 43-летний период с 1976 по 2020 гг. была разработана и создана единая цифровая база геоданных на платформе ArcGIS.

Работа включала в себя картирование в следующих масштабах: 1:50 000–1:10 000 [7].

Рис. 1. Схема расположения лицензионных участков на шельфе Печорского моря (показаны красным). Обозначения: красные полигоны – лицензионные участки; оранжевые полигоны – участки 3D СР, цветные линии – съемки 2D СР, малиновые линии – площадки инженерно-геологических исследований

Технология оценки инженерно-геологических условий

Общепринятыми являются стадии ГРП, на которых исследования выполняются сначала по редкой сети профилей 2D, далее сеть исследований

сгущается и на наиболее перспективных участках выполняется 3D. На заключительном этапе проводят бурение поисково-оценочных и эксплуатационных скважин. При этом, инженерным изысканиям очень часто не уделяется должного внимания на региональных этапах, что приводит к некорректным оценкам на стадии концептуального проектирования нефтегазовых объектов и затрат на них. Уже на региональном этапе необходимо анализировать всевозможную информацию и формировать базы данных инженерно-геологических, гидрометеорологических, экологических и других особенностей региона.

На первом этапе ГРП по данным редкой сети региональных профилей 2D возможно, с примирением специальной обработки, выделить аномалий в верхней части разреза и оценка опасных геологических процессов и явлений (ОГПиЯ). С появлением новых сейсмических, геологических, геофизических и инженерных данных, полученные результаты необходимо уточнять для идентификации и картирования ОГПиЯ.

Очень важным элементом процесса ГРП является проведение специализированных региональных инженерных изысканий/исследований, которые позволяют точнее верифицировать выявленные аномалии с привлечением специализированных методов [4].

В результате совместно с процессом оценки перспектив нефтегазоносности региона выполняется работа по созданию цифровой базы данных инженерных особенностей, что позволяет корректно планировать следующие этапы ГРП и разработки. Затраты на анализ и определение инженерно-геологических условий по уже имеющимся данным не сопоставимы со стоимостью ошибок неоптимального проектирования [11].

Оценка инженерно-геологических условий на примере Печорского моря

Одним из компонентов инженерно-геологических условий являются опасные геологические процессы и явления. На примере данных шельфа Печорского моря показано, как анализ и сопоставление разноуровневых данных позволяют выявить ОГПиЯ на больших территориях и провести их картирование на разных стадиях ГРП [5, 9]. На рис. 2 показаны наборы данных специально обработанной сейсморазведки и техники интерпретации, которые были опробованы, адаптированы и использованы в проекте.

После специальной обработки [3] для анализа интервала 0–10 м по данным 2D стандартной сейсморазведки (СР) было рассчитано более 10 различных динамических атрибутов (по суммированным данным и сейсмограммам), анализ взаимных кросс-плотов которых позволил выделить основные независимые атрибуты: *vatABS* (максимальная абсолютная амплитуда с сохранением знака), *vatRMSF* (среднеквадратичные значения частоты), *vatMEAN* (средняя амплитуда). Именно они пошли на вход кластерного анализа (рис. 3). Впоследствии была произведена верификация полученных результатов

автоматического анализа экспертной оценкой [1]. Полученные результаты учитывались при построении карт опасностей и инженерно-геологических условий.

Рис. 2. Наборы специально обработанных данных и техники интерпретации для разных диапазонов глубин

Рис. 3. Пример сопоставления рассчитанных атрибутов и переобработанного сейсмического разреза

Для анализа данных 3D СВР, на которых затруднена идентификация объектов в верхней части разреза на разрезах в связи с отсутствием ближних выносов, одним из ключевых методов явился расчет амплитудных атрибутов по сейсмограммам (коэффициенты поверхностно-согласованной амплитудной

коррекции, ААРС) в 100 мс под дном и в 100 мс ниже первого регистрируемого рефлектора в трех частотных диапазонах: 0–40, 40–80 и 80–200 Гц. Атрибуты, рассчитанные в интервале 100 мс под дном, позволяют охарактеризовать уровень амплитуд регистрируемого сигнала в приповерхностном интервале разреза и отвечают за обнаружение малоглубинных и приповерхностных геологических опасностей. Пример интерпретации данного атрибута приведен на рис. 4.

Рис. 4. Выделение объектов на карте амплитудного атрибута по сейсмограммам. Зона 1 и зона 3 – области с повышенными значениями атрибута, зона 2 – область с пониженными значениями атрибута. *Обозначения:* 1 – локальные объекты с пониженными значениями атрибута; 2 – локальные объекты с повышенными значениями атрибута; 3 – области со средними значениями атрибута; 4 – линейные объекты со средними значениями атрибута

Для интерпретации данных 3D СР широко применялись амплитудные атрибуты, рассчитанные до и после специальной обработки данных, а именно: сила отражения (амплитуда огибающей) и среднеквадратичные амплитуды; а также частотные атрибуты: мгновенная частота; пиковая частота (соответствующая главному максимуму в спектре); средняя частота; кажущаяся частота (оцененная по числу пересечений через ноль); видимая частота (оцененная по корреляционному расстоянию); частотный диапазон.

Данные инженерно-геологических изысканий, а именно сейсморазведка высокого и сверхвысокого разрешения, использовались для верификации полученных результатов (рис. 5). По этим данным были заверены обнаруженные на данных СР после специальной обработки опасные геологические объекты: палеоврезы, газонасыщенные осадки.

Рис. 1. Сравнение аномальных объектов, выделенных по данным 3D стандартной сейсморазведки, (а) с объектами, выделенными по данным инженерно-геологических изысканий (сейсморазведки высокого разрешения). Красной линией показано положение профиля (б)

Итогом работ по проекту стали прогнозные карты-схемы типов ОГПиЯ шельфа Печорского моря по степени опасности с оценкой вероятности их обнаружения для характерных интервалов глубин по грунту. Примеры таких карт приведены на рис. 6.

Выводы

Планирование ГРП и разработки шельфа – многокомпонентная задача, требующая анализа большого количества данных. Поэтому превентивная оценка не только глубинного строения, но и особенностей размещения сооружений позволяет выполнить проектирование с подбором технологических решений для конкретного региона.

Рис. 2. Прогнозные карты-схемы типов ОГПиЯ района работ с оценкой вероятности для интервала 0–10 м и 10–100 м по грунту

Морское пространственное планирование диктует необходимость выработки единой концепции для всех аспектов запланированной хозяйственной деятельности и является важнейшим инструментом на этом пути особенно для работ в Арктическом регионе.

В данной работе был показан один из примеров многоцелевого использования уже имеющихся данных. В результате были построены карты-схемы прогнозных типов ОГПиЯ. Данная методика проходит внедрение на других участках и регионах с более слабой изученностью, что уже сейчас дает возможность скорректировать концептуальные модели по ГРП, проектированию и обустройству.

Авторы выражают благодарность всем участникам проекта по анализу и обобщению данных шельфа Печорского моря, особенно коллективу ООО «Арктический научный центр» и геологическому факультету МГУ имени М.В. Ломоносова.

Список литературы

1. Архипов Н.Д., Хлебникова О.А., Терехина Я.Е. Применение методов кластеризации для выделения типов сейсмических волновых картин // Труды IV Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях». Тверь: Полипресс, 2021. Т. 2. С. 310–313.

2. Бакланов П.Я. Морское пространственное планирование: теоретические аспекты // Балтийский регион. 2018. Т. 10. № 2. С. 76–85.
3. Особенности интерпретации 2d/3d сейсмических данных для решения инженерно-геологических задач на мелководье Печорского моря / Я.Е. Терехина, М.А. Соловьева, О.А. Хлебникова, М.Ю. Токарев, С.В. Горбачев, Т.В. Нурмухамедов, О.М. Мятчин // Труды Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия-2021. Современные методы изучения и освоения недр Евразии». Тверь: Полипресс, 2021. Т. 1. С. 202–205.
4. Перспективные сейсмические технологии для инженерно-геологических изысканий на мелководном шельфе / М.Ю. Токарев, А.Г. Росляков, Я.Е. Терехина, Е.А. Бирюков, А.А. Колюбакин, С.В. Горбачев // Геофизика. 2021. Спецвыпуск. С. 3–11.
5. Признаки геологических опасностей на данных 2D/3D стандартной сейсморазведки в условиях предельного мелководья шельфа Печорского моря / Я.Е. Терехина, О.А. Хлебникова, М.А. Соловьева, М.Ю. Токарев, А.М. Гончарова, С.В. Горбачев, Л.А. Гурвич, О.М. Мятчин, Т.В. Нурмухамедов // Труды X Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2021)». Тверь: Полипресс, 2021. Т. 1.
6. Спирин П.П. Структура и содержание морских комплексных планов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.myshared.ru/slide/952653/> (дата обращения: 27.11.2021).
7. СП 504.1325800.2021 Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования.
8. Четвертичный покров и связанные с ним опасные геологические процессы в Печорском море / А.Е. Рыбалко, Т.Ю. Репкина, Я.Е. Терехина, М.Ю. Токарев, М.А. Соловьева, О.А. Хлебникова // Материалы ежегодной конференции по результатам экспедиционных исследований «Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России». СПб: ААНИИ, 2021. 209–214.
9. Approach to geohazard assessment based on 2d/3d seismic data on the Pechora Sea shelf / M.A. Solovyeva, Y.E. Terekhina, O.A. Khlebnikova, M.Yu. Tokarev, S.V. Gorbachev, T.V. Nurmukhamedov, O.M. Myatchin // Proceedings of the Conference “Engineering and mining geophysics 2021”. Houten, the Netherlands: EAGE, 2021. Vol. 2021. P. 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152201>.
10. Directive 2014/89/EU Maritime spatial planning.
11. Terekhina Y.E., Gorbachev S.V., Maev P.A., Ponimaskin A.I. A possibility of using standard 3D seismic data for assessment of drilling geohazards in transit zone // Proceedings of the Near surface geoscience 2016 – second applied shallow marine geophysics Conference. Houten, the Netherlands: EAGE, 2016. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201602144>.

**Ya.E. Terekhina¹, M.Yu. Tokarev¹, S.V. Gorbachev², O.A. Khlebnikova¹,
M.A. Solovyeva¹, A.M. Goncharova³, T.V. Nurmukhamedov²**

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, ya.terekhina@sc-lmsu.com

²RN-Shelf-Arctic LLC, Moscow

³Arctic Research Center LLC, Moscow

EXPERIENCE OF MULTI-SCALE ENGINEERING-GEOLOGICAL MAPPING IN THE PECHORA SEA

Abstract. The development of the oil and gas industry in Russia depends on technological solutions in all this area directions. The purpose of this project was to develop a technology for assessing engineering-geological conditions based on multiscale data on the shelf of the Pechora Sea. The development of such a methodology promotes to make optimal management and conceptual decisions when planning and implementing geological exploration works, taking into account the actual engineering-geological features of the region.

Key words: planning; engineering-geological conditions; Pechora Sea; engineering surveys; seismic exploration.

Ермолов А.А., Белова Н.Г., Новикова А.В.

МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория
геоэкологии Севера, г. Москва, alexandr.ermolov@gmail.com

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ НИЗКИХ АРКТИЧЕСКИХ БЕРЕГОВ ПОЛЕВЫМИ И ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Аннотация. Рассмотрено значение изучения экзогенных процессов и современные методы исследований динамики низких арктических берегов в условиях глобальных климатических изменений и увеличения техногенной нагрузки, связанной с активизацией промышленной и хозяйственной деятельности на берегах западных арктических морей.

Ключевые слова: арктические берега; литодинамика; спутниковые снимки; мониторинг.

Одной из практических целей изучения экзогенных процессов является получение достоверной информации о состоянии компонентов окружающей среды для своевременного выявления и прогнозирования развития опасных процессов и явлений для нужд проектирования, оценки надежности эксплуатации, влияния инженерных сооружений на окружающую среду, разработку и реализацию мер по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Это в полной мере относится и к изучению процессов формирования рельефа и динамики наносов в береговой зоне арктических морей, которая последние десятилетия является ареной интенсивного хозяйственного и промышленного освоения. Именно на берегах формируется инфраструктура месторождений углеводородного сырья, строятся портовые сооружения, производственные объекты, проходят трассы магистральных трубопроводов и пр. Наиболее активно осваиваются берега Карского и Баренцева морей. Именно эти районы относятся к наиболее подверженным техногенному влиянию в связи с началом разработки целого ряда крупнейших месторождений. Многолетние научные исследования и изыскательские работы позволили накопить большой объем фактических сведений о берегах Карского моря, благодаря чему они считаются одними из наиболее изученных среди всех берегов арктических морей России [2]. Вместе с тем, современные методы исследований позволяют расширить и углубить представления о геоморфологическом строении этих берегов. Одним из важнейших аспектов при проектировании и эксплуатации инженерных объектов являются наблюдения за динамикой берегов и прогноз их развития.

Берега арктических морей разрушаются со средней скоростью 0,5 м/год [5]. Темпы отступления характеризуются значительной региональной и локальной изменчивостью и определяются совокупностью различных факторов, таких как конфигурация береговой линии, геокриологическое строение, льдистость отложений, высота берегового уступа, частота и интенсивность штормов, высота нагонов, длительность безледного периода и др. Большинство исследований посвящены динамике термоабразионных берегов с явно выраженным высоким береговым уступом, размыв и разрушение

которого приводит к отступанию берега [3, 4, 6]. Однако в последние десятилетия в связи с глобальными изменениями климата с тенденцией к потеплению в Арктическом регионе размыву стали подвергаться берега ранее стабильные или аккумулятивные, образованные в голоцене в условиях морского осадконакопления, нередко используемые для строительства объектов нефтегазовой инфраструктуры.

Современные технологии позволяют использовать высокоточные дистанционные методы исследований. Так, спутниковый мониторинг является сегодня одним из самых востребованных методов контроля сезонной динамики морских берегов, текущей ледовой обстановки на акватории и экологического состояния территории. Для многих удаленных и труднодоступных районов Арктики спутниковые данные нередко служат основным, а в отдельных случаях единственным источником информации о состоянии различных компонентов природной среды. С целью оценки долговременных тенденций в развитии берега и динамики отдельных его сегментов выполняются подбор, подготовка, взаимная привязка, дешифрирование и сравнительный анализ разновременных спутниковых снимков высокого разрешения. В сочетании со сбором и анализом архивных и полевых данных дистанционные методы позволяют оценить скорости отступления и выдвижения береговой линии, выделить участки с различной интенсивностью и направленностью береговых процессов и техногенного воздействия.

Для получения детальной информации на этапах проектирования, строительства и эксплуатации незаменимыми остаются полевые методы исследований. Они направлены на получение фактических данных о геоморфологическом и геокриологическом строении, составе и свойствах отложений, динамике рельефа, интенсивности и степени опасности литодинамических процессов. К основным методам полевых работ относятся маршрутные и стационарные визуально-инструментальные исследования, инженерно-геологические и геотехнические исследования, геодезические работы, включающие прямые инструментальные измерения (съемки) рельефа на контролируемых площадках и профилях, геофизические, гидрографические и литодинамические работы в прибрежной зоне и на акватории.

В зависимости от вида изучаемых процессов и условий их развития применяемые полевые методы позволяют получать сведения различной детальности. Производственные инженерно-геологические методы (инженерно-геологическое бурение, опробование, полевые и лабораторные исследования грунтов) обеспечивают комплексное изучение геологического и гидрогеологического строения района (участка, трассы), позволяют выявлять скрытые факторы развития геологических процессов, получать количественную характеристику последних. Маршрутные и стационарные наблюдения наряду с определениями среднесезонных характеристик дают возможность фиксации и кратковременных (сезонных, штормовых и пр.) деформаций рельефа короткой сохранности. Подобные данные имеют большое значение для установления граничных условий безопасной эксплуатации

инженерных сооружений в условиях ярко выраженной сезонности проявления геологических процессов и плохой сохранности деформаций в течение года. С другой стороны, определение многолетних деформаций (колебаний) в системе наблюдаемых объектов и долговременных тенденций развития геологического процесса позволяет выполнять качественную и количественную прогнозную оценку, вырабатывать необходимые рекомендации для строительства и хозяйственной деятельности.

Современная спутниковая геодезическая аппаратура и беспилотные летательные аппараты расширяют возможности традиционных методов исследований, существенно повышают производительность и точность полевых работ. Закономерно улучшается качество получаемых данных, достоверность прогнозной оценки, и, как следствие, повышается безопасность эксплуатации инженерных сооружений. Важными результатами высокотехнологичных работ, к числу которых относится и набирающее популярность воздушное лазерное сканирование, становятся ортофотопланы, цифровые модели рельефа, трехмерные изображения, высокоточные измерения при мониторинге геологических процессов и геотехническом мониторинге.

В результате многолетних исследований авторов на различных участках промышленного освоения арктических берегов был накоплен большой объем фактического материала, получены новые данные о динамике береговой линии и изменениях рельефа береговой зоны под влиянием различных факторов [1]. В частности, установлено, что одним из таких факторов является активизация хозяйственной деятельности человека, связанная с разработкой нефтегазовых месторождений. Зачастую именно техногенное вмешательство приводит к ускорению деградации арктических берегов и интенсификации отступления береговой линии. Нередко техногенный фактор оказывает настолько масштабное воздействие, что начинает определять основные тенденции развития берега в большей степени, чем природные факторы, вызывает кардинальную перестройку рельефа береговой зоны и условий его развития на долгие годы.

С целью снижения негативного влияния промышленная и хозяйственная деятельность на этих территориях должна осуществляться с учетом всех аспектов рационального природопользования, учитывая природные закономерности развития и факторы устойчивости уязвимых к внешнему воздействию береговых систем. Для исключения возможных рисков и опасностей, связанных с береговыми процессами и устойчивого функционирования береговой инфраструктуры необходимо понимание причин и механизмов развития береговых процессов, их прогнозирование, и на основе этого – грамотное проектирование и ведение строительных работ с учетом всех возможных негативных последствий для природной среды и способов их минимизации.

Материалы публикации подготовлены в рамках выполнения работ по госбюджетной теме лаборатории геоэкологии Севера географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова № 121051100167-1.

Список литературы

1. Ермолов А.А., Прядилин Р.Ю. Особенности производственного мониторинга геологических и литодинамических процессов на участке строительства перехода магистральных газопроводов через Байдарацкую губу Карского моря // Инженерные изыскания. 2013. № 10–11. С. 88–91.
2. Экологический Атлас. Карское море / В.О. Мокиевский, А.Б. Цетлин, Л.А. Сергиенко, А.В. Евсеев, М.В. Гаврило, М.Г. Деев, А.А. Ермолов, Д.Г. Илюшин, А.И. Исаченко, Д.М. Глазов, Я.О. Ефимов, Д.Р. Загретдинова, К.А. Корнишин, К.В. Кочи, О.В. Максимова, А.А. Полухин, Д.А. Удовик. М.: Арктический научный центр, 2016. 272 с.
3. Belova N.G., Novikova A.V., Günther F., Shabanova N.N. Spatiotemporal variability of coastal retreat rates at western Yamal Peninsula, Russia, based on remotely sensed data // Journal of Coastal Research. 2020. Vol. 95. No. SI. P. 367–371. <https://doi.org/10.2112/SI95-071.1>.
4. Dynamics of permafrost coasts of Baydaratskaya Bay (Kara Sea) based on multi-temporal remote sensing data / A. Novikova, N. Belova, A. Baranskaya, D. Aleksyutina, A. Maslakov, E. Zelenin, N. Shabanova, S. Ogorodov // Remote Sensing. 2018. Vol. 10. No. 9. ID 1481. <https://doi.org/10.3390/rs10091481>.
5. The Arctic coastal dynamics database: a new classification scheme and statistics on Arctic permafrost coastlines / H. Lantuit, P.P. Overduin, N. Couture, S. Wetterich, F. Aré, D. Atkinson, J. Brown, G. Cherkashov, D. Drozdov, D.L. Forbes, A. Graves-Gaylord, M. Grigoriev, H-W. Hubberten, J. Jordan, T. Jorgenson, R.S. Ødegård, S. Ogorodov, W.H. Pollard, V. Rachold, S. Sedenko, S. Solomon, F. Steenhuisen, I. Streletskaia, A. Vasiliev // Estuaries and Coasts. 2012. Vol. 35. P. 383–400. <https://doi.org/10.1007/s12237-010-9362-6>.
6. The role of thermal denudation in erosion of ice-rich permafrost coasts in an enclosed bay / A. Baranskaya, A. Novikova, N. Shabanova, N. Belova, S. Maznev, S. Ogorodov, B.M. Jones // Frontiers in Earth Science. 2021. Vol. 8. ID 659. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.566227>.

A.A. Ermolov, N.G. Belova, A.V. Novikova

Lomonosov Moscow State University, Moscow, alexandr.ermolov@gmail.com

DYNAMICS OF LOW ARCTIC COASTS STUDIED BY FIELD AND REMOTE METHODS

Abstract. It is considered the importance of exogenous processes investigation and modern methods of studying the dynamics of low Arctic coasts in the conditions of global climate changes and an increase in man-made load associated with the activation of industrial and economic activity in the region.

Key words: Arctic coasts; lithodynamics; satellite images; monitoring.

Миронюк С.Г.

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии,
лаборатория грунтоведения и технической мелиорации грунтов, г. Москва, mironyuks@gmail.com

ПОДХОД К КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ ОПАСНОСТИ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДА, ПЕРЕСЕКАЮЩЕГО АКТИВНЫЙ РАЗЛОМ (БАРЕНЦЕВО МОРЕ)

Аннотация. Рассматривается один из аспектов проблемы строительства морских линейных сооружений. Выполнен обзор имевших место в различных морских акваториях аварий трубопроводов, вызванных землетрясениями. Показано, что основная причина их повреждений – неравномерные сейсмогенные подвижки по разлому, возникающие при сильных землетрясениях. Приведен полный перечень характеристик активных разломов, которые необходимо определить для обеспечения сейсмостойкости сооружений. Отмечены трудности, присущие полевым работам по картированию и изучению зон разломов дна морей. Рассмотрены результаты исследований по оценке опасности разломов. Указаны конкретные значения амплитуд смещений, магнитуды землетрясений при которых они возможны, а также условные вероятности возникновения сейсмогенных подвижек. Показан алгоритм определения указанных параметров на примере участка в так называемой зоне сбросов Карпинского (Баренцево море).

Ключевые слова: сейсмическая опасность; зона сбросов Карпинского; сейсмогенное смещение; подводный трубопровод; авария; Баренцево море.

В сейсмоопасных районах потенциальными опасностями для сооружений, помимо сотрясения грунта, являются и вторичные опасности землетрясений: сейсмогенные смещения по разломам, оползни, обвалы, разжижение грунтов. А.А. Никонов [15] к числу опасных сейсмообусловленных процессов и явлений вне вулканических областей в прибрежно-морской зоне относит: остаточные деформации дна (уступы, рвы), турбидитные потоки, подводные и береговые оползни, обвалы. Согласно ГОСТ Р 57123-2016 [6] в проектах строительства морских сооружений должны быть учтены, помимо упругих колебаний, следующие опасные процессы: разжижение грунтов, оползни, смещения по подводным разломам, цунами, грязевулканические извержения.

На сегодняшний день известны случаи деформаций сооружений смещениями по разрывным нарушениям, включая трубопроводы [29]. Так, при землетрясениях в Калифорнии (1952 г., $M=7,7$) и в г. Манагуа (1979 г., $M=6,5$) в первом случае трубопроводы были изогнуты с выпучиванием непосредственно над разрывным нарушением, а во втором – разрушены из-за смещений вдоль разлома [3]. Во время катастрофического Мичоаканского землетрясения (Тихий океан, вблизи побережья Мексики, $M_s=8,1$) в 1985 г. в г. Мехико возникли многочисленные локальные повреждения сварной стальной водопроводной трубы диаметром 107 см, вызванные распространением волн Рэлея [31]. В 1994 г. имел место случай разрыва сварного шва на газопроводе

диаметром 30,5 см в результате сильного ($M_w = 6,7$) землетрясения в районе Нортридж (США, штат Калифорния) [33]. В последнем случае основными обстоятельствами, которые привели к повреждению, были очень сильные сотрясения грунта в сочетании с плохим качеством сварных соединений.

При Нефтегорском землетрясении (1995 г., $M_{LN} = 7,2$) произошли многочисленные разрывы трубопроводов, которые чаще всего происходили на участках с резко неоднородным основанием. В результате землетрясения вскрылся 37-километровый сегмент Верхне-Пильтунского разлома. Разрыв представлял собой правосторонний сдвиг. Величина сдвиговой компоненты смещения изменялась от 0,5 до 8,0 м, а вертикальной – от 0 до 1,5 м [2, 18]. Как видно из приведенного краткого обзора аварий трубопроводов, нарушение их целостности возникает только при сильных землетрясениях с магнитудой более 6,5.

В мировой практике известны также случаи, когда и морские сооружения подвергались разрушениям при воздействии геологических процессов, обусловленных землетрясениями [9, 30, 34]. Негативные воздействия указанных процессов на сооружения, как правило, удается исключить или свести к минимуму при качественном выполнении предписанных нормативными документами исследований по оценке сейсмической опасности и, особенно, на этапе выбора местоположения площадки (трассы строительства) [11, 13].

Особенно актуальна проблема оценки опасности сейсмогенных смещений при проектировании трубопроводов, поскольку в большинстве случаев выбрать их трассу с обходом протяженных разломов, особенно в орогенных зонах, не представляется возможным [4, 14, 21].

Опасность разломов проявляется как в виде медленных тектонических криповых, так и быстрых практически мгновенных (одноактных) сейсмогенных смещений. Наиболее опасен второй тип движений. Они, согласно [16], возникают при землетрясениях с $M_w \geq 5,0$. Эта же величина магнитуды фигурирует в одном из определений активного разлома, приведенного в геологическом словаре [5].

Следующие основные параметры, необходимые для проектирования сооружений, должны быть определены при изучении активных разломов: возраст, положение относительно планируемого объекта, протяженность, ширина разрывной зоны, период активизации, тип подвижки (сдвиг, сброс и т.п.), углы падения и простирания, величины смещений по горизонтали и вертикали, возникшие при единичном событии, частота (повторяемость) смещения [35]. Кроме того, для оценки сейсмической опасности разлома необходимо оценить время, прошедшее с момента проявления последнего землетрясения в зоне изучаемого разлома, исследовать строение разломной зоны с целью разделения разлома на сегменты с различным сейсмическим потенциалом. Многие приемы изучения дизъюнктивных дислокаций на суше (дешифрирование космических снимков, тренчинг, электротомография,

геомагнитная съемка и др.) не пригодны или мало пригодны для картирования разломов на дне акваторий [7]. В этой связи определения всех этих характеристик на морском дне являются чрезвычайно трудоемкими и, в большинстве случаев, практически не выполнимыми.

Отмечается, что в связи с трудностями, присущими работам по картированию и датированию подводных палеосейсмодислокаций, имеется лишь несколько примеров «успешного определения средней скорости смещения и истории палеоземлетрясений по прямым наблюдениям за активными разломами» [16]. Тем не менее имеется немало статей по рассматриваемой проблеме, подготовленных, в том числе по материалам, полученным в ходе реализации проекта «Карта активных разломов мира» Международной программы «Литосфера», в которых дается описание подводных (offshore) разломов [26–28, 32]. Но, как правило, в публикациях приводятся лишь отдельные их характеристики (тип подвижки, протяженность, относительный возраст и др.).

В России впервые количественная оценка опасности разломов с привлечением зарубежных специалистов (компания EQE) была выполнена при реализации проекта строительства в Черном море подводного магистрального газопровода «Джубга – Самсун» («Голубой поток»).

При анализе целостности трубопровода (класс безопасности «нормальный») рассматривались следующие геологические опасности, связанные с землетрясениями: гравитационные потоки, смещения по разлому, крупные оползни, разжижение грунтов и др. Учитывались природные процессы (нагрузки) с вероятностью, изменяющейся в диапазоне 10^{-2} – 10^{-4} в год на километр трубопровода.

Морские изыскания, выполненные с целью выбора коридора для прокладки двух ниток газопровода и оценки геологических опасностей, а также прочностные расчеты, показали, что наибольшую угрозу для целостности сооружения на северо-восточном континентальном склоне Черного моря представляют землетрясения с $M = 7,1$ – $7,7$ (при повторяемости $T = 5000$ – 10000 лет), вязкопластические потоки обломочного материала с $T = 10000$ лет, мутьевые потоки, оползни на крутых склонах каньонов и на отдельных участках континентального склона, сейсмогенные подвижки [1].

Для расчетов использовалось соотношение между максимальной подвижкой (D_{max}) и магнитудой землетрясений (M_w) вида: $\log(D_{max}) = -5,46 + 0,82M_w$ [35]. Следует заметить, что использование приведенного выше и других соотношений между параметрами сейсмогенных разрывов: максимальной подвижкой и магнитудой землетрясений для расчетов величины подвижки надо использовать с определенной осторожностью, т.к. сейсмогенные разрывы характеризуются большим разбросом значений максимальных смещений при одной и той же магнитуде [10, 19, 25]. Изменчивость амплитуды смещений, как показано выше, отчетливо проявилась при Нефтегорском землетрясении.

Необходимость оценки параметров сейсмогенных разрывов возникла и при проектировании газопровода «Джубга – Лазаревское – Сочи». Здесь, согласно карте зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) района Большого Сочи наиболее близкими и опасными для упомянутого газопровода с точки зрения сейсмических воздействий на него оказались два линеамента с $M_{max} = 6,5$ [12].

Для оценки величины возможных сейсмогенных подвижек были привлечены расчетные методы. Они базировались на использовании глобальных зависимостей между магнитудой землетрясения, протяженностью разрыва и величиной подвижки по нему, а также эмпирических данных об отношении длины участка с максимальной амплитудой смещения к общей длине разлома [20, 22, 23]. Было установлено, что максимальные смещения для землетрясений с $M_{max} = 6$ могут составить 1,1 м. При этом годовая вероятность такой подвижки $P(D_{max})$ составила, с учетом 5%-ной протяженности сегментов разрывов, характеризующихся максимальным смещением, $\sim 10^{-6}$ [12].

Аналогичная задача решалась автором при проектировании трубопровода Штокмановского газоконденсатного месторождения (губа Опасова в Баренцевом море). Выполненные исследования позволили существенно скорректировать экспертные оценки уровня повреждений трубопровода, пересекающего опасные в сейсмическом отношении зоны [8] и сценарную базу природных опасностей, согласно которой во время эксплуатации упомянутого трубопровода возможна его авария с тяжелыми экологическими последствиями вызванная 6-балльным землетрясением.

Единственный участок, где рассматриваемый трубопровод пересекает активный разлом (зона сбросов Карпинского), расположен в Мурманской зоне ВОЗ. Она совпадает с системой глубинных разломов линии Карпинского, разграничивающей Балтийский щит и Баренцевоморскую шельфовую плиту [24] и имеет достаточно высокий сейсмический потенциал ($M_{max} = 5,0 \pm 0,2$). Длина зоны более 800 км, ширина – около 60 км. Зона в целом пространственно совпадает с сейсмогенной Мурманской зоной, выделенной Г.Д. Панасенко и др. [17]. Глубина гипоцентров ожидаемых землетрясений 10 км. Согласно материалам карты ОСР-2015В ожидаемая интенсивность на территории зоны и ее ближайшего обрамления составляет 6 баллов, пиковые ускорения измеряются величинами 0,8–1,6 м/с².

Согласно А.Л. Строму [20] указанной M_{max} в случае землетрясения будет соответствовать среднее максимальное расчетное смещение ($D_{av max}$), равное 0,04 м, а максимально возможное (D_{max}) – 0,3 м. Условная вероятность такой подвижки рассчитывается как произведение следующих вероятностей: возникновения землетрясения в зоне разлома на участке его пересечения с трассой газопровода ($P_{земл}$), выхода очагового разрыва на дневную поверхность ($P_{выхода}$) и совпадения точки пересечения с участком разрыва, смещения по которому будут максимальными при данном событии (P_{Lmax}). Используя материалы уточнения исходной сейсмичности (данные о среднем периоде

повторяемости землетрясений с $M = 5,0$), статистические данные, приведенные в работе [20], получено следующее расчетное значение годовой вероятности подвижки: $2 \cdot 10^{-2} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-2} = 8 \cdot 10^{-6}$, а с учетом срока эксплуатации стальных трубопроводов (40 лет) – $3,2 \cdot 10^{-4}$ (маловероятное событие).

Исходя из статистики аварий трубопроводов, вызванных исключительно сильными землетрясениями, можно заключить, что рассмотренное гипотетическое маловероятное событие (сейсмогенная подвижка по сбросу Карпинского) не способно нарушить целостность трубопровода. Тем не менее рекомендуется выполнить расчет трубопровода на прочность и устойчивость для случая возникновения на трассе трубопровода в Мурманской зоне ВОЗ сейсмогенного уступа максимальной высоты (D_{max}), с тем чтобы определить его влияние на напряженно-деформированное состояние сооружения.

Список литературы

1. Айбулатов Н.А. Гравитационный перенос осадочного материала на континентальном склоне и безопасность строительства и эксплуатации газопровода Россия – Турция. М.: ИРЦ Газпром. 2002. 45 с.
2. Анализ последствий воздействия Нефтегорского землетрясения на промышленные сооружения / С.В. Землюк, В.Н. Астафьев, А.М. Поломошнов и др. // Сборник докладов научно-технического семинара-совещания «Память и уроки Нефтегорского землетрясения». М.: ПОЛТЕКС, 2000. С. 42–45.
3. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность трубопроводного транспорта. М.: Знание, 2002. 752 с.
4. Выявление и прогноз опасных разрывных тектонических смещений при инженерных изысканиях для строительства / С.А. Несмеянов, Т.А. Ларина, Л.А. Латынина, И.Г. Миндель, Л.И. Серебрякова, В.С. Соколов, Н.М. Хайме // Инженерная геология. 1992. № 2. С. 3–31.
5. Геологический словарь: в 3 т. 3-е изд., перераб. и доп. / Гл. ред. О.В. Петров. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010. Т. 1. А–Й. 432 с.
6. ГОСТ Р 57123-2016 Сооружения нефтегазопромысловые морские. Проектирование с учетом сейсмических условий.
7. Иващенко А.И., Ким Ч.У., Федороишин М.С. Определение сейсмической опасности на шельфе (обзор зарубежных исследований) // Сейсмическое районирование на шельфе: сборник научных статей / Отв. ред. А.И. Иващенко. Владивосток: Изд-во ДВО АН СССР, 1990. С. 5–17.
8. Козлов С.А. Опасные для нефтегазопромысловых сооружений геологические и природно-техногенные процессы на Западно-Арктическом шельфе России // Нефтегазовое дело. 2005. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Kozlov/Kozlov_2.pdf (дата обращения: 22.11.2021).
9. Лонгинов В.В. Очерки литодинамики океана. М.: Наука, 1973. 244 с.

10. Лунина О.В. Влияние напряженного состояния литосферы на соотношения параметров сейсмогенных разрывов и магнитуд землетрясений // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 9. С. 1389–1398.
11. Миронюк С.Г. Геологические опасности дна восточной части Черного моря и их учет при выборе трасс подводных газопроводов // Материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Д. Г. Панова «Геология, география и экология океана». Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. С. 230–233.
12. Миронюк С.Г. Оценка сейсмической опасности при проектировании и строительстве морских газопроводов на шельфе // Инженерные изыскания. 2010. № 7. С. 10–14.
13. Миронюк С.Г. Нормативные требования и практика учета геологических опасностей дна акваторий при выборе площадок (трасс) размещения морских сооружений // Сергеевские чтения, Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии «Научное обоснование актуализации нормативных документов инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий». М., 2012. Т. 14. С. 295–299.
14. Несмеянов С.А., Рогожин Е.А., Севостьянов В.В., Воейкова О.А. Прогноз возможных сеймотектонических смещений по активным разрывам Северо-Западного Кавказа на трассе магистрального трубопровода «Голубой поток» // Геоэкология. 2004. № 4. С. 351–360.
15. Никонов А.А. Опасные сейсмообусловленные рельефообразующие процессы в приморской зоне и на шельфе – научные и прикладные аспекты // Труды VI Щукинских чтений «Геоморфологические процессы и их прикладные аспекты». М.: Изд-во географического факультета МГУ, 2010. С. 331–333.
16. Палеосейсмология / Под ред. Дж.П. Мак Калпина: в 2 т.; пер. с англ. И.А. Басова, И.Ю. Лободенко, А.Л. Строма; предисл. к рус. изд. и науч. ред. А.Л. Стром. М.: Научный мир, 2011. Т. 2. 387 с.
17. Панасенко Г.Д., Загородный В.Г., Ассиновская Б.А., Кременецкая Е.О. Общие геологотектонические черты и сейсмичность Баренцева моря. Апатиты: Изд-во КФАН СССР, 1983. 69 с.
18. Степанова И.В. Методика оценки геологических и инженерных факторов формирования ущерба от последствий землетрясений (на примере Нефтегорского землетрясения): автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: Институт литосферы окраинных и внутренних морей, 1998. 22 с.
19. Стром А.Л. Количественные характеристики сейсмогенных разрывов и их использование в палеосейсмогеологии и инженерной геологии: дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, 1998. 186 с.
20. Стром А.Л. Оценка величин сейсмогенных смещений по разломам и вероятности их возникновения. Оценка и управление природными рисками //

Материалы Общероссийской конференции «Риск-2000». М.: Анкил, 2000. С. 37–41.

21. Стром А.Л. Проектирование переходов магистральных трубопроводов через активные разломы // Инженерные изыскания. 2014. № 3. С. 50–57.
22. Стром А.Л., Иващенко А.И., Кожурин А.И. Оценка расчетных значений сейсмогенных подвижек по разрывам, пересекающим трассы трубопроводов, и вероятности их превышения // Вопросы инженерной сейсмологии. 2008. Т. 35. № 2. С. 14–19.
23. Стром А.Л., Никонов А.А. Соотношение между параметрами сейсмогенных разрывов и магнитудой землетрясений // Физика Земли. 1997. № 12. С. 55–67.
24. Тектоника области сочленения Восточно-Европейского кратона и Западно-Арктической платформы / А.С. Балугев, Ю.А. Морозов, Е.Н. Терехов, Т.Б. Баянова, С.Н. Тюпанов // Геотектоника. 2016. № 5. С. 3–35. <https://doi.org/10.7868/S0016853X16050027>.
25. Чипизубов А.В. Выделение одноактных и одновозрастных палеосейсмодислокаций и определение по их масштабам магнитуд палеоземлетрясений // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 3. С. 386–398.
26. Active faulting offshore SE Spain (Alboran Sea): implications for earthquake hazard assessment in the Southern Iberian Margin / E. Gracia, R. Pallàs, J. Ignacio Soto, M. Comas, X. Moreno, E. Masana, P. Santanach, S. Diez, M. García, J. Dañobeitia, HITS scientific party // Earth and Planetary Science Letters. 2006. Vol. 241. No. 3–4. P. 734–749. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.11.009>.
27. Active thrust faulting offshore Boumerdes, Algeria, and its relations to the 2003 Mw 6.9 earthquake / J. Déverchère, K. Yelles, A. Domzig, B. Mercier de Lépinay, J.-P. Bouillin, V. Gaullier, R. Bracène, E. Calais, B. Savoye, A. Kherroubi, P. Le Roy, H. Pauc, G. Dan // Geophysical Research Letters. 2005. Vol. 32. No. 4. P. 1–5.
28. Gracia E., Dañobeitia J., Vergés J., PARSIFAL Team. Mapping active faults offshore Portugal (36 N–38 N): implications for seismic hazard assessment along the southwest Iberian margin // Geology. 2003. Vol. 31. No. 1. P. 83–86. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0083:MAFOPN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0083:MAFOPN>2.0.CO;2).
29. Hall W.J., Nyman D.J., Johnson E.R., Norton J.D. Performance of the Trans-Alaska pipeline in the November 3, 2002 Denali fault earthquake // Proceedings of the 6th U.S. Conference and Workshop on lifeline earthquake engineering. Long Beach, CA, USA: ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, 2003. 13 p.
30. Heezen B.C., Ewing M. Turbidity currents and submarine slips and the 1929 Grand banks earthquake // American Journal of Science. 1952. Vol. 250. P. 849–873.
31. Honegger D.G. Assessment of wave propagation effects on a 1925 pipeline with oxyacetylene girth welds // Proceedings of the 5th National Conference on

- lifeline earthquake engineering. Seattle, WA, USA: ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, 1999. P. 414–423.
32. Map and database of Quaternary faults in Venezuela and its offshore regions: open-file report No. 00-018 / F.A. Audemard M., M.N. Machette, J.W. Cox, R.L. Dart, K.M. Haller. Reston, VA, USA: United States Geological Survey, 2000. 78 p.
 33. O'Rourke M. Wave propagation damage to continuous pipe // Proceedings of the Technical Council on lifeline earthquake engineering Conference "Lifeline earthquake engineering in a multihazard environment". Oakland, CA, USA: ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, 2009. P. 1–9.
 34. Page R.A., Basham P.W. Earthquake hazards in the offshore environment // Ocean Science and Engineering. 1985. Vol. 10. No. 3–4. P. 195–352.
 35. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bulletin of the Seismological Society of America. 1994. Vol. 84. No. 4. P. 974–1002.

S.G. Mironyuk

Lomonosov Moscow State University, Moscow, mironyuksg@gmail.com

APPROACH TO QUANTITATIVE HAZARD ASSESSMENT FOR PIPELINE CROSSING AN ACTIVE FAULT (BARENTS SEA)

Abstract. One of the aspects of the problem of offshore linear structures construction is considered. An overview of pipeline accidents caused by earthquakes that have occurred in different seas is made. It is shown that the main cause of their damage is the uneven seismogenic shifts along the fault arising from strong earthquakes. A complete list of characteristics of active faults that need to be determined to ensure seismic stability of structures is given. Difficulties inherent in field work on mapping and studying seafloor fault zones are noted. The results of studies on the assessment of fault hazards are considered. Specific values of amplitudes of displacements, earthquake magnitudes at which they are possible, as well as conditional probabilities of seismogenic shifting are indicated. An algorithm for determining these parameters is shown on the example of the area in the so-called Karpinsky set of faults (Barents Sea).

Key words: seismogenic shifting; offshore pipeline; accident; Barents Sea.

Шполянская Н.А.

Ухтинский государственный технический университет, кафедра экологии, землеустройства и
природопользования, г. Ухта, nellashpol@yandex.ru

**КРИОЛИТОЗОНА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ В СИСТЕМЕ «СУША –
ШЕЛЬФ» КАК ИНФОРМАЦИЯ О СПОРНЫХ ВОПРОСАХ
ЧЕТВЕРТИЧНОЙ ИСТОРИИ РЕГИОНА**

Аннотация. Криолитозона на Российском севере возникла еще в плиоцене и существует в течение всего плейстоцена и голоцена. Поэтому она содержит в себе информацию о природных условиях четверичного периода. Анализ криолитозоны и подземных льдов дает ответы на некоторые спорные вопросы: на равнинах Российского севера не было ледникового покрова; в западном секторе был морской бассейн, образовавшийся под влиянием тектонических процессов в Северном Ледовитом океане; регрессии моря не совпадают с ледниковыми периодами, так же, как трансгрессии не совпадают с межледниковыми эпохами, так что их причиной не может быть гляциоэвстатика; поздневалдайская (сартанская) регрессия Арктического бассейна не превышала 50 м, а на большей части западного сектора она отсутствовала.

Ключевые слова: Арктический шельф; криолитозона; неотектоника; плейстоцен-голоцен; подземные льды; спрединг.

Споры по поводу четвертичной истории Российской Арктики ведутся не один век. Главные вопросы спора – это 1) существование в плейстоцене морского бассейна в Западном секторе Арктики; 2) соответствие между событиями «ледниковый период – регрессия моря», «межледниковый период – трансгрессия моря»; 3) гляциоэвстатика как главная причина изменения уровня Арктического бассейна; 4) размеры поздневалдайской (сартанской) регрессии Арктического бассейна; 5) Размеры плейстоценового покровного оледенения на Российском Севере. Изучение геологического строения и вещественного состава отложений пока что не привели к однозначным выводам. Требуются дополнительные аргументы. К таковым можно отнести криолитозону, возникшую еще в конце плиоцена и существующую поныне, в течение всего плейстоцена и голоцена. Подземные льды сохраняют в своем строении и свойствах черты эпохи их формирования, и тем самым содержат в себе информацию о прошлых эпохах. Изучение подземных льдов в отложениях разных эпох плейстоцена и голоцена в их генетическом разнообразии выявило определенные противоречия между фактическим материалом и рядом современных постулатов по четвертичной истории Российской Арктики. Данная публикация посвящена рассмотрению таких противоречий и пересмотру некоторых устоявшихся взглядов.

Фактический материал показывает следующее (рис. 1): главная черта криолитозоны на Российском Севере – это резкое различие между западным и восточным секторами Арктики [12]. На равнинах западного сектора преобладают пластовые подземные льды, восточного – полигонально-жильные.

В западном секторе развиты пластовые льды – крупные ледяные залежи, неодинаковые по генезису, но в большинстве своем изначально субаквального (субмаринного) происхождения. Представлены дислоцированными ледогрунтовыми образованиями с тонким равномерным сопряженным переслаиванием турбулентно закрученных грунтовых и ледяных слоев. В микростроении льда видны тонкие прослойки взвешенных минеральных частиц и кристаллы с четкими ненарушенными гранями. Все это – признак формирования в свободной субаквальной среде. Льды развиты в отложениях почти всех эпох плейстоцена (кроме поздневалдайской) – и ледниковых, и межледниковых. Возможность промерзания донных засоленных осадков непосредственно в море исследована автором ранее. Следует повторно отметить, что в донных отложениях арктических морей неоднократно возникают условия, когда температура донных осадков соответствует температуре замерзания грунтов данной солености. Было выявлено, что в арктических морях при глубине моря более 50 м устанавливается самая низкая температура донных отложений $-1,6 \div -1,8^{\circ}\text{C}$ [2]. Это связано с тем, что

холодная тяжелая соленая вода скапливается на глубине, где уже нет летнего прогрева. Соленость донных отложений закономерно снижается вниз по разрезу [5, 10], что обусловлено процессом термодиффузии в донных осадках. Этот процесс возникает потому, что тепловой поток из недр Земли инжектирует поток солей вслед за ним, снизу вверх, обратно температурному градиенту. Происходит рассоление донных грунтов и на некоторой глубине от дна моря температура и соленость отвечают условиям промерзания грунтов. По мере накопления донных осадков слой, где происходит промерзание, передвигается вверх. Так нарастает мерзлая толща на дне моря. Подтверждением служит шельф Баренцева и Карского морей, где сейчас на глубоких участках идет современное новообразование донной мерзлоты [6, 7, 9].

У Карских Ворот в Баренцевом море при глубине моря более 70 м скважины вскрыли растущую современную мерзлоту. В составе льда преобладает хлор и натрий, и это показывает, что лед образовался из морской воды. На Русановской площади в Карском море при глубине моря 114 м тоже вскрыта растущая мерзлота. Видны дислокации на сейсмограммах и в керне.

Таким образом, весь материал свидетельствует о трансгрессивном режиме и морском осадконакоплении в течение большей части плейстоцена – вне зависимости от климатического характера эпохи.

То, что регион сложен преимущественно морскими отложениями, неоднократно доказано А.И. Поповым, Г.И. Лазуковым, И.Д. Даниловым и др. Дополнительным доказательством являются результаты грануломинералогического анализа (рис. 2). Равномерное наложение минералов разной крупности друг на друга говорит о хорошей сортировке материала и морском генезисе отложений [11].

Реликтовая мерзлота – как свидетель осушения территории в поздневалдайскую эпоху – тоже существует на западно-арктическом шельфе, но только на мелководьях, например, на юге Печорского моря. Показательны температуры донных грунтов. У Карских ворот температура имеет положительный вертикальный градиент, что подтверждает нарастание мерзлоты. А на площади Варандей температурная кривая безградиентна, что указывает на деградацию мерзлоты, подтверждая, что это реликтовая мерзлота.

В поздневалдайскую эпоху Западный сектор развивался в континентальном режиме, на что указывает широкое распространение полигонально-жильных льдов (сугубо континентальных образований). Кроме того, как антагонисты ледников они указывают и на отсутствие в это время покровного оледенения. Это же вытекает и из материалов [9] – разрезов донных отложений в Печорском море: ни в одном разрезе нет ледниковых отложений. Разрез до 130 м представлен морскими осадками, начиная с раннего плейстоцена, и только в эпохи осушения на мелководье, начиная с зырянского времени, появляются аллювиальные, аллювиально-морские отложения, и в голоцене – снова морские.

Рис. 2. Грануломинералогический анализ грунтов. Марре-Сале (западная часть п-ова Ямал) [11]. Планомерное наложение минералов разной крупности один на другой говорит о хорошей водной сортировке и морском генезисе отложений

В восточном секторе распространены озерно-аллювиальные равнины, и развит полигональный рельеф с полигонально-жильными льдами. Вмещающие отложения – континентальные, начиная с плиоцена. Это значит, что восточный сектор Арктики развивался в континентальном режиме в течение всего плейстоцена и в ледниковые, и в межледниковые эпохи. Соответственно, в регионе в течение плейстоцена не было покровных ледников. Полигонально-жильные льды – антагонисты оледенения. Морозобойное растрескивание грунтов возникает при очень высоких температурных градиентах, возможных только при отсутствии ледника с его теплоизолирующим влиянием.

На восточно-арктическом шельфе, мелком (20–40 м), в отличие от западно-арктического, криолитозона реликтовая. Здесь прослеживается затопленный ледовый комплекс сартанского возраста [8]. Он прослеживается и на сейсмограммах (рис. 3) [4].

Затопленный полигональный рельеф показывает, что на осушенном шельфе не было покровного оледенения. В то же время, у внешней кромки шельфа (см. рис. 1), при глубине моря более 50 м, российско-германскими работами в море Лаптевых был вскрыт лед субмаринного генезиса [13]. Это, кстати, подтверждает прямую связь субмаринного льдообразования с глубиной моря.

Рис. 3. Сейсмоакустический профиль на шельфе моря Лаптевых. Виден затопленный полигональный рельеф [4]

Сопоставление фактического материала. Из всего материала следует главный вывод: не прослеживается принятая ныне синхронность событий «ледниковый период – регрессия моря», «межледниковый период – трансгрессия моря». Это исключает признанную сейчас причину колебания уровня моря – гляциоэвстатику. Наиболее вероятно, что изменения уровня Арктического бассейна контролируются тектоническими процессами в Северном Ледовитом океане. Океан расположен на стыке двух литосферных плит – Евразийской на западе и Амеразийской на востоке. Это сформировало две разнородные океанические впадины – западную с океанической корой (ее замыкает хребет Ломоносова) и восточную с преимущественно континентальной корой [1]. В западной впадине расположен срединно-океанический хребет Гаккеля, сформировавшийся в начале плиоцена 9,5 млн лет назад. Спрединг в хребте, начавшийся в конце плиоцена, приводил к уменьшению объема прилегающих впадин, из-за чего большие объемы воды вытеснялись на континент. В раннем и среднем плейстоцене на Баренцево-Карский шельф, непосредственно примыкающий к области срединно-океанического хребта, было вытеснено много океанической воды, которая на равнинной суше распространилась далеко на юг. На Европейском севере России и в Западной Сибири образовался обширный морской бассейн (см. рис. 1).

Восточная часть Арктического бассейна представлена более устойчивой континентальной корой. Это снижает ее динамичность. Спрединг в хребте Гаккеля с востока прерывается трансформным разломом (Хатанско-Ломоносовским), к востоку от которого затухают движения земной коры (см. рис. 1). Восточный сектор Российской Арктики развивался в достаточно стабильном режиме.

Что касается размеров последней регрессии Арктического бассейна, то, исходя из приведенных фактов, сартанская регрессия не могла превышать 50 м, а в ряде мест и вообще отсутствовала.

Восточный шельф с глубиной моря 20–40 м осушался весь. При регрессии моря до изобаты 100–120 м, как считается сейчас, должна была бы осушиться часть материкового склона за пределами внешней кромки шельфа. Однако у кромки шельфа встречен изначально субмаринный лед, значит, осушения здесь не было. Так что регрессия восточного шельфа не могла превышать 40–50 м.

На западном шельфе осушение коснулось только отдельных мелководных участков. Это вытекает из разрезов в Печорском море [9]: на глубоких (> 50 м) участках моря разрезы представлены целиком морскими отложениями, содержащими пластовые льды (скв. 480, 481, 482), значит, осушения не было; на мелководьях (10–30 м глубины) имеется врез континентальных отложений (аллювиальных и аллювиально-морских), но не более 45 м (скв. 210, 383, 384).

На малое осушение указывает и батиметрический анализ морей арктического шельфа, проведенный Б.А. Казанским из Тихоокеанского института океанологии [3]. Он выявлял плотность распределения 100-метровых глубин на Арктическом шельфе. По его результатам, на шельфе Баренцева моря максимума плотности распределения глубин 100 м вообще нет. Из этого следует, что шельф не осушался на больших площадях. Если бы он осушался до 100–120 м, то обязательно сформировались бы устойчивые 100-метровые поверхности, которые сохранились бы на затопленном шельфе. Следовательно, осушались лишь отдельные разрозненные мелководные участки вроде юга Печорского моря.

Выводы

Главные выводы из проведенного исследования можно сформулировать как ответы на спорные вопросы геологической истории Российской Арктики.

1. Покровного оледенения на равнинах Российской Арктики в плейстоцене не было к востоку от п-ова Канин.

2. Морской бассейн в Западной Субарктике в плейстоцене существовал.

3. Регрессия моря не связана с ледниковой эпохой, так же, как трансгрессия моря не связана с межледниковой эпохой.

4. Изменения положения береговой линии имеют тектоническую природу. Роль гляциоэвстатики практически не прослеживается.

5. Регрессия Арктического бассейна в сартанскую эпоху не превышала 50 м, а на больших пространствах западного сектора отсутствовала.

Список литературы

1. Базовая модель тектонического развития Арктики для установления внешней границы континентального шельфа / Н.П. Лаверов, Л.И. Лобковский, М.В. Кононов, Н.Л. Добрецов, В.А. Верниковский, С.Д. Соколов, Э.В. Шипилов // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2(6). С. 4–19.

2. Жигарев Л.А. Океаническая криолитозона. М.: Изд-во Московского университета, 1997. 318 с.
3. Казанский Б.А. Сравнительный батиметрический анализ шельфа Арктических морей по цифровым данным ЕТОРО 5 // Материалы международной конференции «Природа шельфа и архипелагов Европейской Арктики». М.: ГЕОС, 2008. Вып 8. С. 154–156.
4. Кассымская М.В. Реликтовый термокарстовый рельеф и талики шельфа моря Лаптевых: автореф. дис... канд. геол-мин. наук. М.: МГУ, 2010. 25 с.
5. Комаров И.А., Луковкин Д.С. Методика количественной оценки влияния процессов солепереноса на ход деградации субаквальных многолетнемерзлых пород шельфа Баренцева моря // Материалы второй конференции геокриологов России. М.: Изд-во Московского университета, 2001. Т. 2. С. 154–163.
6. Мельников В.П., Спесивцев В.И. Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск: Наука, 1995. 195 с.
7. Многолетнемерзлые породы шельфа Печерского и Карского морей: генезис, состав, условия распространения и залегания / С.И. Рокос, А.Г. Длугач, Д.А. Костин, С.Н. Куликов, А.С. Локтев // Инженерные изыскания. 2009. № 10. С. 38–41
8. Реконструкция палеогеографических условий шельфа моря Лаптевых для позднеплейстоцен-голоценового гляциоэвстатического цикла / Н.Н. Романовский, А.В. Гаврилов, А.Л. Холодов, Х-В. Хуббертен, Х. Кассенс // Криосфера Земли. 1997. Т. I. № 2. С. 42–49.
9. Рокос С.И., Костин Д.А., Куликов С.Н. Стратиграфическое расчленение толщи новейших отложений шельфа Печорского моря по материалам инженерно-геологического бурения // Материалы VI Международной конференции «Новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и Мирового океана». СПб.: ВНИИОкеангеология, 2018. С. 68–69.
10. Шишкина О.В. Иловые воды // Химия океана. Т. 2. Геохимия донных осадков. М.: Наука, 1979. С. 252–290.
11. Шполянская Н.А. Стрелецкая И.Д. Сурков А.В. Сравнительный генетический анализ пластовых льдов и вмещающих их плейстоценовых отложений на севере Западной Сибири // Геоэкология. 2007. № 3. С. 212–224.
12. Шполянская Н.А. Плейстоцен-голоценовая история развития криолитозоны Российской Арктики “глазами” подземных льдов. М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. 344 с.
13. The Transdrift VIII Expedition to the Laptev Sea: the shelf drilling campaign of “Laptev Sea System 2000” / Н. Kassens, Н. Bauch, S. Drachev, A. Gierlichs, F. Niessen, E. Taldenkova, A. Ruodoi, I. Thiede, M. Wessels // Terra Nostra. 2000. No. 8. P. 39–40.

N.A. Shpolyanskaya

Ukhta State Technical University, Department of Ecology, Land and Nature Management,
Ukhta, nellashpol@yandex.ru

**CRYOLITHOZONE OF THE RUSSIAN ARCTIC IN THE “LAND –
SHELF” SYSTEM AS AN INFORMATION ABOUT DISPUTED ISSUES
OF THE QUATERNARY HISTORY OF THE REGION**

Abstract. The cryolithozone in the Russian North originated in the Pliocene and exists throughout the Pleistocene and Holocene. Therefore, it contains information about the natural conditions of the Quaternary period. The analysis of the permafrost zone and underground ice provides answers to some controversial questions: there was no ice sheet on the plains of the Russian North; in the western sector there was a sea basin formed under the influence of tectonic processes in the Arctic basin; sea regressions do not coincide with ice ages, just as transgressions do not coincide with interglacial epochs, so glacioeustatics cannot be their cause; Late Valdai (Sartan) regression of the Arctic basin did not exceed 50 m, and it was absent in most of the western sector.

Key words: Arctic shelf; cryolithozone; neotectonics; Pleistocene-Holocene; underground ice; spreading.

Шматков А.А., Шматков А.Г.

Marine Geo Service (ООО «МГ-Сервис»), г. Москва, ash@marinegeoservice.ru

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО- ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Аннотация. Для повышения качества инженерно-геологических изысканий на акваториях морей требуются технологии, способные повысить эффективность геофизических съемок и надежность получаемых данных. Одним из методов решения этой проблемы может быть использование телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА). Развитие ТНПА позволило значительно улучшить их функциональные возможности и эффективность как на этапе геофизических исследований, так и при визуальных и инструментальных исследованиях. Многие современные инженерно-геологические изыскания на акваториях морей основываются на использовании различных данных, полученных с помощью подводных аппаратов. Однако использование стандартных ТНПА не всегда возможно из-за ряда недостатков и их следует модернизировать с использованием дополнительного оборудования.

Ключевые слова: телеуправляемый необитаемый подводный аппарат (ТНПА); инженерные изыскания.

Введение

Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА) могут применяться на различных стадиях выполнения морских инженерно-геологических изысканий. Так, например, стандартная практика оценки опасности инженерно-геологических явлений и процессов основана на итерационном подходе, при котором обнаруженные объекты изучаются все с большей детальностью. На этапе визуальной заверки обнаруженных объектов применение ТНПА открывает широкие возможности для получения качественно новой информации, поскольку результаты фото- и видеосъемок позволяют однозначно идентифицировать объекты, обнаруженные дистанционными методами [2]. Также за последние годы в отрасли накоплен значительный опыт проведения работ с использованием ТНПА по обнаружению и визуальному обследованию взрывоопасных предметов (ВОП), а также устранению остаточной минной опасности [1].

Развитие технологий передачи данных и энергии позволило существенно расширить технические возможности подводных робототехнических комплексов в области обеспечения геофизических и гидрографических работ при выполнении инженерно-геологических изысканий как при реализации глубоководных проектов, так и для работы на шельфе.

Стандартное и дополнительное оборудование ТНПА

Практически любой современный ТНПА осмотрового класса с возможностью несения полезной нагрузки (IMCA class II) или рабочего класса (IMCA class III) даже в базовой комплектации обладает достаточным набором оборудования для выполнения визуального осмотра и ряда других задач. Однако следует отметить, что характеристики навигационного и вспомогательного оборудования, а также имеющиеся на борту ТНПА интерфейсы, не всегда дают возможность выполнения более сложных задач в рамках инженерных изысканий и, например, научных исследований. Поэтому для расширения функционала подводных аппаратов и подключения различных датчиков и сенсоров необходимо применение дополнительных устройств – мультиплексоров, подключаемых к выделенным волоконно-оптическим каналам в кабеле ТНПА.

Использование технологии спектрального уплотнения оптических каналов позволяет передавать по одному физическому оптическому волокну до 16 и более независимых потоков данных, которые могут быть затем преобразованы в различные интерфейсы. Так, например, любые современные мультиплексоры обеспечивают двухсторонний обмен данными с ТНПА по интерфейсам RS-232/485/422, Ethernet 10/100 Mbit, 1 GigE Ethernet, а также передачу 5V TTL триггера (1PPS, импульс синхронизации). Это дает возможность использовать подводный аппарат как носитель практически любого геофизического (магнитометры, профилографы, гидролокаторы и т.д.), гидрографического (например, многолучевой эхолот), а также любого другого научного оборудования.

Например, для выполнения инспекции подводных трубопроводов, месторождений и других инфраструктурных объектов ТНПА в обязательном порядке должен быть оборудован многолучевым эхолотом, гидролокатором секторного обзора, гидролокатором бокового обзора (ГЛБО), вперёдсмотрящим эхолотом, звуковизором, профилографом и т.д. При выполнении обследований трасс трубопроводов или археологических изысканий на ТНПА дополнительно могут устанавливаться магнитометрические и трехмерные акустические системы.

Необходимо отметить главное преимущество ТНПА в качестве носителя геофизического и гидрографического оборудования – подводный аппарат может с высокой точностью выполнять съемку непосредственно у морского дна. Вследствие этого повышается разрешающая способность, уменьшаются акустические шумы, а в некоторых случаях может повышаться общая производительность.

Новые возможности ТНПА для выполнения инженерных изысканий

Совершенствование технологий позволило перейти от аналоговых камер низкого разрешения к цифровым камерам HD и Full HD формата, а в ряде случаев оправдано применение и более высокоразрешающих камер (например, 4K). Это, в свою очередь, дает возможность применения получаемых данных для построения объемного (трехмерного) изображения поверхности обследуемого объекта и получения детальной 3D-модели с текстурой высокого качества. Это, например, может дать дополнительную информацию о характеристиках и состоянии обследуемого объекта, а также позволяет производить математический анализ текстуры поверхности, что может использоваться при калибровке систем машинного зрения и автоматизированной классификации данных ГЛБО.

В случае оснащения ТНПА линейным лазером и дополнительной камерой для записи синхронизированного фото/видеоизображения появляется возможность сканирования поверхности, по которой движется ТНПА, и построения детальной 3D-модели с точностью до первых миллиметров. Однако в этом случае повышаются требования к навигационному обеспечению работ и требуется применение дополнительных датчиков – доплер-лага (DVL) и инерциальной системы (INS).

Применение феррозондовых систем с большим количеством датчиков, установленных на специализированных ТНПА типа «МагМастер» (Marine Geo Service) (рис.), позволяет значительно снизить время выполнения полевых работ и увеличить надежность обнаружения взрывоопасных предметов за счет как производительности морской магнитной съемки, так и одновременной регистрации видеоданных, что дает возможность получать более достоверную информацию об объектах техногенного происхождения на морском дне [1].

а

б

Рис. Специализированный ТНПА «МагМастер» в транспортном (а) и рабочем (б) положениях [1]

Выводы

Современные ТНПА обладают потенциалом для выполнения широкого круга задач в области инженерно-геологических изысканий на акваториях от шельфа до глубоководного океанического дна. Для успешного подключения различного оборудования к носителю (ТНПА) необходимо, чтобы на его борту были предусмотрены все необходимые интерфейсы или имелась возможность установки дополнительных мультиплексоров.

Список литературы

1. Шматков А.А., Антонов Н.А. Опыт применения специализированного ТНПА для поиска взрывоопасных предметов (ВОП) при выполнении морских инженерных изысканий // Тезисы конференции «Морские технологии 2021». Геленджик, 2021. С. 1–5.
2. Шматков А.Г., Шматков А.А. Применение телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов при проведении инженерно-геологических изысканиях: стандартная практика и инновации // Труды Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии». Тверь: Полипресс, 2018. С. 777–779.

A.A. Shmatkov, A.G. Shmatkov

Marine Geo Service (MG-Service LLC), Moscow, ash@marinegeoservice.ru

NEW OPPORTUNITIES OF REMOTELY OPERATED UNDERWATER VEHICLES FOR SOLVING ENGINEERING-GEOLOGICAL SURVEY TASKS

Abstract. The success of the offshore engineering-geological surveys requires technologies capable to increase the survey efficiency and quality of the results. One of such technologies can be application of remotely operated underwater vehicles (ROV). The development of ROVs made it possible to improve significantly their functionality and efficiency both at the stage of geophysical surveys and during visual and instrumental survey. The modern offshore engineering-geological surveys are based on a comprehensive analysis of various data obtained by underwater vehicles. However, the use of the standard ROVs is not always feasible due to a number of disadvantages and they should be upgraded with using additional equipment.

Key words: remotely operated underwater vehicles (ROVs); engineering surveys.

Макаров А.В.

ООО «Деко-геофизика», г. Москва, amakarov3@gmail.com

ОБРАБОТКА ВИДЕОСЪЕМКИ ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ ЛАНДШАФТОВ

Аннотация. Рассмотрены основные методы подводной видеосъемки, применяемые для учета донной фауны и картирования подводных ландшафтов. Изучены преимущества и недостатки обзорного аппарата Gladius mini, использованного во время полевых работ 2021 г. для изучения подводных ландшафтов в окрестностях Беломорской биологической станции имени Н.А. Перцова МГУ имени М.В. Ломоносова. Проанализированы результаты обработки видеоматериалов, полученных с помощью этого аппарата.

Ключевые слова: подводный ландшафт; подводная видеосъемка; телеуправляемый необитаемый подводный аппарат (ТНПА); биологическая станция; Белое море.

Комплексный подход к изучению морского дна, кроме геофизических исследований осадочных пород, отбора проб грунта для изучения осадка и населяющих его живых организмов, гидрологических измерений, включает в себя видеосъемку подводных ландшафтов. Оработка этих методов производилась на полигоне, расположенном на севере Республики Карелия, на побережье Белого моря, рядом с Беломорской биологической станцией имени Н.А. Перцова МГУ имени М.В. Ломоносова (ББС МГУ) (рис. 1).

Рис. 1. Точки отбора проб грунта на полигоне у Крестовых о-вов, в которых производилась подводная видеосъемка с помощью ТНПА Gladius mini

В окрестностях ББС МГУ подводная фото и видеосъемка проводится много лет. Основные задачи, которые она решает, связаны с фото- и видеофиксацией живых организмов и процессов, происходящих на морском дне. Кроме съемки для научно-популярных изданий, научных публикаций и исследований морфологического характера осуществляется съемка морского дна для количественного учета донной фауны и характеристики подводных ландшафтов. Для такой работы, в случае стационарной фотосъемки, используются масштабные рамки, ограничивающие определенную площадь дна в кадре. Также проводится маршрутная видеосъемка с использованием буксируемых комплексов и телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) (рис. 2).

Рис. 2. Буксируемые комплексы подводной видеосъемки (а) и ТНПА (б)

Буксируемые комплексы подводной видеосъемки используются для съемки дна на прямолинейных длительных маршрутах по курсу судна-носителя. Работают на ходу, не могут останавливаться и двигаться самостоятельно. Легкие ТНПА могут работать только со стоящего судна, радиус действия ограничен длиной кабеля. Они обладают свободой маневра и могут работать от автономных аккумуляторов, что позволяет использовать их на маломерных судах.

Разработана методика маршрутного учета донной фауны с помощью ТНПА [1], которая позволяет получить данные, пригодные для статистической обработки. Применяя эту методику, можно получить количественные оценки плотности популяций отдельных видов.

Современные ТНПА, используемые для маршрутной съемки, такие как аппараты серии «Гном» и «РБ», подключаются к бортовой сети судна-носителя, они оборудованы измерительными линейками и лазерами для масштабирования объектов на дне.

Во время полевого сезона 2021 г. в окрестностях ББС МГУ, на полигоне у Крестовых о-вов (см. рис. 1) была проведена работа по апробации обзорного аппарата Gladius mini производства Chasing Innovation (рис. 3).

Рис. 3. ТНПА Gladius mini

Этот ТНПА оснащен автономным аккумулятором, телевизионным кабелем длиной 100 м и может производить качественную съемку в формате 4K и Full HD со скоростью 120 кадров/с. С подводного модуля поступает телеметрическая информация о глубине, температуре воды, компасном курсе и наклоне аппарата. Также передается видеоизображение, которое отображается на смартфоне оператора. Аппарат производит запись фото и видеоизображения, после обработки которого можно получить следующие данные:

1. Характеристика макро и микрорельефа дна.
2. Характеристика механического состава грунта (ил, песок, щебень, скала).
3. Условная видимость под водой (по наличию или отсутствию взвешенных частиц).
4. Наличие придонного течения (по сносу аппарата).
5. Наличие следов жизнедеятельности животных.
6. Проективное покрытие водорослей по глазомерной оценке.
7. Наличие и количество животных на дне.

При работе с ТНПА Gladius mini необходимо учитывать, что аппарат не оснащен лазерными указками для определения размера объектов под водой. Поэтому трудно определить размер кадра для учета животных на некоторой площади. Комплекс не имеет собственного монитора и видеосигнал транслируется на смартфон оператора по Wi-Fi-связи. Периодически Wi-Fi-связь разрывается. Комплекс возможно применять только когда нет сильного течения. Несмотря на эти недостатки новейшая система стабилизации по направлению и глубине позволяет эффективно использовать время, не

отвлекаясь на выравнивание аппарата на курсе. Аппарат способен двигаться в наклонном положении, поэтому можно хорошо рассмотреть объекты на дне, а наличие автономного аккумулятора в подводном модуле позволяет использовать ТНПА с небольших лодок без подключения к бортовой сети или генератору.

Отсутствие инструментов масштабирования не позволяет получить точную оценку плотности популяций видов макробетоса. Тем не менее, обзорные видеонаблюдения помогают выявлять отдельные элементы подводного ландшафта и фиксировать наличие фаций, не выявляемых другими методами, прежде всего – фации твердых грунтов и ассоциированную с ними фауну [1] (рис. 4).

Рис. 4. Фауна твердых грунтов на видеокadre ТНПА Gladius mini

Для того чтобы данные, полученные с помощью обзорного ТНПА, были максимально пригодны для дальнейшей обработки во время дешифрирования видеозаписей были соблюдены следующие правила:

1. На видеозаписи выделялись 10-секундные фрагменты прямолинейного движения с постоянной скоростью.
2. Каждый фрагмент просматривался с остановками для оценки ландшафта.
3. Производился подсчет количества животных или следов их жизнедеятельности на каждом фрагменте.
4. Осуществлялась глазомерная оценка проективного покрытия водорослей (при их наличии) или фрагментов отмерших водорослей относительно видимой площади кадра.

5. Из просмотра исключались фрагменты с остановками аппарата, маневрами, разрывом связи, резким ухудшением видимости из-за взвешенных частиц.

6. В конце делалась корректировка количественного учета объектов на каждом фрагменте без перекрытия.

Для подобных видеозаписей применяется метод относительного учета численности. Нормированные на единицу времени показатели относительного обилия трансформируются в баллы обилия или в условные единицы количества особей на время записи. Такие данные используются для выявления пространственного распределения видов, сопряженности нескольких видов и биотопической приуроченности видов и их группировок [2].

Благодаря высокому качеству видеосъемки ТНПА Gladius mini на отснятых кадрах можно достоверно распознать животных, обитающих на морском дне, таких как:

1. Некоторые губки (*Leucosolenia complicata* (Montagu, 1812), *Halichondria panicea* (Pallas, 1766), *Phakettia cribrosa* (Micluch-Maclay, 1870), *Polymastia arctica* (Merejkovsky, 1878), *Isodictya palmata* (Ellis & Solander, 1786)).

2. Гидроидные полипы (*Tubularia indivisa* (Linnaeus, 1758)).

3. Сидячие медузы (*Lucernaria quadricornis* (Müller, 1776), *Lucernaria bathyphila* (Haeckel, 1880)).

4. Коралловые полипы (*Stomphia coccinea* (O.F. Müller, 1776), *Metridium senile senile* (Linnaeus, 1767), *Halcompa duodecimcirrata* (Sars, 1851), *Cerianthus lloydii* (Gosse, 1859), *Gersemia fruticosa* (Sars, 1860)).

5. Многощетинковые черви (ямки и холмики *Arenicola marina* (Linnaeus, 1758), венчики щупалец *Branchioma arctica* (Ditlevsen, 1937), *Chone infundibuliformis* (Kroyer, 1856), трубочки и венчики щупалец *Pseudopotamilla reniformis* (Linnaeus, 1788)).

Также хорошо распознаются некоторые виды моллюсков, мшанок, ракообразных, иглокожих, асцидий и донных рыб.

Хорошо различимы следы, которые оставляет на илистом грунте рак-отшельник *Pagurus pubescens*. Видны палочки-мачты, которые делают *Diopados bispinis*. Распознаются поселения рачков *Crassikorophium bonnellii* в виде скопления коротких трубочек на илистом грунте. Также видны следы кормления тюленей – ямы в илистом грунте, которые они оставляют во время поиска моллюсков.

Результаты обработки видеосъемки заносят в таблицу, в которой отображают координаты точки погружения аппарата, телеметрические данные по каждому фрагменту, характеризуется ландшафт, рельеф, состав грунта, покров водорослей и видовой состав донной фауны с количеством особей (колоний) на каждый 10-секундный фрагмент записи прямолинейного движения аппарата (рис. 5).

Широта:	Долгота:	Дата:	Судно:	Тип аппарата:	№ станции:	Оператор:	Расшифровывали:	Видеофайл:	Качество/скорость съемки	Макрорельеф:
66.530768	33.180721	25.07.2021	Зодиак	Gladius-mini	28	Макаров А.В.	Макаров А.В.	GLD50725_113001773.r	Full HD/120 к/с	Илистая равнина
11:30										
t начала	t фрагмента	Компасный курс	Глубина м	Субстрат	Примечания	arenicola marina (ямки)	Вероятно Corophiida	Mysis oculata	Urasterias	Pagurus (след)
0:00	10	147	22,6	Ил	Встречаются от,	4	Повсеместно на илистом дне			
0:10	10	240	22,6	Ил	Встречаются от,	9	Повсеместно на илистом дне	6		1
0:20	10	232	22,6	Ил	Встречаются от,	3	Повсеместно на илистом дне	8		
0:30	10	241	22,6	Ил	Встречаются от,	2	Повсеместно на илистом дне	4		2
0:40	10	231	22,6	Ил	Встречаются от,	5	Повсеместно на илистом дне	3	1	1
0:50	10	245	22,6	Ил	Встречаются от,	10	Повсеместно на илистом дне	6		1
1:00	10	245	22,6	Ил	Встречаются от,	7	Повсеместно на илистом дне	6		1
1:15	10	297	22,6	Ил	Встречаются от,	4	Повсеместно на илистом дне	5		1
1:43	10	0	22,6	Ил	Встречаются от,	5	Повсеместно на илистом дне	6		
1:55	10	337	22,6	Ил	Встречаются от,	5	Повсеместно на илистом дне	11		
2:20	10	344	22,6	Камень, ил	Много обрывков листьев зоостеры		Отчетливо видны трубочки на заиленной поверхности камня			

Рис. 5. Образец таблицы данных по обработке видеозаписей ТНПА

При работе с ТНПА Gladius mini не представляет труда подсчитать животных на мягких и твердых грунтах на глубинах более 15 м. Если съемка ведется на меньших глубинах, в «зоне красных водорослей», то на каменистых грунтах наблюдается сплошной покров донных организмов, которые плотно обрастают твердый субстрат. В этом случае невозможно точно подсчитать число особей (отдельных колоний) каждого вида, поэтому производится глазомерная оценка проективного покрытия для некоторых организмов (губки, водоросли, гидроидные полипы) и приблизительная оценка численности отдельных представителей макробентоса, которые являются фоновыми для данной фации. В настоящее время идет разработка метода автоматической обработки подобных видеоизображений с помощью обучаемых алгоритмов.

Для ТНПА, производимых компанией Chasing Innovation, предусмотрено различное навесное оборудование, в т.ч. лазерные измерители. Аппараты, оснащенные такими приспособлениями, входят в линейку профессионального оборудования и относятся к дорогостоящим. Легкие аппараты, такие как ТНПА Gladius mini находятся в «средней» ценовой категории. Они позиционируются, как обзорные, но благодаря удобству в работе и высокому качеству фото и видеосъемки с их помощью возможно решать ряд задач для научных работ по изучению подводных ландшафтов. Это позволило сделать некоторые выводы по использованию аппаратов подобного класса:

1. Применение легких ТНПА возможно для описания типов подводных ландшафтов на глубинах до 100 м.
2. Количественный учет донной фауны без инструментов масштабирования (лазерных указок) дает приблизительную оценку плотности населения дна.
3. Видеосъемка в хорошем качестве позволяет подробно описывать локальные сообщества донных организмов в каждом типе подводного ландшафта.
4. Как один из методов комплексного изучения морского дна подводная видеосъемка с легких ТНПА вносит весомый вклад в описание подводных ландшафтов наряду с измерением течений, применением гидролокаторов бокового обзора и отбором проб грунта.

Список литературы

1. Мокиевский В.О. Подводная видеосъемка как метод количественного изучения бентоса // Материалы XIV Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2015)». М.: АПР, 2015. Т. II. С. 311–315.
2. Мокиевский В.О. О методах количественной обработки видеозаписей для учета макробентоса // Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ–2019)». М.: Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2019. Т. II. С. 283–285.

A.V. Makarov

Deco-Geophysics LLC, Moscow, amakarov3@gmail.com

VIDEO PROCESSING FOR MAPPING UNDERWATER LANDSCAPES

Abstract. The main methods of underwater video filming used for accounting of bottom fauna and mapping of underwater landscapes are considered. The advantages and disadvantages of the Gladius mini survey apparatus, used during field work in 2021 to study underwater landscapes in the vicinity of the White Sea biological station, Lomonosov Moscow State University, have been studied. The results of processing video materials obtained with this apparatus are analyzed.

Key words: underwater landscape; underwater video filming; remotely controlled unmanned underwater vehicle (ROV); biological station; White Sea.

**Якушкин О.О.^{1,2}, Павлова Е.Д.^{1,2}, Лаврова А.К.³, Пен Е.А.²,
Фрих-Хар А.Ю.⁴, Терехина Я.Е.³, Буланова А.А.³, Шабалин Н.В.⁴,
Седова О.С.¹**

¹Санкт-Петербургский государственный университет, факультет прикладной математики – процессов управления, кафедра компьютерного моделирования и многопроцессорных систем,

г. Санкт-Петербург, o.yakushkin@spbu.ru

²ООО «Биогеохаб», г. Санкт-Петербург

³МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

⁴ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова», г. Москва

АНАЛИЗ ПОДВОДНОЙ ВИДЕО- И ФОТОСЪЕМКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Аннотация. В 2021 г. на территории РФ были приняты своды правил, обязывающие разработчиков проводить исследование флоры и фауны на месте проведения строительства. На данный момент необходимый анализ производится вручную, что требует много средств и времени. В рамках данной работы для цифровизации методов построения подводных карт авторам удалось создать ряд сервисов, предназначенных для автоматизации декомпозиции видеофайлов, структурированного извлечения информации, замещения компонентов кадра, улучшения качества видеозаписи, детектирования плохо описанных объектов, проведения картографического анализа подводной съемки, а также 3D-реконструкции. Таким образом, были разработаны модули, позволяющие автоматизировать решение задачи анализа подводной видео и фотосъемки.

Ключевые слова: искусственный интеллект; распознавание объектов; обработка подводных изображений; анализ биогеоценоза для строительства на континентальном шельфе.

Введение

Нетронутая человеком природа – это самовосстанавливающийся и саморегулирующийся механизм. Ее освоение может привести к истреблению целых видов животных, и, как следствие, к дисбалансу и гибели всей экосистемы. Поэтому при строительстве подводных объектов важно учитывать особенности биогеоценоза в зоне проведения работ, т.е. осуществлять анализ количества обитателей, типа бентоса и взаимосвязей между организмами на исследуемой территории. В 2021 г. в РФ был принят приказ об утверждении СП 504.1325800.2021, а также СП 502.1325800.2021 [1, 2], которые регулируют правила строительства и предварительного анализа морского дна на месте застройки.

На данный момент большая часть необходимых исследований проводится вручную: просматриваются многочасовые видеозаписи для поиска конкретных объектов, производится реконструкция метаданных по кадрам (начиная от температуры за бортом, заканчивая траекторией движения подводной камеры). Это занимает много времени, что, либо тормозит строительство объекта, либо требует большего количества средств для найма

персонала. Помимо этого, данные передаются в формате, не подготовленном для автоматической обработки. Поэтому для возможности последующего анализа необходима цифровизация данных, т.е. приведение их в форматы, с которыми в дальнейшем может быть произведена работа в автоматическом режиме.

Компоненты решения

В рамках данной работы авторами был предложен ряд сервисов для цифровизации методов построения карт морского дна и его обитателей. Они доступны в виде как готового программного продукта, так и модулей, готовых для интеграции в инфраструктуру заказчика, направленных на решение задачи автоматизированного анализа подводной фото и видео съемки.

Сервисы включают в себя:

1. Сервис декомпозиции видеофайлов разбивает видеозаписи на набор отдельных изображений или же предоставляет данные «пачками» в случае работы с потоковым видео.

2. Сервис структурированного извлечения информации из кадра с помощью матрицы разметки выделяет информационную составляющую, присутствующую на карте, привязывая найденные поля и значения ко времени. Таким образом, осуществляется извлечение информации о положении подводной камеры, ее направлении, глубине, дате, времени и прочих данных, содержащихся в видеопотоке.

3. Inpainting сервис (замещение фрагментов изображений) используется для исключения из видео нежелательных объектов. С помощью предоставленной пользователем маски для первого кадра видеозаписи, где явным образом в белых тонах выделены нежелательные объекты, а в черных – подлежащие исследованию, в автоматизированном режиме генерируется набор масок для всего видеофайла. Это позволяет выделенным объектам быть подвижными. Затем выполняется операция закраски выделенных под масками элементов изображения с учетом их контекста, происходящая минимально заметным способом. Таким образом предложенное решение позволяет удалять с кадров статические и динамические объекты: линейки, рейки, механические части роботов и др.

4. Для работы с изображениями подводного мира часто приходится решать проблемы предобработки изображения. Например, повышать их разрешения для более качественного просмотра мелких деталей, бороться с шумами, такими как пузырьки и мелкая растительность, а также осуществлять цветокоррекцию для более качественного отображения информации на кадре. Авторами было разработано решение, позволяющее производить улучшения качества видеозаписи, что в свою очередь позволяет повышать результаты детектирования подводных объектов. Созданная система работает по следующему алгоритму: каждый кадр изображения разрезается на подкадры с

разрешением 256×256 , каждый такой фрагмент с помощью методов super-resolution увеличивается до 640 и 480. После этого происходит объединение полученных компонентов кадра в единое изображение. Таким образом, происходит улучшение разрешение исходного видео в 4 раза.

5. Сервис картографирования используется для осуществления картографической привязки данных проанализированной съемки. Автоматизировано составленная карта позволяет показать, где производились замеры и как они соотносятся друг с другом. Получает на вход информацию о карте глубины зоны исследования и наборы точек – слоев данных, у которых есть геопозиция и значения.

6. Сервис 3D-реконструкции позволяет осуществлять выделение кадров глубины в автоматическом режиме, а также объединять их в облака точек. На базе этих данных пользователи могут строить mash-модели. Созданная авторами реализация этого сервиса основана на библиотеке ORB_SLAM2-CUDA. Это позволяет в режиме реального времени осуществлять трехмерную реконструкцию найденных объектов и ландшафта.

7. Для детектирования редких и плохо описанных объектов на видео со специфическими параметрами невозможно применять методы машинного распознавания «из-коробки». Был разработан сервис детектирования редких объектов, который позволяет выделять маски объектов на кадрах по микробазам данных из пяти размеченных пар «изображение – маска». Реализация осуществляется обученной авторами нейронной сетью, работающей по принципу few short learning. Другими словами, на заранее неопределенной глубине без предопределенных параметров кадра появляется возможность работать с помощью небольшого набора примеров. Для работы сервиса пользователь предоставляет пары квадратных изображений объекта и описывающих его черно-белых масок для конкретного видео. Такая разметка небольшого количества особей одного вида позволяет с точностью до 85% выделять этот вид на всем видеопотоке. Таким образом, в сочетании с решенной задачей трехмерной реконструкцией дна появляется возможность оценивать как густоту покрытия дна определенным обитателями, так и их примерный вес.

Перспективные методы анализа морского дна и их обитателей

В данном разделе будут освещены методы, которые еще не нашли интеграции в промышленные решения, однако являются многообещающими и показывают интересные результаты.

В рамках авторских исследований была рассмотрена система Dino, обученная на более чем 35 тыс. изображений различных животных. Это позволило в автоматизированном режиме получать карты внимания, на которых различные животные выделяются для дальнейшей сегментации и редактирования (рис. 1). Такие системы как Dino позволяют в автоматизированном режиме осуществить кластеризацию изображений.

Рис. 1. Обучение сети Dino по изображениям различных животных

Также были проведены эксперименты по применению сети Dino для детектирования надводного мусора. На рис. 2 приведены результаты работы. Аналогично работе с мусором возможно производить анализ различных типов покрытия ландшафта растительностью и почвой.

Рис. 2. Применению сети Dino для детектирования надводного мусора

Заключение

В рамках представленного исследования был разработан комплекс сервисов, предоставляющий комплексное решение задач анализа подводной флоры и фауны. Разработанные сервисы позволяют внедрять компоненты решения в более крупные системы по отдельности.

Список литературы

1. СП 502.1325800.2021 Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.
2. СП 504.1325800.2021 Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе.

**O.O. Iakushkin^{1,2}, E.D. Pavlova^{1,2}, A.K. Lavrova³, E.A. Pen²,
A.Yu. Frikhar⁴, Ya.E. Terekhina³, A.A. Bulanova³, N.V. Shabalin⁴,
O.S. Sedova¹**

¹Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, o.yakushkin@spbu.ru

²BioGeoHab LLC, Saint Petersburg

³Lomonosov Moscow State University, Moscow

⁴Lomonosov Moscow State University Marine Research Center LLC, Moscow

ANALYSIS OF UNDERWATER PHOTO AND VIDEO SURVEYS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES

Abstract. In 2021, codes of practice were adopted on the territory of the Russian Federation, obliging developers to conduct a study of flora and fauna at the construction site. At the moment, the necessary analysis is done manually, which requires a lot of money and time. As part of this work, to digitalize the methods of constructing underwater maps, authors managed to create several services designed to automate the decomposition of video files, structured information extraction, replacement of frame components, improving the quality of video recording, detecting poorly described objects, conducting cartographic analysis of underwater photography, as well as 3D reconstruction. Thus, it was developed modules that allow automating the solution of the problem of analyzing underwater video and photography.

Keywords: artificial intelligence; object recognition; underwater image correction; biogeocenosis analysis for construction on the continental shelf.

КРУГЛЫЙ СТОЛ «ИНЖЕНЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ШЕЛЬФЕ»

Титов Н.О.¹, Токарев М.Ю.²

¹ООО «СПЛИТ», г. Москва, titov.ol.geol@gmail.com

²МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, г. Москва

ВЫДЕЛЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ ПУТЕМ АНАЛИЗА ТРЕХМЕРНЫХ S-СКОРОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МНОГОКАНАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Аннотация. Сложность инженерно-геологических условий является ключевым фактором, влияющим на скорость и стоимость строительства сооружений на арктическом шельфе. В таких условиях сейсморазведка является основным методом выявления опасных геологических объектов, таких как палеоврезы, моренные гряды, субаквальные мерзлые и газонасыщенные грунты. При небольших глубинах моря традиционные методы сейсморазведки на отраженных волнах (в модификации общей глубинной точки) сталкиваются с рядом проблем, таких как высокая интенсивность кратных волн, регистрация отражений в «ближней» зоне и близкие к критическим углы отражения. В то же время использование донных приемных устройств позволяет не только избежать вышеуказанных проблем, но и дополнительно к основным типам волн регистрировать поверхностные волны, которые могут помочь в определении свойств грунтов, залегающих на небольшой глубине. В данной работе рассматривается применение метода многоканального анализа поверхностных волн для выделения геологических опасностей в условиях мелководного шельфа.

Ключевые слова: сейсморазведка; многоканальный анализ поверхностных волн (MASW); геологические опасности; мелководье.

Метод анализа поверхностных волн

Метод многоканального анализа поверхностных волн (MASW) был предложен в конце 1990 гг. как развитие метода спектрального анализа поверхностных волн [11], а первые морские сейсморазведочные работы этим методом были проведены канадской и канзасской геологическими службами в 2001 г. в северной части Атлантического океана. Эти работы показали применимость метода для определения несущей способности донных отложений [13]. В дальнейшем метод получил широкое распространение в инженерно-геологических работах по всему миру [8, 12, 14], где показывал хорошие результаты с высокой степенью согласованности с результатами других методов. MASW используется в основном в 2D варианте, однако есть работы, где метод применялся для трехмерных наблюдений с целью картирования и определения петрофизических свойств донных грунтов и подстилающих их дочетвертичных [7]. На данный момент разработано

специализированное программное обеспечение, направленное на обработку и визуализацию результатов этого метода [10].

Постановка задачи

Целью настоящей работы является идентификация опасных геологических процессов и явлений на шельфе Печорского моря по данным стандартной 3D сейсморазведки методом MASW, а также проверка эффективности метода MASW для выполнения таких задач. В ходе написания данной работы выполнены следующие задачи:

- обработка данных сейсморазведки MOB ОГТ 3D методом MASW;
- построение 2D разрезов S -скоростей;
- написание программы на языке Python для подготовки данных к построению трехмерного куба S -скоростей;
- построение трехмерных скоростных моделей;
- комплексный анализ полученных результатов;
- анализ эффективности MASW для выделения геологических опасностей.

По литературным данным в осадках верхней части разреза исследуемой территории выявлено наличие газонасыщенных отложений [3], что создает трудности в изучении этих осадков методами высокоразрешающей и сверхвысокоразрешающей сейсморазведки, а также акустического профилирования. Помимо этого, газонасыщенные толщи обладают низкой добротностью, из-за чего на сейсмических разрезах ОГТ не прослеживаются отражения от нижележащих слоев. Скорость поперечных волн в пористых газонасыщенных отложениях меньше, чем в таких же толщах, поровое пространство которых заполнено водой [6]. Скорость волны Шольте прямо зависит от V_s и от коэффициента Пуассона, из чего следует, что в газонасыщенных толщах будут наблюдаться понижения скорости прохождения поверхностных волн. Кроме того, на исследуемой территории возможно нахождение многолетнемерзлых грунтов (ММГ). Проблема поиска и получения свойств ММГ на арктическом шельфе рассмотрена в достаточно большом количестве научных работ, например [4, 9], что отчасти связано с высокой заинтересованностью производственных компаний в такого рода исследованиях. Как известно, мерзлые грунты контрастируют с такими же отложениями в обычном состоянии по значениям скоростей поперечных волн и коэффициента Пуассона. V_s в мерзлых грунтах терригенного происхождения может достигать 2500 м/с, в то время как в отложениях, насыщенных водой, редко превышают 700 м/с [2]. В условиях Карского и Печорского морей кровля мерзлых грунтов расположена на глубинах 8–20 м и 20–30 м соответственно, а их мощность – 20–30 м. С удалением от береговой линии мощность этих грунтов уменьшается. Такие отложения можно обнаружить при глубинах моря менее 20 м [3].

Предлагаемая работа является продолжением научно-исследовательских работ по проекту «Комплексный анализ данных геолого-геофизических исследований и инженерных изысканий для выявления опасностей для размещения нефтегазопромысловых сооружений и проводки скважин на шельфе Печорского моря» выполненным в 2020 г. сотрудниками кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Исходные данные

В публикации представлены результаты обработки данных 3D съемки с донным двухкомпонентным оборудованием на шельфе Печорского моря [5] методом многоканального анализа поверхностных волн (MASW). В качестве источника использовались пневмопушки, приемником служили донные станции. Были получены скорости S волн на участках распространения мерзлых и газонасыщенных грунтов. Обработка сейсмических данных в формате SEG-Y проводилась по уже разработанной методике [1]. В результате были получены разрезы скоростей поперечных волн (V_s). Данные V_s с разрезов были использованы для построения непрерывного куба значений методом трехмерного гриддинга. Перед процессом расчета дисперсионных изображений, к исходным данным применялись следующие процедуры:

- амплитудная коррекция с коэффициентом степени 0,5;
- полосовая фильтрация с параметрами фильтра 0-1-8-16 Гц;
- удаление постоянной составляющей;
- верхний и нижний мьютинг (рис. 1, 2).

Рис. 1. Сейсмограмма в сортировке FFID-OFFSET до и после обработки

Рис. 2. Амплитудные спектры исходной и обработанных записей. Обозначения: зеленым показаны спектры всей записи, оранжевым – частей с поверхностными волнами

Трассы фильтровались по положениям пунктов взрыва (ПВ) таким образом, чтобы удаления ПВ вдоль профиля пунктов приема не превышали 50 м. Помимо этого, сеймотрассы разделялись по значению оффсета на левые и правые, где левым соответствует отрицательные значения, а правым – положительные (рис. 3).

Рис. 3. Расположение пунктов приема и пунктов взрыва для сейсмограмм, используемых в обработке

После выделения поверхностных волн на сейсмограммах, строились дисперсионные изображения, на которых отчетливо выделялись кривые зависимости скорости от частоты – моды. Для инверсии проводилась пикировка наиболее уверенно выделяемой моды – фундаментальной. Моды высших порядков не использовались из-за нестабильности результатов инверсии (рис. 4).

После пикировки проводилась инверсия, в результате которой строились разрезы скоростей, представленные на рис. 5.

После получения разрезов, проводилась конверсия 2D профилей в куб данных S -скоростей с помощью скрипта на языке программирования Python. Кубы скоростей строились в программе Voxler. Анализ эффективности проводился по набору горизонтальных слайсов этих кубов на разных глубинах.

Рис. 4. Дисперсионное изображение с пропикированной фундаментальной модой (а) и кривые инверсии (б). *Обозначения:* 1 и 2 – соответственно, 1-я и 2-я высшие моды, зеленым (б) показан скоростной закон

Рис. 5. Пример разреза S -скоростей, полученного с помощью MASW, (а) и куб скоростей (б), полученный путем конверсии таких разрезов. Черным контуром показана область распространения газонасыщенных грунтов, полученная с помощью сейсморазведки высокого разрешения (СВР)

Выделение газонасыщенных толщ

Основным методом для выделения газонасыщенных осадков является СВР. На сейсмических разрезах такие осадки выделяются амплитудными аномалиями (рис. 6).

Рис. 6. Сейсмический разрез с выделенными амплитудными аномалиями (красные овалы) и локальными выходами газа (голубые овалы)

На построенном кубе значений V_s газонасыщенные толщи уверенно выделяются по пониженным скоростям (рис. 7).

Рис. 7. Горизонтальные срезы куба скоростей на разных глубинах. Контуром показана зона распространения газонасыщенных осадков, выделенная по данным СВР

Выделение ММГ

На данном участке работ ММГ выделяются по ложным выгибаниям осей синфазности (рис. 8).

Рис. 8. Сейсмограмма с выделенными признаками ММГ

В ходе работы был построен куб скоростей V_s , захватывающий область распространения мерзлых грунтов. Мерзлые грунты должны контрастировать по скоростям V_s с окружающей средой, однако подобного контраста не было. Вероятно, это связано с тем, что захвачена удаленная от берега часть криолитозоны, в которой мощность мерзлых отложений слишком мала, чтобы давать хоть какой-то эффект (рис. 9).

Рис. 9. Горизонтальные срезы куба скоростей на разных глубинах. Контуром показана зона распространения ММГ, выделенная по данным СВР

Результаты

Результатом данных работ можно считать доказательство эффективности метода MASW для определения скоростей поперечных волн в верхней части разреза, а также выявления геологических опасностей. На примере выявления газонасыщенных грунтов показано не только совпадение результатов MASW с результатами высокоразрешающей сейсморазведки, но и возможность получения глубин распространения и скорости V_s таких отложений. Обработка методом MASW позволяет провести оценку инженерно-геологических условий района работ на основе данных глубинной сейсморазведки без необходимости проведения дополнительных полевых работ.

Список литературы

1. Вакуленко С.А., Токарев М.Ю., Горбачев С.В., Гурвич Л.А. Применение технологии многоканального анализа поверхностных волн (MASW) для решения задач оценки строения придонных отложений на 3D съемки с донным оборудованием на шельфе Печорского моря // Тезисы конференции «Морские технологии 2021». Геленджик, 2021.
2. Инновационные технологии выявления и оценки геологических рисков при бурении и возведении объектов нефтегазового комплекса на Арктическом шельфе / М.Ю. Токарев, А.С. Локтев, А.Г. Росляков, А.С. Пирогова, Н.А. Рыбин, В.Н. Хоштария, Н.С. Данилевская // Наука и техника в газовой промышленности. 2021. Вып. 2. С. 20–33.

3. Особенности интерпретации 2d/3d сейсмических данных для решения инженерно-геологических задач на мелководье Печорского моря / Я.Е. Терехина, М.А. Соловьева, О.А. Хлебникова, М.Ю. Токарев, С.В. Горбачев, Т.В. Нурмухамедов, О.М. Мятчин // Труды Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия-2021. Современные методы изучения и освоения недр Евразии». Тверь: Полипресс, 2021. Т. 1. С. 202–205.
4. Рокос С.И. Газонасыщенные отложения верхней части разреза Баренцево-карского шельфа: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 2009. 21 с.
5. Рокос С.И., Костин Д.А., Длугач А.Г. Свободный газ и многолетняя мерзлота в осадках верхней части разреза мелководных районов шельфа Печорского и Карского морей // Седиментологические процессы и эволюция морских экосистем в условиях морского перигляциала: сб. научных трудов. Апатиты, 2001. С. 40–51.
6. Скворцов А.Г., Садуртдинов М.Р., Царев А.М. Сейсмические критерии идентификации мерзлого состояния горных пород // Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII. № 2. С. 83–90.
7. Hutchinson P.J., Beird M.H. 3D mapping with MASW // The Leading Edge. 2016. Vol. 35. No. 4. P. 350–352.
8. Kruiver P., Kleine M., Karaoulis M., Missiaen T. MASW in the surf zone on a Belgian beach // Proceedings of the Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems. Denver, CO, USA: Environmental and Engineering Geophysical Society, 2019. P. 1–4. <https://doi.org/10.4133/sageep.32-083>.
9. Loktev A., Tokarev M., Chuvilin E. Problems and technologies of offshore permafrost investigation // Procedia Engineering. 2017. Vol. 189. P. 459–465. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.074>.
10. Park C.B. ParkSEIS-3D for 3D MASW surveys // Fast Times. 2019. Vol 24. No. 4. P. 67–70.
11. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves // Geophysics. 1999. Vol. 64. No. 3. P. 800–808.
12. Seismic inversion for identification of soil stiffness and damping from measured data in marine setting / M. Ravasio, M. Armstrong, K.N. van Dalen, P.W.G. Versteijlen, A.V. Metrikine, E.D.J. Verschuur, C. de Winter, I. Bolderink // Proceedings of the 3rd applied shallow marine geophysics Conference. Porto, Portugal: EAGE, 2018. Vol. 2018. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802678>.
13. Strong S., Hearn S. Application of interferometric MASW to a 3D-3C seismic survey // ASEG Extended Abstracts. 2016. Vol. 2016. Issue 1. P. 1–6. <https://doi.org/10.1071/ASEG2016ab289>.

14. Underwater MASW to evaluate stiffness of water-bottom sediments / C.B. Park, R.D. Miller, J. Xia, J. Ivanov, G.V. Sonnichsen, J.A. Hunter, R.L. Good, R.A. Burns, H. Christian // The Leading Edge. 2005. Vol. 24. No. 7. P. 724–728.

N.O. Titov¹, M.Yu. Tokarev²

¹SPLIT LLC, Moscow, titov.ol.geol@gmail.com

²Lomonosov Moscow State University, Moscow

IDENTIFICATION OF GEOLOGICAL HAZARDS BY ANALYZING 3D S-VELOCITY MODELS OBTAINED BY MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES

Abstract. The complexity of engineering-geological conditions is a main factor affecting the speed and cost of construction of facilities on the Arctic shelf. In such conditions, seismic exploration is the traditional method for identifying dangerous geological objects, such as paleo-incisions, moraine ridges, subaqueous frozen and gas-saturated soils. At shallow sea depths, traditional seismic methods face a number of challenges, such as high multiples, near-field reflections, and near-critical reflection angles. At the same time, usage of bottom receiving devices allows not only to avoid these problems, but also to register surface waves, which can help to determinate petrophysical properties of rocks occurring at shallow depths. It is discussed the application of the method of multichannel analysis of surface waves to identify geological hazards in extreme shallow water conditions.

Key words: seismic survey; multichannel analysis of surface waves (MASW); geological hazards; shallow water.

Ковачев С.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, kovachev@ocean.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ИМ. Ю. КОРЧАГИНА (СЕВЕРНЫЙ КАСПИЙ)

Аннотация. Система геодинамического мониторинга для морских нефтегазовых месторождений была разработана в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН и установлена на месторождении им. Ю. Корчагина (ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть») на севере Каспийского моря. Основное назначение системы – регистрация сейсмических сигналов в трех точках на дне моря в районе исследуемого месторождения, а также регистрация двух компонент наклона главной палубы нефтедобывающей платформы (по крену и дифференту). Донными сейсмографами регистрируются сигналы от местных микроземлетрясений в районе месторождения им. Ю. Корчагина, региональные землетрясения Восточного Кавказа и телесеismicкие сигналы сильных землетрясений.

Ключевые слова: сейсмологический мониторинг; морские нефтегазовые месторождения; Северный Каспий; наклоны платформы; приливы.

Система геодинамического мониторинга (СГДМ) для морских нефтегазовых сооружений была разработана в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН и смонтирована на морской нефтедобывающей платформе (морская ледостойкая платформа (МЛСП)) на месторождении им. Ю. Корчагина (ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть») в акватории Северного Каспия в 2010 г. [3].

Основное назначение системы – регистрация сейсмических сигналов в широком диапазоне энергий (магнитуд) в районах добычи углеводородного сырья на шельфах морей и океанов с помощью донных сейсмографов [4]. Системой также регистрируются наклоны главной палубы платформы МЛСП, которые так же могут возникать в процессе разработки месторождения. Наклономером также могут регистрироваться волны цунами, возможные в акватории Каспийского моря [1].

В систему входит донная часть, состоящая из 3 блоков донных сейсмических станций (рис. 1), подключенных к МЛСП тремя кабелями, длина которых составляет 1–2 км (рис. 2). В судовое оборудование входят: блок сбора и обработки данных, блок наклономеров и акселерометров, и соединительные кабельные линии.

Рис. 1. Установка донного сейсмографа на дне Каспийского моря в районе месторождения

Рис. 2. Схема установки донных сейсмографов СГДМ в районе платформы им. Ю. Корчагина. Обозначения: треугольники – донные сейсмографы, ЛСП-1 – добывающий модуль, ЛСП-2 – жилой модуль

Все обнаруженные в непосредственной близости от МЛСП землетрясения (рис. 3) относятся к типу микросейсмических толчков, которые не могут ощущаться людьми и представлять какой-либо угрозы для конструкций платформы. Всего за три года наблюдений с 2012 по 2015 гг. было обнаружено 50 местных слабых землетрясений вблизи месторождения им. Ю. Корчагина (рис. 4).

Рис. 3. Записи микроземлетрясения 24 ноября 2015 г. (6 ч 43 мин), $M_L = 1,4$

Рис. 4. Карта эпицентров местных микроземлетрясений, обнаруженных в районе месторождения им. Ю. Корчагина за период наблюдений с июня 2012 г. по декабрь 2015 г.

Вертикальные разрезы широтного и меридионального простирания, проходящие через место расположения МЛСП с проекциями очагов микроземлетрясений, показаны на рис. 5. Видно, что в пределах месторождения им. Ю. Корчагина микросейсмические события не происходят. Очаги обнаруженных микроземлетрясений обрамляют нефтегазовый резервуар. Скорее всего, эти микросейсмические события имеют тектоническую природу и не связаны с откачкой нефти и газа на месторождении им. Ю. Корчагина.

Рис. 5. Проекция очагов землетрясений на вертикальную плоскость вдоль линий: а – А-А', б – В-В' на рис. 4. Обозначения: синие круги – МЛСП

Региональные сейсмические события, происходящие в районе Восточного Кавказа, Среднего Каспия, Западного Туркменистана, Северного Ирана (пример на рис. 6) и в других районах, примыкающих к Каспийскому морю, регистрируются датчиками СГДМ, начиная с магнитуд $M_L = 2,5$.

Рис. 6. Землетрясения в Северо-Западном Иране 11 августа 2012 г. Обозначения: X , Y – записи горизонтальных сейсмометров; Z – запись вертикального сейсмометра; H – запись гидрофона; P и S вступления продольных и поперечных волн соответственно

Донные датчики СГДМ регистрируют также сильнейшие землетрясения, происходящие на земном шаре на значительных эпицентральных расстояниях (пример на рис. 7).

Рис. 7. Запись землетрясения 23 июня 2010 г. (23 ч 15 мин по Гринвичу) с эпицентром в районе Филиппинских о-вов с магнитудой $M_b = 6,8$, полученная западным сейсмографом СГДМ. Обозначения: PCP – момент прихода сейсмических волн, отраженных от ядра Земли

Блок наклономера AGS-5 фирмы Fraba (Германия) установлен на главной палубе добывающей платформы ЛСП-1 (рис. 8). Основные характеристики инклинометра: диапазон измеряемых углов – $\pm 5^\circ$, разрешающая способность – до $0,001^\circ$. Наклономер измеряет наклоны платформы по крену и дифференту [2].

Рис. 8. Блок наклономера и акселерометров СГДМ на платформе им. Ю. Корчагина

На рис. 9 представлены осредненные графики поведения наклонов палубы ЛСП-1 по крену и дифференту за продолжительный период наблюдений.

Рис. 9. Графики поведения наклонов палубы ЛСП-1 по крену и дифференту за период наблюдений с 10 июля 2012 г. по 26 марта 2016 г. Осреднение по одночасовому интервалу

Экстремумы на кривых крена и дифферента совпадают с самыми теплыми и самыми холодными месяцами в году: ноябрь-январь и июль-август. В тоже время в эти периоды уровень Каспийского моря минимален и максимален соответственно. Возможно, годовая периодичность наклонов МЛСП по крену и дифференту связана с изменением уровня Каспийского моря.

Были рассчитаны спектры наклонов по крену и дифференту за продолжительный (4 года) период наблюдений (рис. 10). На спектре наклонов по крену отчетливо выделяются полусуточный и суточный максимумы, соответствующие лунным и солнечным приливным колебаниям в твердой Земле. Суточный максимум заметен также на спектре наклонов по дифференту. На обеих спектральных кривых обнаруживаются небольшие экстремумы на следующих периодах: 4,8; 6,0 и 8,0 ч, наличие которых можно объяснить сейшми в Каспийском море.

Рис. 10. Спектры наклонов палубы ЛСП-1 по крену (синяя кривая) и дифференту (красная кривая) за период наблюдений с 10 июля 2012 г. по 26 марта 2016 г.

Таким образом, можно сделать вывод, что датчики СГДМ имеют высокую чувствительность и способны зарегистрировать признаки опасных геодинамических явлений, возможные в районах морской нефтедобычи.

Работа выполнена при финансовой поддержке ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть», Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 18-05-01018) и по Государственному заданию № 0128-2021-0004.

Список литературы

1. К вопросу о цунамиопасности арктического региона / Е.А. Куликов, А.И. Иващенко, О.И. Яковенко, С.А. Ковачев, И.П. Медведев // Арктика: экология и экономика. 2016. № 3(23). С. 38–49.
2. Ковачев С.А., Крылов А.А. Основные результаты измерения наклонов морской нефтедобывающей платформы им. Ю. Корчагина на Северном Каспии // Естественные и технические науки. 2018. № 11(125). С. 149–151.
3. Лобковский Л.И., Ковачев С.А. Система геодинамического мониторинга

нефтегазодобычи на шельфе на примере морского нефтегазового месторождения имени Ю. Корчагина // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2010. № 11. С. 11–14.

4. Kovachev S.A., Kuzin I.P., Soloviev S.L. Microseismicity of the frontal Hellenic arc according to OBS observations // Tectonophysics. 1992. Т. 201. № 3–4. С. 317–327.

S.A. Kovachev

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, kovachev@ocean.ru

GEODYNAMIC MONITORING RESULTS AT THE Yu. KORCHAGIN OIL AND GAS FIELD (NORTHERN CASPIAN)

Abstract. The geodynamic monitoring system for offshore oil and gas fields was developed at the Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences and installed at the Yu. Korchagin field (LUKOIL-Nizhnevolzhskneft LLC) in the north of the Caspian Sea. The main purpose of the system is to register seismic signals at three points on the seabed in the area of the studied field, as well as to register two components of the inclination of the main deck of the oil production platform (by roll and trim). Bottom seismographs record signals from local microearthquakes in the area of the Yu. Korchagin field, regional earthquakes of the Eastern Caucasus and teleseismic signals of strong earthquakes.

Key words: seismological monitoring; offshore oil and gas fields; Northern Caspian Sea; platform inclination; tides.

Бирюков Е.А.¹, Понимаскин А.И.², Токарев М.Ю.³

¹ООО «СПЛИТ», г. Москва, eugene.biryukov@split-k.com

²ООО «Деко геофизика», г. Москва

³МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МОРСКИХ ТРЕХМЕРНЫХ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИХ И СВЕРХВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ НА АКВАТОРИИ

Аннотация. Активное освоение шельфового пространства повышает интерес к изучению строения верхней части донных отложений. Именно к ней приурочены такие геологические опасности, как приповерхностный газ, мерзлые толщи, оползни и другие объекты, которые могут оказать разрушительное воздействие на технические сооружения нефтегазодобывающего комплекса. Представлен опыт применения технологии трехмерной сверхвысокоразрешающей съемки SplitMultiSeis 3D, разработанной специально для тщательного изучения верхней части разреза. Приведены результаты обработки и интерпретации полученных данных.

Ключевые слова: сейсморазведка; инженерно-геологические изыскания; трехмерная съемка.

Введение

Интерес к изучению строения верхней части геологического разреза обусловлен необходимостью учета инженерно-геологических условий участка строительства морских нефтегазовых сооружений (МНГС), в т.ч. опасных геологических процессов и явлений (ОГПиЯ) осложняющих постановку буровых платформ. К основным ОГПиЯ относятся как приповерхностные газонасыщенные и мерзлые грунты, разрывные нарушения, палеорусла, зоны смены литологического состава и другие объекты, которые могут осложнить строительство сооружений нефтегазодобывающего комплекса [1]. Большая часть инженерно-геофизических исследований проводится с использованием непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП) или двумерной высокоразрешающей / сверхвысокоразрешающей сейсмической съемки (2D СВР/ССВР), которые в силу недостаточного пространственного разрешения в крест профиля не могут быть эффективны для картирования локальных объектов. В тоже время, трехмерная съемка высокого и сверхвысокого разрешения (3D СВР/ССВР), уже показали свою эффективность для выбора площадок под строительство МНГС [3, 5]. По сравнению с традиционной сейсморазведкой, эти многоканальные площадные системы отличаются небольшими длинами приемных линий в первые десятки и сотни метров, с малым, менее трех метров, шагом между каналами и широкополосными, высокочастотными (100–1000 Гц) излучателями. Положение приемно-излучающих систем должно быть определено с дециметровой точностью, что

требует больших усилий для позиционирования и навигационной обработки, однако позволяет получать данные идеальные для картирования малых объектов в верхней части разреза.

В публикации представлен опыт использования технологии SplitMultiSeis 3D, которая является единственной в России трехмерной высоко и сверхвысоко разрешающей сейсмической системой.

История развития трехмерных сейсмоакустических систем

В течение долгого времени (1990–2010) применение высокоразрешающих 3D систем ограничивалось научными задачами. Для производственных целей инженерно-геологических изысканий они начали активно использоваться в последнее десятилетие. Разработка первых высокоразрешающих систем началась еще в 1990 гг. В углеводородном проекте Европейской комиссии (ЕК) Центром морской геологии им. Ренара (Университет Гента, Бельгия) была разработана система SEISCAT для съемки небольшого глиняного диапира под руслом р. Шельды [6, 10]. Приемная часть состояла из 12 одноканальных кос, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга, это была компактная и жестко скрепленная система. В проекте MAST III VHR3D она получила развитие в менее зафиксированную систему Opus3D [8, 11]. Еще более открытая и гибкая система была разработана в этом проекте океанографическим институтом Ifremer для более крупных (1×2 км) геологических площадок [7]. Эти системы стали первыми шагами инженерной 3D сейсморазведки в условиях открытого моря. За ними последовали другие, например, система 3D CHIRP, разработанная Национальным океанографическим центром в Саутгемптоне, она включала 4 излучателя и 60 приемников на жесткой раме 2,0×2,5 м [4].

В настоящее время ведущей трехмерной морской высокоразрешающей сейсмической системой считается система P-Cable, разработанная компанией Volcanic Basin Petroleum Research при участии университета Тромсе (Норвегия) и Национального океанографического центра Саутгемптона (Великобритания) [2] и система GeoSurvey [9].

Программно-аппаратный комплекс (ПАК)

Для картирования мелкомасштабных объектов требуется вертикальное разрешение порядка 1–2 м. Для этого источник должен обладать широкой полосой частот. В системе SplitMultiSeis 3D в качестве источников используются электроискровые источники типа «Спаркер» с 400 электродами и центральной частотой 400–600 Гц, максимальной более 1000 Гц. Такой диапазон рабочих частот позволяет получать достаточное разрешение. Источники работают в режиме поочередной стрельбы (flip-flop). В качестве

приемных устройств используются шесть 16-канальных сейсмических кос длиной 30 м.

Согласно работе [8] точность определения геометрии наблюдений не должна превышать $1/8$ преобладающей длины волны, что для частот 400–600 Гц соответствует около 0,3–0,5 м. Позиционирование устройств комплекса SplitMultiSeis осуществляется с использованием 6-ти буксируемых навигационных буев и базовой набортной станции, работающих в дифференциальном режиме.

Сбор данных осуществляется при помощи программного обеспечения SborEx, которое позволяет контролировать качество сейсмических и навигационных данных в режиме реального времени. Мобильность и сравнительно небольшой размер комплекса SplitMultiSeis 3D позволяют работать с ним на широком спектре судов и оперативно проводить спуско-подъемные операции. Производительность системы примерно составляет – 0,25 км²/сут.

Сравнение базовых параметров P-Cable, GeoSurvey, SplitMultiSeis 3D, используемых при съемке, представлен в табл.

Таблица

Сравнительные характеристики ПАК

Параметры	P-Cable	Geo Survey	SplitMultiSeis 3D
Диапазон частот, Гц	5–350	50–4000	50–1000
Разрешение, м	1,5	0,5	0,5–1,0
Количество кос	8–20	4	6
Количество каналов в косе	8	24/48/96	16
Шаг по каналам, м	6,25/125	3,125/6,25	2
Количество источников	1/2	2	2

Контроль качества данных

Контроль качества данных представляет собой анализ сейсмических данных для выявления тех или иных особенностей или нарушений при проведении полевых исследований. При этом, контроль качества, необходимо выполнять как на этапе съемки для устранения проблем непосредственно на судне, так и на этапе камеральной обработки, чтобы скорректировать последующий граф. Для 3D данных в первую очередь необходимо следить за качеством покрытия и кратностью съемки. Для анализа 3D-данных SplitMultiSeis используют запись ближнего канала, анализ сейсмограмм в различных сортировках, изучение спектральных характеристик, построение карт атрибутов, таких как уровень сигнала и шума, их соотношения, получение первичных суммарных разрезов и т.д. Это позволяет выявить нестабильность работы источника, выявить природу шумов, оценить стабильность и глубину

погружения приемно-излучающей системы, оценить разрешение и глубинность работ и т.д.

Обработка данных

Обработка данных трехмерных наблюдений позволяет получить полную информацию о строении разреза и проследить как в плане, так и по разрезу геологические структуры. Пример трехмерных наблюдений приведен на рис.

Рис. Куб сейсмоакустических данных. Черное море

Граф обработки данных включает в себя ряд стандартных процедур, таких как присвоение геометрии, удаление помех, подавление кратных волн и т.д. Однако некоторые процедуры являются ключевыми именно для обработки трехмерных данных: приведение данных к единой форме сигнала и уровню наблюдений, трехмерная регуляризация и миграция.

Для перехода на равномерную сетку и улучшения пространственного разрешения используется процедура 3D регуляризации. В результате применения регуляризации: происходит ослабление футпринтов (артефактов

съемки), пустые бины заполняются данными и происходит выравнивание кратности.

Трехмерная миграция позволяет правильно определить положение и форму геологических объектов. Миграция может учесть влияние боковых отражений, и именно она предпочтительна в условиях наличия сложных геологических структур.

Заключение

Методика SplitMultiSeis 3D была опробована на двух полигонах на Белом море в 2017–2019 гг., использовалась в 2019 г. на Черном, в 2020 г. на Карском и в 2021 г. на Охотском морях. Примеры результатов сейсмоакустических наблюдений, полученных с помощью этой системы, позволяют проводить детальную интерпретацию таких объектов, как палеоврезы, приповерхностный газ и др., уточнять структуры, намеченные по 2D данным.

Результаты интерпретации данных показывают, что методика SplitMultiSeis 3D весьма перспективна для обнаружения геологических опасностей в верхней части разреза и может применяться для широкого круга задач при строительстве инженерных сооружений на континентальном шельфе.

Список литературы

1. Изучение приоритетных геологических опасностей при подготовке к поисково-разведочным работам на шельфе моря Лаптевых / А.А. Колюбакин, А.Г. Росляков, С.Г. Миронюк, А.С. Пирогова, М.Ю. Токарев, М.А. Ксенофонтова // Инженерные изыскания. 2017. № 10. С. 36–52. <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2017-10-36-52>.
2. Bellwald B., Planke S., Matar M., Piasecka D.E. P-Cable 3D high-resolution seismic data as a powerful tool to characterize subglacial landforms and their genesis: a case study from the SW Barents Sea // Proceedings of the 19th EGU General Assembly, EGU 2017. Vienna: EGU, 2017. P. 12990.
3. Contribution of high-resolution 3D seismic near-seafloor imaging to reservoir-scale studies: application to the active North Anatolian Fault, Sea of Marmara / Y. Thomas, B. Marsset, G.K. Westbrook, C. Grall, L. Geli, G. Cifci, A. Rochat, H. Sarıtaş // Near Surface Geophysics. 2012. Vol. 10. ID 291301. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2012019>.
4. Design of a 3D chirp sub-bottom imaging system / J.M. Bull, M. Gutowski, J.K. Dix, T.J. Henstock, P. Hogarth, T.G. Leighton, P.R. White // Marine Geophysical Research. 2005. No. 26. P. 157–169.
5. Games K.P., Self E. HRS 3D data – a fundamental change in site survey geohazard interpretation // First Break. 2017. Vol. 35. P. 39–47.

6. Henriet J.-P., Verschuren M., Versteeg W. Very high resolution 3D seismic reflection imaging of small-scale structural deformation // *First Break*. 1992. Vol. 10. No. 3. P. 81–88.
7. Marsset T., Marsset B., Thomas Y., Didaiiller S. Sismique treshaute resolution 3D: une nouvelle methode d'imagerie des sols superficiels // *Geoscience*. 2002. Issue 334. P. 403–408.
8. Missiaen T., Versteeg W., Henriet J.-P. A new 3D seismic acquisition system for very high and ultra high resolution shallow water studies // *First Break*. 2002. Vol. 20. No. 4. P. 227–232.
9. Monrigal O., de Jong I., Duarte H. An ultra-high-resolution 3D marine seismic system for detailed site investigation // *Near Surface Geophysics*. 2017. Vol. 15. Issue 4. P. 335–345. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2017025>.
10. Very high resolution 3D marine seismic data processing for geotechnical applications / B. Marsset, T. Missiaen, M. Noble, W. Versteeg, J.-P. Henriet // *Geophysical Prospecting*. 1998. Vol. 46. No. 2. P. 105–120.
11. VHR3D – very high resolution 3D seismic method for detailed site investigation: report / B. Marsset, J.-P. Henriet, T. Missiaen, M. Noble, N. Wardell. Ghent, Belgium: Department of Geology, Universiteit of Gent, 2001. 258 p.

E.A. Biryukov¹, A.I. Ponimaskin², M.Yu. Tokarev³

¹SPLIT LLC, Moscow, eugene.biryukov@split-k.com

²Deco Geophysics LLC, Moscow

³Lomonosov Moscow State University, Moscow

EXPERIENCE OF APPLICATION OF MARINE THREE-DIMENSIONAL HIGH-RESOLUTION AND VERY-HIGH-RESOLUTION SEISMO-ACOUSTIC OBSERVATIONS WHEN CONDUCTING ENGINEERING-GEOLOGICAL SURVEYS ON WATER AREAS

Abstract. Active development of the shelf space increases interest in studying the structure near-surface sediments. Geological hazards such as near-surface gas, permafrost, landslides, and other objects that can have a destructive effect on the technical constructions of the oil and gas production. It is presented the technology of three-dimensional ultra-high-resolution imaging SplitMultiSeis 3D, developed specifically for a detailed study of the near-surface layers. There are results of processing and interpretation of 3D ultra-high-resolution data.

Key words: seismic survey; engineering-geological surveys; 3D survey.

Пирогова А.С.^{1,2}, Щуплов П.А.³, Токарев М.Ю.¹

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики,
г. Москва, anastasia.pirogova@geol.msu.ru, tokarev@oilgascenter.ru

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

³ООО «Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В. Ломоносова», г. Москва

ИНВЕРСИЯ МУЛЬТИЧАСТОТНЫХ ДАННЫХ 3D СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ УПРУГИХ СВОЙСТВ МОРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ

Аннотация. В работе представлены результаты применения последовательной инверсии 3D сейсмических данных, полученных в различных частотных диапазонах по методу отраженных волн на шельфе Охотского моря. Рассматриваются данные 3D-сейсморазведки стандартного разрешения (3D СР, диапазон частот 5–120 Гц), 3D-сейсморазведки высокого разрешения (3D СВР, 90–500 Гц) и 3D-сейсморазведки сверхвысокого разрешения (3D ССВР, 150–750 Гц). В результате применения последовательной динамической инверсии к мультимастотным сейсмическим данным была построена детальная модель упругих свойств морских грунтов в глубоководной части шельфа Охотского моря. По результатам инверсии были идентифицированы, оконтурены в объеме и охарактеризованы элементы в верхней части геологического разреза, связанные с потенциальными рисками для проведения буровых работ, в т.ч. были выявлены области повышенной газонасыщенности, связанные с глубинной миграцией газа.

Ключевые слова: сейсморазведка; инженерно-геофизические исследования; сейсмическая инверсия; опасные геологические процессы и явления на шельфе.

Введение

При изучении и геологической разведке шельфа особое место в производственном цикле занимают инженерно-геофизические исследования (ИГИ) верхней части разреза. Одной из основных задач ИГИ является характеристика упруго-прочностных свойств грунтов и выявление опасных для бурения геологических процессов и явлений в верхней части разреза. Оценку упруго-прочностных свойств грунтов можно выполнить по данным дистанционных сейсмических исследований при помощи решения обратной задачи сейсморазведки – сейсмической инверсии [2].

Применение алгоритмов сейсмической инверсии на высокочастотных инженерных данных сейсморазведки высокого разрешения (СВР, типичный диапазон частот 80–500 Гц) и сейсморазведки сверхвысокого разрешения (ССВР, 150–1000 Гц) является нетривиальной задачей по ряду причин. Во-первых, из-за отсутствия в данных СВР и ССВР информации на низких частотах до 100 Гц решение обратной задачи сейсморазведки (переход от параметров волнового поля к упругим свойствам среды) неустойчиво. Повысить устойчивость инверсии возможно за счет привлечения информации о низкочастотных трендах изменения упругих свойств грунтовых толщ с глубиной. Такие низкочастотные тренды могут быть построены либо по данным геофизических исследований скважин (ГИС), которые обычно

отсутствуют для верхней части разреза на шельфе, либо по результатам количественного анализа низкочастотного сейсмического поля – данных сейсморазведки стандартного разрешения (СР, 5–100 Гц). Пример такого последовательного анализа данных СР, СВР и ССВР с целью оценки упругих свойств приповерхностных морских отложений на шельфе Охотского моря приведен в настоящей работе.

Сейсмические данные МОГТ

В работе используются сейсмические данные метода отраженных волн в модификации общей глубинной точки (МОГТ) различного частотного диапазона:

- 3D стандартной сейсморазведки (3D СР) – 5–120 Гц; данные были обработаны по специализированному графу под изучение верхней части разреза;

- 3D сейсморазведки высокого разрешения (3D СВР) – 90–500 Гц;

- 3D сейсморазведки сверхвысокого разрешения (3D ССВР) – 150–750 Гц.

Сравнение временных разрезов 3D СР, СВР и ССВР, а также их спектров, приведено на рис. 1, 2.

Рис. 1. Сравнение спектров данных стандартной сейсморазведки (оранжевый), СВР (синий) и ССВР (зеленый)

Методы

В работе применяется детерминистический подход к решению обратной динамической задачи сейсморазведки. Выполняется последовательная инверсия мультисоставных данных [1]. Блок-схема такого подхода приведена на рис. 3. На данных 3D СР и 3D ССВР выполнена модель-базированная инверсия (МБИ), на данных 3D СВР – инверсия редких импульсов (SSI).

Рис. 2. Сравнение данных различных частотных диапазонов: сейсморазведки CP, CBP, CCBP (а) и результатов акустической инверсии по этим данным (б)

Рис. 3. Блок-схема последовательной инверсии данных сейсморазведки, полученных в различных частотных диапазонах с перекрытием

Импульс для всех типов сейсмических данных оценивался статистическим способом [4]. Низкочастотная фоновая модель акустического импеданса была построена на основе модели интервальных скоростей продольной упругой волны, оцененных по данным 3D стандартной сейсморазведки.

Результаты

Геолого-геофизические исследования последних лет показывают, что наиболее неблагоприятными для бурения элементами геологического разреза на шельфе Охотского моря являются интервалы с повышенным содержанием газа [3]. По результатам последовательной акустической инверсии удалось выявить и количественно охарактеризовать такие интервалы. В западной части изучаемой площади была выделена зона, связанная с неоднородным газонасыщением. Значения акустического импеданса в этой зоне составляют $1200\text{--}2400\text{ м/с г/см}^3$, в то время как для вмещающих толщ характерны значения более 3000 м/с г/см^3 (рис. 4). Данная зона была околонтурена в объеме по пониженным значениям акустического импеданса (рис. 5).

Рис. 4. Пример выделения зоны, связанной с повышенным газонасыщением

Рис. 5. Схемы минимальных значений акустического импеданса, построенные по данным СР (а) и СВР (б, в). Диапазон значений для схемы (б) совпадает с диапазоном значений для схемы (а)

Авторы благодарят компанию ООО «Газпром недра» за предоставление результатов инженерно-геологических изысканий. Также авторы выражают признательность компании CGG за университетский грант на использование программных средств для решения образовательных и научно-исследовательских задач. Полевые сейсмические данные высокого разрешения были получены компанией СПЛИТ при помощи программно-аппаратного комплекса SplitMultiseis.

Список литературы

1. Инверсия данных сейсморазведки высокого и сверхвысокого разрешения для оценки акустических свойств придонных грунтов в условиях мелководного шельфа Карского моря / С.А. Пирогова, М.Ю. Токарев, А.В. Сучкова, П.А. Щуплов, Н.А. Рыбин, В.Н. Хоштария // Геофизика. 2021. Спецвыпуск. С. 13–23.
2. Пирогова А.С., Тихоцкий С.А., Токарев М.Ю., Сучкова А.В. Прогноз упруго-прочностных свойств придонных грунтов на основе инверсии данных сейсморазведки сверхвысокого и ультравысокого разрешения // Геофизические процессы и биосфера. 2019. Т. 18. № 4. С. 191–202.
3. Технология выделения опасных геологических процессов и явлений на шельфе Охотского моря / Я.Е. Терехина, А.Г. Росляков, А.С. Пирогова, О.А. Хлебникова, Н.А. Рыбин // Труды Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия-2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии». Тверь: Полипресс, 2018. С. 756–759.
4. Cui T., Margrave G.F. Seismic wavelet estimation // CREWES Research Report. 2014. Vol. 26. P. 1–16.

A.S. Pirogova^{1,2}, P.A. Shchuplov³, M.Yu. Tokarev¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, anastasia.pirogova@geol.msu.ru, tokarev@oilgascenter.ru

²Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow

³Lomonosov Moscow State University Seismic Data Analysis Center LLC, Moscow

INVERSION OF MULTIFREQUENCY 3D SEISMIC DATA FOR ESTIMATING THE ELASTIC PROPERTIES OF MARINE SOILS

Abstract. The publication presents the results of the sequential inversion of 3D seismic reflection data acquired in multiple frequency ranges at the Okhotsk Sea shelf. The data includes 3D standard resolution seismic dataset (typical frequency range is 5–120 Hz), 3D high-resolution seismic dataset (90–500 Hz) and 3D very-high-resolution seismic dataset (150–750 Hz). Based on the results of the sequential dynamic seismic inversion, it was possible to assess the elastic properties of the near-surface sediments in the research area at the Okhotsk Sea shelf. The inversion allowed us to identify, map, and quantitatively characterize potential drilling geohazards in the near-surface. Notably, we identified intervals of increased gas saturation associated with vertical migration of deep gas to the near-surface.

Key words: seismic survey; engineering-geophysical surveys; seismic inversion; offshore geohazards.

**Дубиня Н.В.^{1,2}, Пирогова А.С.^{1,3}, Токарев М.Ю.³, Щуплов П.А.³,
Делия С.В.⁴**

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Dubinya.NV@gmail.com

²Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет),
г. Долгопрудный, Московская область

³МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмологии и геоакустики, г. Москва

⁴ТОО «Женис Оперейтинг», г. Актау, Казахстан

ПСЕВДОДВУМЕРНЫЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ РИСКОВ ПРИ БУРЕНИИ НА ШЕЛЬФЕ

Аннотация. Представлен подход к предварительной оценке рисков при бурении с использованием упрощенных псевдодвумерных геомеханических моделей. При рассмотрении подхода предлагается объединение результатов одномерного геомеханического моделирования, использующихся для расчета устойчивости ствола скважины, в двумерные поля значений эквивалентной плотности бурового раствора, соответствующей градиентам гидроразрыва пласта, вывалообразования и порового давления. Данные поля используются для выявления интервалов геологического разреза, сопряженных с потенциально высокими рисками при бурении. В публикации представлен количественный прогноз зон повышенных рисков при бурении для участка структуры Женис, расположенной на шельфе Каспийского моря.

Ключевые слова: геомеханика месторождений; расчет устойчивости ствола скважины; риски при бурении; напряженное состояние; эквивалентная плотность бурового раствора.

Задача прогноза рисков при бурении – одна из наиболее известных задач геомеханики месторождений углеводородов, решение которой имеет очевидную практическую значимость. Эта задача может быть сформулирована следующим образом [8]: вдоль проектируемой траектории скважины необходимо определить критические значения плотности бурового раствора, соответствующие возможным проблемам при бурении, таким как образование вывалов, утечкам бурового раствора в пласт и самопроизвольному развитию трещин гидроразрыва. Критические значения плотности бурового раствора определяют коридор безопасного бурения – диапазон значений плотности бурового раствора, для которых перечисленные выше проблемы не реализуются.

Для прогноза коридора безопасной плотности бурового раствора разработаны различные подходы [9]. Общий подход к решению этой задачи заключается в оценке упруго-прочностных свойств горных пород вдоль траектории проектируемой скважины и определении напряженно-деформированного состояния этих пород. Далее рассматривается задача об изменении напряженного состояния пород вследствие бурения скважины. Скважина играет роль концентратора напряжений, что ведет к перераспределению напряжений во вмещающих породах. Перераспределение напряжений, в свою очередь, может приводить к формированию областей, в

которых локальные напряжения преодолевают прочность породы – в этих областях происходят процессы разрушения. Основные виды разрушения, наблюдаемые при бурении, включают в себя сдвиговое разрушение, проявляющееся в образовании вывалов горных пород, ориентированных вдоль направления действия минимального главного напряжения, действующего в породах околоскважинного пространства, и разрушения растяжения, реализующегося как образование и развитие трещины гидроразрыва пласта в плоскости, перпендикулярной направлению действия минимального напряжения.

На данный момент разработано достаточно большое количество численных и аналитических моделей, связывающих параметры бурения с процессами разрушения. Эти модели могут иметь различную степень сложности, что определяется следующими факторами: пластическими деформациями пород околоскважинной зоны, их ползучестью, фильтрацией бурового раствора в пласт, температурными эффектами и прочими процессами. Вне зависимости от модели, ряд факторов, а именно, природные напряжения в пласте, поровое давление, прочность пород околоскважинного пространства и давление бурового раствора остаются ключевыми факторами, определяющими зарождение и развитие зон разрушения. При этом из всех вышеперечисленных факторов только давление бурового раствора может быть изменено при бурении. Таким образом, при определении условий для безопасного бурения ставится задача определения таких значений бурового раствора (регулируемых его плотностью), при которых нежелательные процессы разрушения горных пород не реализуются. Как правило, рекомендуемая плотность бурового раствора находится в пределах между плотностью, соответствующей началу вывалообразования, и плотностью, соответствующей зарождению трещины гидроразрыва.

Рассмотрены два общих подхода к прогнозу коридора безопасной плотности бурового раствора. Наиболее сложный и комплексный подход – трехмерное геомеханическое моделирование – предполагает численный расчет полей напряжений и деформаций в пласте. Для его проведения для месторождения или его участка должна быть построена модель механических свойств, содержащая в себе пространственные распределения упругих модулей и прочностных свойств пород, полученные по результатам интерпретации разномасштабных исследований: лабораторных исследований керна, результатов интерпретации геофизических исследований скважин и сейсмических съемок [7]. Далее скважинные и региональные данные используются для постановки граничных условий – природных напряжений, действующих на границе модели. Численно решается задача о поиске полей напряжений и деформаций, удовлетворяющих уравнениям равновесия, определяющим соотношениям и условиям совместности. Далее в известном поле напряжений рассматривается задача их концентрации в окрестности скважины, пробуренной вдоль проектной траектории. В результате для

проектной траектории определяются безопасные значения эквивалентной плотности бурового раствора.

Описанный выше подход является достаточно полным, однако его результаты чувствительны к погрешностям входных данных. При этом погрешности исходных данных и ошибки, сделанные в ходе их интерпретации, могут быть весьма значительны, причем это связано не только с несовершенством технологии, но и принципиальными вопросами механики. В частности, отсутствуют методы прямого измерения максимального горизонтального напряжения, играющего роль граничного условия. В связи с этим, на практике часто используется упрощенный метод оценки рисков при бурении: одномерное геомеханическое моделирование. Вдоль траектории скважины с использованием данных геофизических исследований скважин и результатов лабораторных исследований керна строятся профили упруго-прочностных свойств пород. Далее проводится оценка тектонических деформаций, и профили напряжений реконструируются в рамках пороупругой модели [6]:

$$\begin{aligned}\sigma_v(z) &= \int_0^z \rho(\zeta) g d\zeta - \alpha P_{por}(z), \\ \sigma_h(z) &= \sigma_v(z) \frac{\nu(z)}{1-\nu(z)} + [\varepsilon_h + \varepsilon_H \nu(z)] \frac{E(z)}{1-\nu(z)^2}, \\ \sigma_H(z) &= \sigma_v(z) \frac{\nu(z)}{1-\nu(z)} + [\varepsilon_H + \varepsilon_h \nu(z)] \frac{E(z)}{1-\nu(z)^2},\end{aligned}$$

где для глубины z определяются эффективное (в терминологии теории порупругости М. Био) вертикальное напряжение σ_v , максимальное горизонтальное напряжение σ_H и минимальное горизонтальное напряжение σ_h . Определяющими параметрами являются плотность пород ρ , коэффициент Био α , статические модуль Юнга E , и коэффициент Пуассона ν , поровое давление P_{por} и две деформации ε_h и ε_H , соответствующие тектоническим деформациям в направлениях действия минимального и максимального региональных напряжений соответственно. Необходимо отметить, что при рассмотрении данного подхода тектонические деформации могут быть приняты не зависящими от глубины [2]. Оценка значений этих деформаций выполняется на основании комплексирования прямых и косвенных оценок напряженного состояния пород околоскважинного пространства скважинными и лабораторными методами [1]. Напряжения, рассчитанные с помощью пороупругой модели, далее используются для расчета концентрации напряжений в окрестности скважины и расчета давлений бурового раствора, соответствующих началу вывалообразования и формированию трещины гидроразрыва. Одномерный подход имеет естественное ограничение: он может

быть применен только для конкретной траектории скважин и не может быть использован для решения таких задач, как прогноз зон повышенных рисков при бурении в объеме месторождения.

В объеме данной работы предлагается расширить возможности одномерного геомеханического моделирования именно для анализа массивов горных пород. Рассматривается задача прогноза зон повышенных рисков при бурении по сейсмическим данным без привлечения полноценного численного моделирования полей напряжений и деформаций. Эта задача может быть решена за счет построения множества одномерных геомеханических моделей. Основа подхода заключается в том, что вдоль каждой сейсмической трассы строится траектория псевдоскважины. Вдоль каждой такой псевдоскважины проводится реконструкция профилей упруго-прочностных свойств горных пород и напряжений на основе пороупругой модели. При этом статические упругие модули горных пород могут быть определены как функции от динамических упругих модулей, которые, в свою очередь, могут быть определены по результатам количественного анализа данных сейсморазведки [3, 5, 7]. Также вдоль каждой трассы задаются значения тектонических деформаций и градиент порового давления. Подходы к реконструкции порового давления, в частности, по сейсмическим данным, широко применяются на практике. В данной работе используется метод Итона [4], связывающий отклонения скорости продольных упругих волн от тренда с зонами аномалий порового давления. При определении значений тектонических деформаций предполагается, что они могут быть приняты постоянными по всему рассматриваемому объекту.

Объединение полученных для одномерных пороупругих моделей профилей напряжений вдоль множества сейсмических трасс (псевдодвумерная модель напряжений) приводит к получению полей напряжений, не удовлетворяющих точно уравнениям равновесия. Тем не менее, можно ожидать, что псевдодвумерные и истинные двумерные поля напряжений в целом соответствуют друг другу, т.к. деформации в масштабах участка месторождения на удалении от крупных разломов изменяются незначительно. Псевдодвумерные модели напряжений могут быть эффективно использованы для численного анализа рисков при бурении.

Дополнительно следует уточнить, что для данной работы каждая точка изучаемого разреза в результирующей модели характеризуется тремя значениями эквивалентной плотности бурового раствора, соответствующими вывалообразованию, гидроразрыву пласта и поровому давлению. Разность между эквивалентной плотностью гидроразрыва и максимумом из эквивалентных плотностей порового давления и вывалообразования характеризует ширину коридора безопасной плотности бурового раствора. В тех зонах, где эта разность минимальна, риски при бурении максимальны.

Описанный алгоритм выделения зон повышенных рисков при бурении на основании псевдодвумерного геомеханического моделирования был

реализован на структуре Женис, расположенной на шельфе Каспийского моря. По результатам предварительного качественного анализ данных сейсморазведки в районе работ были выявлены потенциально неблагоприятные для бурения зоны, характеризующиеся хаотической волновой картиной на сейсмической записи. Далее была выполнена количественная оценка рисков при бурении с использованием псевдодвумерной геомеханической модели. Связь между статическими и динамическими упругими модулями была установлена на основании анализа данных, полученных на соседних месторождениях. Профили порового давления были реконструированы по моделям скоростей продольных упругих волн. Значения тектонических деформаций были определены на основании региональных тенденций. В результате вдоль траектории проектной скважины с использованием пороупругой модели были восстановлены профили вертикального и двух горизонтальных эффективных напряжений. Эти профили в совокупности с данными о прочностных свойствах пород околоскважинной зоны, определенными по региональным зависимостям и результатам статического зондирования, были использованы для расчета критических значений плотности бурового раствора.

На следующем этапе оценки рисков при бурении параметры одномерной модели, построенной вдоль траектории проектной скважины, были без изменений использованы для построения множества одномерных моделей напряжений и прочностных свойств вдоль траекторий псевдоскважин, проходящих вдоль всех сейсмических трасс. Эти профили были использованы для расчета критических плотностей бурового раствора в каждой точке изучаемого геологического разреза. Разность между максимально и минимально допустимой плотностью бурового раствора, не приводящей к проблемам при бурении (ширина коридора безопасной плотности бурового раствора), была использована в качестве количественного параметра, характеризующего степень рисков при бурении в каждой области структуры в районе работ.

Было обнаружено, что области аномального поведения скоростей продольных волн, выявленные по результатам анализа сейсмических данных, коррелируют с областями минимальных значений ширины коридора безопасной плотности бурового раствора. Более того, области, в которых коридор безопасной плотности бурового раствора узок, локализуются в пространстве, что соответствует общим представлениям о механике образования зон повышенных рисков при бурении.

Полученные результаты были использованы для прогноза потенциальных рисков при бурении по всему рассматриваемому 2D профилю: ширина коридора безопасной плотности бурового раствора была рассмотрена как непрерывное двумерное поле. Области его минимальных значений были отнесены к областям максимальных рисков при бурении. В соответствии с

полученными моделями потенциальных рисков были сформулированы рекомендации по освоению объекта.

Исследования для данной работы были частично проведены в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 19-77-10062).

Список литературы

1. Дубиня Н.В. Обзор скважинных методов изучения напряженного состояния верхних слоев Земной коры // Физика Земли. 2019. № 2. С. 137–155.
2. Прогноз геометрии трещины гидроразрыва пласта / И.С. Афанасьев, А.Н. Никитин, И.Д. Латыпов, А.М. Хайдар, Г.А. Борисов // Нефтяное хозяйство. 2009. Т. 11. С. 62–66.
3. Castagna J.P., Batzle M.L., Eastwood R.L. Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks // Geophysics. 1985. Vol. 50. P. 571–581.
4. Eaton B.A. The equation for geopressure prediction from well logs // Proceedings of the Fall Meeting, Society of Petroleum Engineers of AIME. Dallas, TX, USA: SPE, 1975. ID SPE-5544-MS. <https://doi.org/10.2118/5544-MS>.
5. Gardner G.H.F., Gardner L.W., Gregory A.R. Formation velocity and density – the diagnostic basics for stratigraphic traps // Geophysics. 1974. Vol. 39. P. 770–780.
6. Prats M. Effect of burial history on the subsurface horizontal stresses of formations having different material properties // Society of Petroleum Engineers Journal. 1981. Vol. 21. No. 6. P. 658–662.
7. Prediction of physical-mechanical properties and in-situ stress state of hydrocarbon reservoirs from experimental data and theoretical modeling / N. Dubinya, S. Tikhotsky, I. Bayuk, D. Beloborodov, M. Krasnova, A. Makarova, O. Rusina, I. Fokin // Proceedings of SPE Russian petroleum technology Conference. Moscow: SPE, 2017. ID SPE-187823-MS. P. 1–15.
8. Wang Y., Dusseault M.B. A coupled conductive-convective thermo-poroelastic solutions and implications for wellbore stability // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2003. Vol. 38. P. 187–198.
9. Zoback M.D. Reservoir geomechanics. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 449 p.

N.V. Dubinya^{1,2}, A.S. Pirogova^{1,3}, M.Yu. Tokarev³, P.A. Shchuplov³, S.V. Deliy⁴

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Dubinya.NV@gmail.com

²Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Moscow Region

³Lomonosov Moscow State University, Moscow

⁴Zhenis Operating LLP, Aktau, Kazakhstan

PSEUDO-TWO-DIMENSIONAL GEOMECHANICAL MODELS AS A TOOL FOR PRELIMINARY RISK ASSESSMENT WHEN DRILLING ON THE SHELF

Abstract. It is presented a simplified approach for preliminary drilling risks assessment based on usage of pseudo-2D geomechanical models. The suggested approach assumes combining one-dimensional geomechanical models used for wellbore stability analysis to construct two-dimensional distributions of equivalent mud weight corresponding to hydraulic fracture initiation, wellbore breakouts formation, and pore pressure gradients. These fields are used to find the zones of geological sections associated with increased potential drilling risks. There are quantitative forecast of increased potential drilling risks for Zhenis geological structure located at Caspian Sea shelf.

Key words: field geomechanics; wellbore stability assessment; drilling risks; stress state; equivalent drilling mud weight.

**Васильев И.А.¹, Дубиня Н.В.^{1,2}, Начев В.А.^{1,3}, Алексеев Д.А.¹,
Тихоцкий С.А.^{1,2}**

¹Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет),
г. Долгопрудный, Московская область, vasiliev.ivan@phystech.edu

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

³Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН, г. Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ САМОПОДЪЕМНЫХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Аннотация. Публикация посвящена исследованию влияния внешних механических воздействий на устойчивость самоподъемных плавучих буровых установок (СПБУ). Целью работы является моделирование устойчивости СПБУ, находящейся в рабочем режиме, при воздействии на нее различных геодинамических процессов. Расчет устойчивости СПБУ в морском грунте со сложной упругопластической реологией при внешних механических воздействиях проводился с помощью метода конечных элементов. По результатам работы были определены пространственные распределения полей напряжений и деформаций как в самой СПБУ, так и в области грунта в окрестности ее опор, в равновесном и возмущенном состоянии. Результаты равновесных статических расчетов позволили проанализировать зоны локализаций напряжений и деформаций в СПБУ с позиций устойчивости.

Ключевые слова: самоподъемная плавучая буровая установка (СПБУ); донные отложения; численное моделирование; метод конечных элементов (МКЭ); добыча на шельфе; землетрясение.

Введение

В настоящее время все большее внимание уделяется освоению и разработке месторождений углеводородов, расположенных на континентальном шельфе. При освоении таких месторождений и бурении скважин активно используются самоподъемные плавучие буровые установки (СПБУ), основные подходы к проектированию и использованию которых были сформулированы сравнительно давно [2]. Эксплуатация СПБУ сопряжена с решением множества задач, не возникающих при освоении сухопутных месторождений. Отдельный интерес вызывает задача прогноза рисков при освоении шельфовых месторождений в регионах, характеризующихся повышенной сейсмической активностью.

Основным предметом данной работы являются механические процессы, приводящие к упомянутым рискам. Среди рисков можно выделить потерю устойчивости опорных колонн СПБУ, а также развитие в них механических повреждений. Реализация таких рисков напрямую зависит от механических процессов, протекающих как непосредственно в СПБУ, так и в донных грунтах в окрестностях опорных колонн. Эти механические процессы в значительной степени определяются множеством геологических факторов, в т.ч. наличием в грунтах зон аномально высокого пластового давления, многолетнемерзлых толщ и структурных особенностей строения [1]. При прогнозе различных

рисков в значительной степени используются инженерные подходы, основывающиеся на использовании эмпирических моделей, учитывающих поведение СПБУ в модельных условиях и на объектах, аналогичных рассматриваемым, – месторождениях-аналогах.

Несмотря на то, что методы изучения механических свойств продолжают активно развиваться [3], актуальными остаются вопросы точности в определении механических свойств верхних слоев донных отложений, необходимой для получения достоверных оценок рисков эксплуатации объектов инфраструктуры на шельфе.

Данные и методы

В работе приведен пример углубленного моделирования механического поведения СПБУ с целью прогноза рисков при ее эксплуатации. В качестве частной задачи рассмотрено поведение СПБУ и донных грунтов, на которых она установлена, при сейсмических воздействиях. По результатам численного моделирования были определены пространственные распределения полей напряжений и деформаций в самой СПБУ и в окрестности опорных колонн. Было рассмотрено равновесное напряженно-деформированное состояние (НДС) среды, обусловленное собственным весом СПБУ и сопротивлением грунтов, а также его возмущение, вызванное приходом поверхностной сейсмической волны от крупного землетрясения. В результате анализа рассчитанных полей напряжений были определены зоны их локализации в колоннах СПБУ и определены наиболее опасные с точки зрения потери устойчивости области. Кроме того, было исследовано влияние механических свойств грунтов на критические значения параметров, характеризующих сейсмический сигнал: в частности, была определена зависимость амплитуды волны, приводящей к превышению предела прочности материала колонн и их последующему разрушению, от статических упругих модулей грунта. В данной работе рассматривается модельная задача, однако созданный численный алгоритм может быть применен для прогноза устойчивости и анализа рисков с учетом особенностей рассматриваемых объектов и в реальных условиях.

Моделирование установки

СПБУ представляет собой корпус-понтон, являющийся одновременно и производственной площадкой. На понтоне размещается производственное и технологическое оборудование, жилые и служебные помещения, склады, площадка для вертолетов и т.д. Установка имеет колонны, опирающиеся в рабочем положении на морское дно и удерживающие корпус на заданной высоте над поверхностью воды. В походном положении опоры подняты над палубой понтона [2]. Основными режимами работы СПБУ являются походное положение (опоры подняты над палубой понтона) и рабочее (опоры задавлены

в грунт, корпус находится на заданной высоте над поверхностью воды). Наиболее «тяжелый» режим работы СПБУ – рабочее положение. Целью такого расчета является проверка устойчивости сооружения и определение максимальных нагрузок. В рабочем положении наиболее нагруженным является участок колонны, находящийся в контакте с нижним опорным поясом.

С точки зрения механики сплошных сред проблема механического поведения СПБУ, установленной на донном грунте, является примером классической контактной задачи: жесткое тело (СПБУ) погружено в среду с отличающейся реологией (донные отложения). Боковая поверхность опорных колонн служит поверхностью контакта: вдоль этой поверхности отсутствует скачок нормальных смещений среды, но может присутствовать скачок касательных смещений, обусловленных трением.

НДС среды определяется системой уравнений механики сплошных сред [4], состоящей из:

- уравнений движения;
- условий совместности деформаций;
- замыкающих соотношений, определяющих реологические особенности

среды.

Расчет устойчивости СПБУ в морском грунте со сложной вязко-упругопластической реологией при внешних механических воздействиях проводился с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Данный метод является основой большинства систем инженерного анализа. В работе модели СПБУ и грунт были разбиты на конечные элементы в форме тетраэдров. Там, где необходимо было обеспечить более точные значения исследуемых величин, их размер был уменьшен.

Для исследования зависимости устойчивости установки от сейсмического воздействия к модели было приложено внешнее возмущение, моделирующее крупное землетрясение. На одну из вертикальных границ модели донного грунта было задано динамическое граничное условие – зависимость изменения скорости смещения от времени, показанное на рис. 1. На грань, находящуюся напротив приложения сейсмического воздействия, были наложены ограничения по перемещению по трем осям координат.

Приведенный на рис. 1 сигнал представляет собой масштабированный по амплитуде фрагмент сейсмологической записи, полученной на станции WMQ (Урумчи, Китай) 11 марта 2011 г. после катастрофического землетрясения Тохоку по данным портала IRISI Global Seismogram Viewer [5]. Выбор указанного фрагмента отражает наиболее характерные особенности телесейсмических колебаний, связанных с удаленными землетрясениями большой магнитуды, и имеющих низкочастотную составляющую с периодами более десяти секунд.

На рис. 2 представлены отображения перемещений в модели системы «СПБУ–донный грунт». На рис. 2, а показаны перемещения, вызванные

действием силы тяжести СПБУ на грунт. На рис. 2, б – перемещения, вызванные приходом волны. На нем можно увидеть плоский фронт пришедшего воздействия.

Рис. 1. Зависимость скорости изменения сейсмического воздействия от времени

Рис. 2. Распределение перемещений под действием силы тяжести (а) и при приходе сейсмического воздействия (б)

Исследование зависимости устойчивости СПБУ от глубины задавливания опор

Обычно положение опор физических аналогов исследуемой СПБУ в грунте имеет малое значение – до 2 до 10 м. Но для исследования устойчивости установки данный диапазон был расширен до 52 м. Физически достигнуть подобного значения не представляется возможным.

Начальные условия, как и в предыдущих исследованиях были одинаковыми: на вертикальную грань модели грунта с боковой стороны СПБУ приходило сейсмическое воздействие, полученное на основании фактически существующих источников. Механические характеристики модели буровой установки и модели донных отложений оставались постоянными. Изменялось только глубина задавливания опор в грунт. В результате моделирования было получено семейство зависимостей максимального напряжения в узле одной из опор от времени (рис. 3). Из-за значительного количества полученных результатов данные зависимости нецелесообразно выводить по отдельности.

Рис. 3 Распределение максимального напряжения на опоре от глубины задавливания опор при фиксированном моменте времени

Более информативной является зависимость максимального напряжения на узле от глубины задавливания опор при фиксированном моменте времени. Момент времени был выбран исходя из максимального значения напряжения. Данная зависимость описывается логарифмической зависимостью с высоким коэффициентом достоверности R^2 .

Также, в настоящий момент, ведутся работы по созданию более детализированной модели: модель донных отложений разбита на три части с нелинейным сопряжением друг друга. Для каждого из слоев можно определять параметры проницаемости (проницаемость среды k , коэффициент пористости e , а также массу флюида в слое. При задании начальных условий можно установить параметры порового давления и пористости. На рис. 4 представлены визуальные отображения работы уточненной модели. На рис. 4, а показаны деформации, возникающие в модели под действием силы тяжести опоры. На рис. 4, б – изменение пористости под опорной колонной.

Рис. 4. Визуальное отображение работы уточненной модели

Заключение

Активно развивающиеся в настоящее время методы изучения реологических свойств донных грунтов для последующего построения моделей их механических свойств, в совокупности с привлечением все больших вычислительных мощностей для решения задач нефтегазового комплекса

позволяют перейти от инженерных подходов к прогнозу рисков при эксплуатации СПБУ к количественному анализу рисков на основе результатов расширенного численного моделирования.

Полученные в ходе работы результаты демонстрируют возможности математического моделирования для прогноза рисков при эксплуатации СПБУ во время освоения месторождений, расположенных на континентальном шельфе.

Список литературы

1. Марченко И.А. Особенности инженерных изысканий для постановки буровых платформ в арктических морях // Вести газовой науки. 2019. № 2(39). С. 149–156.
2. Самоподъемные плавучие буровые установки / Ю.А. Агагусейнов, Э.Л. Вишневская, И.П. Кулиев, С.Р. Лейбензон, А.Б. Маршлок, М.Н. Мочалов, В.Г. Саркисов. М.: Недра, 1979. 215 с.
3. Тихоцкий С.А., Дубиня Н.В., Начев В.А. Новый подход к оценке физико-механических свойств донных отложений в ходе проведения пробоотбора // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 495. № 2. С. 18–22. <https://doi.org/10.31857/S2686739720120117>.
4. Coussy O. Poromechanics. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 2004. 315 p.
5. The Global Seismogram Viewer – select an earthquake. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ds.iris.edu/gsv/> (дата обращения: 20.11.2021).

I.A. Vasilev¹, N.V. Dubinya^{1,2}, V.A. Nachev^{1,3}, D.A. Alekseev¹, S.A. Tikhotskiy^{1,2}

¹Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Dolgoprudny, Moscow Region, vasilev.ivan@phystech.edu

²Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow

³Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics, Russian Academy of Science, Moscow

INVESTIGATION OF THE STABILITY OF JACK-UP DRILLING RIGS DURING SEISMIC IMPACTS

Abstract. The work is devoted to the study of the influence of external mechanical impacts on the stability of jack-up floating drilling rigs (jack-up rigs). The aim of the work is to simulate the stability of the jack-up floating drilling rigs, which is in operating mode, and the impact on it of various geodynamic processes. Calculation of jack-up rig stability in sea soil with complex elastoplastic rheology under external mechanical influences was carried out using the finite element method. Based on the results of the work, the spatial distributions of stress and strain fields were determined both in the jack-up rig itself and in the area of the soil in the vicinity of its supports, in an equilibrium and disturbed state. The results of equilibrium static calculations made it possible to analyze the zones of localization of stresses and strains in the jack-up rig from the standpoint of stability.

Key words: jack-up floating drilling rig (jack-up rig); bottom sediments; numerical modeling; finite element method (FEM); offshore production; earthquake.

СЕКЦИЯ «АРХЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СОСТАВЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ»

Вязкова О.Е.

Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ),
гидрогеологический факультет, кафедра инженерной геологии, г. Москва, wjask@yandex.ru

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МУЗЕЕФИКАЦИИ АРХИТЕКТУРНО-АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКОВ НОВОРОССИЙСКОГО РАЙОНА

Аннотация. В последние годы резко изменилась ситуация с международным туризмом, что создало условия для комплексного развития российских южных курортов с созданием базы для культурного досуга. Одним из направлений является создание сети археологических музеев-заповедников под открытым небом там, где это возможно. Но решение о такой музеефикации может приниматься только после оценки потенциала природно-археологических систем к длительному устойчивому функционированию. Такую оценку должны давать инженер-геологи. Пример анализа инженерно-геологических условий, ориентированного на понимание возможности сохранения строительных конструкций оборонительных сооружений, приведен для Новороссийского района. Выявлены причины и механизмы разрушения, понимание которых позволяет принять меры, позволяющие не только сохранить, но и музеефицировать объект.

Ключевые слова: природно-археологические системы; музеефикация; Раевское городище; инженерно-геологические условия; пучение.

События последних лет, приведшие к ограничению возможностей зарубежного туризма, привели к возрастанию потока российских отдыхающих в Крым и Краснодарский край. Помимо пляжного отдыха, гостям регионов необходимо предоставлять разнообразную культурную программу, как это делается на курортах Турции и Египта. В России в нее традиционно включаются автобусные экскурсии на природные памятники (плато Лаго-Наки, ущелье реки Псахо, грязевые вулканы Таманского полуострова и др.).

Кроме природных достопримечательностей, этот регион обладает широким спектром исторических памятников, сформированных представителями различных цивилизаций и культур. Многие из них расположены в хорошей транспортной доступности от прибрежных курортов.

Археологические и архитектурно-археологические памятники во многих случаях хорошо изучены историками, что позволяет поднимать вопрос о музеефикации в условиях естественного ландшафта, что обеспечивает максимальную наглядность. Однако одной археологической изученности совершенно недостаточно для принятия решения об эффективности и безопасности этих мероприятий для сохранившихся памятников. Инженерно-геологические условия участков расположения памятников необходимо

предварительно оценить с точки зрения их влияния на выбор места первоначального расположения исторического объекта и его использования. А также на процессы, которые развивались в природно-археологической системе (ПАС) [5] в постэксплуатационный период. Именно развитие процессов, в настоящее время разрушающих элементы ПАС, может привести к невозможности обеспечить долгосрочную, безаварийную, надежную музеефикацию, которая обеспечит сохранность дошедших до нашего времени древних сооружений [2].

Достаточно хорошим примером музеефикации элементов городской инфраструктуры и жилой застройки является музей-заповедник под открытым небом «Горгиппия» в г. Анапе Краснодарского края.

К наиболее хорошо исследованным археологически и перспективным для музеефикации объектам, изучаемым Новороссийской экспедицией Института археологии РАН (рук. А.А. Малышев) относятся сохранившиеся элементы оборонительных сооружений Раевского городища и системы сигнально-сторожевых башен, что позволяют говорить об их конструктивной общности. Первые этажи башен и нижняя часть стен Раевского городища сложены из крупных блоков известняков, реже песчаников, скрепленных кладочным раствором из глинистых отложений коры выветривания мелового флиша. Верхняя часть сооружений была построена из блоков саманного кирпича, изготовленных из тех же отложений коры выветривания, по существу являющихся сильно карбонатизированными суглинками.

Инженерно-геологические условия участков расположения перечисленных памятников были оценены автором в 1998–2019 гг. (рис. 1). Результаты работ были неоднократно опубликованы [1, 3, 4, 6].

Рис. 1. Схема взаимной видимости между башнями (показаны не все возможные варианты) [6].
Обозначения: цифры – номера башен и их абсолютные отметки в м.; 1 – Анапская; 2 – Рассвет; 3 – Натухаевская; 4 – Дубки; 5 – Козлятник; 6 – РП–12; 7 – Раевское городище; 8 – РП–13; 9 – Пивни; 10 – Гудзева гора; 11 – Владимировка; 12 – Цемдолина; 13 – Цемесская Роща; 14 – Новороссийская; 15 – Сапун; 16 – Лиманчик; 17 – Озерейка; 18 – Мысхако; 19 – холм Динамии; 20 – Кабардинка; сплошные линии – достоверная видимость, пунктирные – предполагаемая

Как правило, верхние части сооружений уже давно разрушены, а вот нижние – местами достигают высоты в 3 м и более (юго-восточная башня Раевского городища, сигнально-сторожевая башня в Цемесской роще на момент обнаружения в 1967 г. имела высоту сохранившейся кладки 3,7 м) (рис. 2).

Рис. 2. Развалины башни в Цемесской Роще в августе 2013 г. имели высоту не более 1 м. Остальное с 1967 г. разобрали местные жители

Инженерно-геологические условия Новороссийского района обобщенно можно представить следующим образом.

Климат района умеренно-континентальный с чертами сухого субтропического [7]. Годовое количество атмосферных осадков – 500–600 мм, наибольшее количество которых выпадает в зимнее время года с декабря по март. При этом в зимний период температура зачастую опускается ниже -10°C и даже -30°C (зима 2005–2006 гг.). Метеостанция Анапы фиксировала абсолютные минимумы температуры почвы до -26°C (табл.). Из этих данных можно сделать вывод о том, что периодически может происходить промораживание верхних слоев почвы в состоянии повышенной и, даже избыточной, влажности.

Таблица

Температура поверхности почвы (Анапа. Почва – горно-лесная бурая) [7]

Месяцы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Год
$T_{\text{ср}}$	1	2	6	13	21	26	20	28	21	14	7	3	13
$T_{\text{ср.мин}}$	-2	-3	0	4	10	14	17	16	11	7	2	-1	5
$T_{\text{абс.мин}}$	-26	-22	-19	-8	-2	4	7	5	-3	-9	-18	-22	-26
$T_{\text{ср.макс}}$	6	8	17	28	39	46	51	48	39	27	15	18	28
$T_{\text{абс.макс}}$	21	29	37	48	58	61	62	64	56	45	33	21	64

Все археологические памятники расположены на участках со слабонаклонным рельефом эрозионно-денудационного типа.

В геологическом строении присутствуют отложения терригенно-карбонатного флиша мелового возраста (ритмичное чередование известняков, мергелей, алевролитов, песчаников, глин), покрытых элювиально-делювиальными глинистыми четвертичными отложениями.

Из наиболее развитых процессов, о которых сообщается в литературе, необходимо выделить физическое и химическое выветривание, плоскостной смыв, осыпи. При этом никогда не упоминалось о развитии в этом районе морозного пучения.

Однако наиболее распространенной деформацией сохранившихся фрагментов нижних частей стен является «крен» (не связанный с несущей способностью грунтов основания), причем его направление не всегда коррелирует с общим уклоном поверхности (такие деформации также отмечались неоднократно), на которой расположен объект. При этом формируется ступенчатый, отрицательный профиль стены с сохранением горизонтальности «залегания» блоков кладки (рис. 3). Более того, в ряде случаев наблюдается «крен» одной и той же стены сразу в двух направлениях (рис. 4). Особенностью проявления процесса является затухание деформаций в нижних рядах кладки и увеличение расстояния между блоками – в верхних.

Рис. 3. Отрицательный ступенчатый профиль кладок стен: а – смещение углового блока кладки башни Цемесская роща (фото О.Е. Вязковой, 2013 г.); б – смещение блоков в сторону дверного проема с сохранением горизонтальности в одном из сооружений Раевского городища (фото О.Е. Вязковой, 2008 г.). Красные стрелки показывают направление смещения блока

Эти наблюдения позволили объяснить деформации кладок развитием в них морозного пучения в кладочном цементе суглинистого состава. В верхних (из сохранившихся) частях кладки влажность цемента чаще достигает критических значений, при которых увеличение цемента в объеме при промораживании, преимущественно приводит к горизонтальным смещениям блоков в сторону от оси стены. Со временем уменьшается плотность и

увеличивается пористость и трещиноватость материала, заполняющего швы кладки, что способствует облегчению проникновения осадков и дальнейшему развитию процесса морозного пучения. На рис. 3, а и 4 хорошо видны субвертикальные щели между блоками и кладочным цементом, образовавшиеся после оттаивания и усыхания последнего.

Рис. 4. Смещение блоков кладки стены Раевского городища одновременно в обе стороны от оси стены с увеличением межблокового пространства. Красные стрелки показывают направление смещения блоков (фото О.Е. Вязковой, 2018 г.)

Затухание деформаций к нижним частям кладок объясняется тем, что влага не проникает на такую большую глубину в необходимых количествах, а периоды особенно низких отрицательных температур не продолжительны и глубина промерзания не превышает 20 см. Необходимо всегда иметь в виду, что до проведения раскопок нижние части кладок, как правило, перекрыты продуктами разрушения верхних частей стен, и это предохраняет их от промерзания и переувлажнения. После снятия завалов процессы усиливаются, что ставит под большие сомнения возможность их экспонирования в естественных условиях.

В заключение необходимо упомянуть, что архитектурно-археологические памятники Новороссийского района при музеефикации в условиях естественного ландшафта продолжают разрушаться по описанному механизму. Для сохранения обнаруженных конструкций при музеефикации необходимо возведение защитных сооружений, которые сделают невозможным попадание влаги в кладку стен в осенне-зимний период. Подобные сооружения возведены и успешно функционируют на территории музея-заповедника Болгар в Татарстане.

Список литературы

1. Вязкова О.Е. Инженерно-геологическое изучение археологических памятников п-ова Абрау // Известия вузов. Геология и разведка. 2002. № 5. С. 96–105.
2. Вязкова О.Е. Опыт и перспективы инженерно-геологических исследований при музеефикации памятников археологии // Софійські читання. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Памятки Національного заповідника “Софія Київська” та сучасні тенденції музейної науки». Київ: Академперіодика, 2007. С. 447–452.
3. Вязкова О.Е. О реконструкции высоты римских башен в Новороссийском районе // Доклады XI Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле». М.: Изд-во РГГРУ, 2013. Т. 2. С. 333.
4. Вязкова О.Е. Проблемы и результаты инженерно-геологических исследований археологических памятников Восточного Боспора // Сборник трудов к 80-летию кафедры инженерной геологии / Под ред. В.В. Пендина. Сергиев Посад: Патриарший издательско-полиграфический центр, 2013. С. 115–134.
5. Вязкова О.Е. Природно-археологические системы: понятие, структура, этапы формирования и функционирования // Известия вузов. Геология и разведка. 2015. № 6. С. 57–59.
6. Вязкова О.Е., Гольева А.А., Малышев А.А. Боспорская сигнально-сторожевая система на полуострове Абрау: результаты комплексных исследований // ABRAU ANTIQUA. Результаты комплексных исследований древностей полуострова Абрау. М.: Гриф и К, 2009. С. 212–240.
7. Справочник по климату СССР. Вып. 13. Ч. 2. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеиздат. 1966. 492 с.

О.Е. Vyazkova

Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI), Moscow, wjask@yandex.ru

ENGINEERING-GEOLOGICAL ASPECTS OF MUSEUMIFICATION OF ARCHITECTURAL AND ARCHAEOLOGICAL MONUMENTS OF THE NOVOROSSIYSK DISTRICT

Abstract. In recent years, the situation with international tourism has changed dramatically, which has created conditions for the complex development of our southern resorts with the creation of a base for cultural leisure. One of the directions here is to create a network of archaeological reserves-museums in the open air, where it is possible. But the decision about museification can be made only after assessing the potential of natural archaeological systems for long-term sustainable functioning. Such an assessment should be given by geological engineers. An example of an analysis of engineering-geological conditions, focused on understanding the possibility of preserving the

building structures of defensive structures is given for the Novorossiysk District. The causes and mechanisms of destruction have been identified, the understanding of which makes it possible to implement measures that allow both preservation and museification.

Key words: natural and archaeological systems; museification; Raevskoye fortified settlement; engineering-geological conditions; heaving.

Дубровин К.А.

Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ),
гидрогеологический факультет, кафедра инженерной геологии, г. Москва, kadubrovin@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ПЕРСПЕКТИВЫ МУЗЕЕФИКАЦИИ ПЕЩЕРНОГО ГОРОДА ЭСКИ-КЕРМЕН (РЕСПУБЛИКА КРЫМ)

Аннотация. Пещерные города представляют собой довольно сложную и «нестандартную» природно-археологическую систему, поскольку такие объекты включают надземную и (в большей степени) подземную подсистемы. Для обеспечения долгосрочного и безопасного функционирования подобных объектов в качестве музеев необходимо привлекать специалистов по инженерной геологии, которые смогут дать адекватную оценку необходимости проведения дополнительной инженерной защиты, которая позволит предотвратить ряд потенциально опасных, как с точки зрения техники безопасности, так и культурной ценности, процессов. В данной публикации представлен авторский подход к оценке состояния музея Эски-Кермен, являющегося одним из ярких представителей пещерных городов Крыма.

Ключевые слова: инженерно-геологические условия; музеефикация; симферопольский известняк; пещерный город; Эски-Кермен.

Пещерный город Эски-Кермен входит в состав Бахчисарайского историко-культурного и археологического музея-заповедника и является одним из основных представителей музеев своего вида на Крымском п-ове, одновременно с Мангуп-Кале и Чуфут-Кале (рис. 1).

Рис. 1. Пещерные города в составе Бахчисарайского историко-культурного и археологического музея-заповедника

Подобные пещерные города – это довольно сложная и «нестандартная» природно-археологическая система, включающая надземную и подземную подсистемы. В связи с этим, такие объекты заслуживают особого внимания, в т.ч. специалистов по инженерной геологии. Анализ влияния инженерно-геологических условий участков расположения таких памятников на их создание, эксплуатацию и сохранность, может позволить выделить некоторые их «слабые» места и дать рекомендации для более детального изучения.

В территориально-административном отношении средневековый пещерный город-крепость Эски-Кермен расположен в Бахчисарайском районе Республики Крым (рис. 2, а).

Рис. 2. Расположение объекта (а) и его условный план (б). Обозначения: 1 – северный вход, 2 – северный дозорный комплекс, 3 – осадный колодец, 4 – базилика, 5 – пещерные сооружения, 6 – центральный квартал, 7 – храм «Успения», 8 – храм «Судилище», 9 – главные ворота и дорога на южном входе, 10 – храм «Трех всадников», 11 – завершение маршрута. Сплошная белая линия – следы оборонительных стен; пунктир – предполагаемые утерянные оборонительные стены [1]

Впервые город упоминается в VI в. в качестве одного из византийских форпостов-крепостей, сооруженных на подступах к Херсонесу. Уже в VIII в. городище Эски-Кермен пережило нападение Хазарского каганата и временно перешло под его контроль. По мнению археолога Н.И. Репникова [1], в этот период были демонтированы те фортификационные сооружения, которые пережили штурм, за исключением пещерных, которые не было возможности демонтировать. Начиная с этого времени Эски-Кермен больше не являлся объектом оборонительного значения, только гражданским поселением. Городище вернулось под контроль Византии в IX в. Началась его новая активная застройка (в основном надземная) и экономический расцвет. Последнее ключевое событие приходится примерно на 1299 г., когда на город

напало войско орды эмира Ногая, разгромившее город и спалившее все его надземные усадьбы до основания.

На территории Эски-Кермен находится около 360 пещерных помещений [7], среди которых выделяются храмы «Судилище», «Успения», «Трех всадников», а также объект «Осадной колодец». Это позволяет относить его к пещерным городам. Подавляющее большинство пещерных помещений расположено в краевых частях скального массива застроенной части городища, в других его частях они встречаются в меньшем количестве. Территория городища ранее делилась на две части – плотно застроенную южную, и почти незаселенную северную, которые были отделены стеной, пересекающей плато с востока на запад (рис. 2, б). На территории города также имеются следы руин классических древних надземных построек в центральной его части.

Для обоснования музеефикации необходимо оценивать все компоненты инженерно-геологических условий.

Климат района предгорный, переходный от степного к горному. Максимальная отрицательная среднесуточная температура составляет -8°C , положительная $+34^{\circ}\text{C}$. Суммарное годовое количество осадков в среднем около 400 мм. Отдельно стоит упомянуть, что бывают годы с обильными и катастрофическими ливнями, последние из которых на момент подготовки публикации происходили 04.07.2021 и спровоцировали в районе Эски-Кермена сход селя [5].

Пещерный город находится на внутренней куэстовой гряде Крымских гор с крутыми уступами. Общее уменьшение абсолютных отметок происходит в направлении с юга на север. Максимальная для территории городища Эски-Кермен высотная отметка составляет около 340 м, минимальная – 240 м. Площадь платообразной поверхности останца составляет $0,13 \text{ км}^2$ [2]. Со всех сторон по периметру гора-останец ограничена вертикально-отвесными скальными обрывами (рис. 3) в среднем высотой около 30 м.

Рис. 3. Предупреждающий знак, крутой обрыв и вид на массив Топшан этой же куэстовой гряды с нанесенными геологическими индексами

Эски-Кермен находится в бассейне р. Бельбек, в верховьях одного из его притоков. Непосредственно на территории пещерного комплекса поверхностные водотоки отсутствуют.

Исходя из геологического строения региона и в соответствии с данными ближайших скважин (рис. 4), а также ряда работ [1, 2, 4, 7] строение горного массива Эски-Кермен представляется следующим. Так, в нижней части разреза залегают прочные и крепкие частично перекристаллизованные серые фораминиферовые и мшанковые известняки белокаменной свиты палеоцена. На них залегают отложения качинской свиты - серые песчанистые мергели и серовато-желтые глины с прослойками серых известняков. Далее в разрезе выделяются объединенные эоценовые отложения бахчисарайской и симферопольской свит, которые с помощью ряда работ автору удалось разделить [2, 6]. Бихчисарайская свита залегает на качинской и представлена серыми известковистыми глинами и мергелями. Мощность толщи составляет от 8 до 28 м. Далее залегают нуммулитовые известняки симферопольской свиты, которые и слагают горный массив Эски-Кермен - его платообразную поверхность и скальные уступы. Мощность отложений предположительно около 50 м. Наглядное залегание отложений бахчисарайской и симферопольской свит можно увидеть на дневной поверхности, что отображено на рис. 3.

Рис. 4. Фрагмент государственной геологической карты (масштаб 1:200 000, листы L-36-XXVIII, XXXIV)

В тектоническом отношении район горного массива Эски-Кермен расположен в зоне сочленения (шовной зоне) структур Скифской плиты и Горно-Крымского сооружения, которая характеризуется как Крымский глубинный разлом [1]. Согласно данным [4], что подтверждается авторскими натурными исследованиями, горный массив Эски-Кермен разделен на три системы трещин: «субмеридиональную, субширотную и субгоризонтальную,

согласную с напластованием. В массиве также развиты трещины бортового отпора, возникшие под давлением нагрузки и сил растяжения».

В геоморфологическом отношении район исследований расположен в крайней юго-западной части Внутренней гряды Горного Крыма, непосредственно сам Эски-Кермен представляет собой отдельный изолированный эрозионно-останцовый массив, с запада отделенный от горного массива Топшан балкой Джурла. Наклон известняковой толщи идет на северо-запад, в среднем под углом 10° [2]. Большое значение в формировании рельефа сыграли карстовые процессы.

Естественных водопроявлений на дневной поверхности горного массива Эски-Кермен в настоящее время не обнаруживается, однако, есть вполне достоверные исторические сведения о расположении на территории глубокого осадного колодца внушительных размеров [6]. Данный колодец по праву можно считать уникальным гидротехническим сооружением своего времени. Спуск в колодец представляет собой крутую лестницу из шести маршей. Далее, приблизительно 95 ступенек ведут к каптажной галерее длиной 10 м, в которой и происходило накопление воды. Максимальный запас воды в галерее мог достигать $75\text{--}85\text{ м}^3$. Механизм и источник накопления воды в колодце является до сих пор не до конца решенным вопросом. Одна из гипотез состоит в том, что древние строители перехватили своей выработкой небольшой подземный источник и сумели точно рассчитать углы наклона, направления и длины лестничных маршей, чтобы достичь оптимального доступа к воде. Скорее всего, бассейн-накопитель в природной пещере наполнялся карстовыми водами и конденсатом. Согласно гидрогеологической схеме, содержащейся в составе объяснительной записки к упомянутой выше геологической карте [1], горный массив Эски-Кермен находится в полосе распространения эоценового (P_2) водоносного горизонта.

Для принятия решений о стратегиях музеефикации городища важно знать физико-механические свойства симферопольских известняков (табл.), слагающих гору-останец.

Таблица

Физико-механические свойства известняков симферопольской свиты

Свойства	Значения		
	от	до	среднее
Объемная масса, г/см^3	1,92	2,32	2,12
Плотность, г/см^3	2,69	2,71	2,7
Предел прочности на одноосное сжатие, кг/см^2	90,5	282	186,25
Предел прочности на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии, кг/см^2	59,7	202	130,85
Водопоглощение, %	3,51	11,7	7,6
Коэффициент размягчения	0,56	0,98	0,77
Коэффициент морозостойкости	0,67	1	0,83

На территории древнего пещерного города-крепости Эски-Кермен фиксируются проявления таких экзогенных геологических процессов как выветривание, карст (древний), обвалы. На прилегающей территории в периоды ливней фиксируются сходы селей.

Оценка влияния инженерно-геологических условий осложняется в силу того, что музей – пещерный город Эски-Кермен – это довольно развертвленная природно-археологическая система, включающая надземную и, в большей степени, подземную подсистемы. Для обеспечения безопасного и долгосрочного функционирования пещерного комплекса Эски-Кермен в качестве музея, особенно с учетом все нарастающего антропогенного воздействия, по мнению автора, представляется нужным обеспечить:

– из-за существенного значения водопоглощения, симферопольские известняки довольно сильно подвержены выветриванию, из-за чего в некоторых, наиболее уязвимых местах объекта исследований, может потребоваться инженерная защита. Одним из способов защиты могут служить специальные пропитки, широко применяемые в строительстве, аналогичные примененным в музее-заповеднике «Горгиппия» в г. Анапе, где для укрепления сохранившихся и реконструированных кладок (со слов сотрудников музея) в 1980 гг. был разработан специальный укрепляющий раствор.

Увлажнение нуммулитовых симферопольских известняков происходит за счет атмосферных осадков, что особенно важно после событий лета 2021 г., особенностью которого можно считать период обильных ливней в Крыму. Согласно результатам исследований [3] на денудацию известняков также влияет температура воздуха в холодный период года и их промерзание. Авторами упомянутой работы была зафиксирована корреляционная связь скорости денудации с числом морозных дней, оттепелей и заморозков.

Изучение протекания процессов выветривания нуммулитовых симферопольских известняков особенно актуально для исследуемого пещерного города-музея, большая часть экспозиций которого состоит из описанных отложений, а именно: сами пещерные сооружения и блоки, используемые в качестве строительного материала в надземных сооружениях.

Представляется важным также проведение 3D-съемки пещерных комплексов музея, с целью дальнейшего математического моделирования их устойчивости. Особенно это касается сводов пещерных сооружений, расположенных в различных условиях и имеющих деформации конструктивных элементов.

Кроме того, объект исследований нуждается в детальном исследовании трещиноватости массива, оценки сплошности и блочности.

Список литературы

1. Державна Геологічна карта України масштаба 1:200 000. Кримська серія. Аркуші L-36-XXVIII (Євпаторія), L-36-XXXIV (Севастополь) /

- Б.П. Чайковский, С.В. Білецький, В.Б. Дээв, О.С. Дем'ян,
С.І. Краснорудська // Київ: Міністерство охорони навколишнього
природного середовища України, 2006.
2. Кузнецов Ал.Г. Горный массив Эски-Кермен как геологический памятник
Крыма // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10. № 1. С. 680–
683.
 3. Сухорученко С.К. Современные денудационные процессы нуммулитовых
известняков центральной части Крымских гор в районе г. Симферополя // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия География. 2010. Т. 23. № 1. С. 78–83.
 4. Тимохина Е.И., Климчук А.Б., Амеличев Г.Н. Геоморфология и
спелеогенез крайней юго-западной части эоценовой куэсты Внутренней
гряды Горного Крыма // Спелеология и карстология. 2011. № 7. С. 40–51.
 5. Информация по прохождению комплекса опасных метеоявлений // Официальный портал Главного управления МЧС России по Республике Крым. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://82.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/operativnaya-informaciya/4504287> (дата обращения: 15.11.2021).
 6. Эски-Кермен // Интернет-портал «Открытая Археология». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://открытаяархеология.рф/monuments/эски-кермен-городище> (дата обращения: 15.11.2021).
 7. Эски-Кермен // Официальный портал Бахчисарайского историко-культурного и археологического музея-заповедника. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://handvorec.ru/pamyatniki/pamyatniki-arheologii/eski-kermen/> (дата обращения: 15.11.2021).

К.А. Dubrovin

Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI), Moscow, kadubrovin@gmail.com

INFLUENCE OF ENGINEERING-GEOLOGICAL CONDITIONS ON THE PERSPECTIVES OF MUSEUMIFICATION OF THE RUPESTRIAN CITY OF ESKI-KERMEN (REPUBLIC OF CRIMEA)

Abstract. Rupestrian cities are complex and uncommon system. Since such objects are both a structure and part of the natural landscape, in order to ensure their long-term and safe functioning as museums, it is strongly recommended to involve specialists on engineering geology who will be able to give an adequate assessment of the need for additional engineering protection, which will prevent a number of potentially dangerous processes. In this publication, the authors tried to give such an assessment to the museum of Eski-Kermen, which is a prominent representative of the cave cities of the Crimea.

Key words: engineering-geological conditions; museumification; Simferopol limestone; rupestrian city; Eski-Kermen.

Беркович В.А., Гусаков М.Г., Фролов Н.В.

ООО «Археологические изыскания в строительстве», г. Москва, arheolog-rus@yandex.ru

АРХЕОЛОГИЧЕСКИЕ РАСКОПКИ НА СОЙМОНОВСКОМ ПРОЕЗДЕ В г. МОСКВЕ

Аннотация. На правом берегу руч. Черторый неоднократно проводились археологические раскопки. Здесь были открыты поселенческие комплексы четырех эпох русской истории, начиная с раннего средневековья и кончая XX в. Наиболее активно здесь обосновывались торговые люди начиная с XVII в. Постепенно, с течением времени, в этом районе проживали представители русской православной церкви: монастырские, храмовые и миряне.

Ключевые слова: торговля; обработка леса; строительный горизонт; индивидуальные находки.

Археологические работы, проведенные в 2015–2016 гг. на Соймоновском проезде в г. Москве, носили опережающий строительство характер. Была исследована значительная территория, свободная от современных зданий, коммуникаций и зеленых насаждений. Работы проводились ООО «Археологические изыскания в строительстве», с активным привлечением волонтеров из ВУЗов по профильным специальностям: МГУ имени М.В. Ломоносова, РГГУ, МГПУ, МПГУ.

Место заложения раскопов представлялось очень перспективным с точки зрения исторической застройки (рис. 1). Место действия – на правом берегу руч. Черторый, недалеко от его впадения в р. Москву. Вдоль этого берега по трассе современной ул. Остоженки от Крымского брода к Кремлю и далее на север и северо-восток проходила Смоленская дорога («из Киева через Смоленск во Владимир-на-Клязьме»). Одним из важных свидетельств ранних торговых отношений Руси являются клады куфических дирхемов. В пределах территории г. Москвы таких комплексов известно три. Один из них был обнаружен в 1830 гг. в устье руч. Черторый. Среди определимых, в клад входили монеты 862 и 866 гг., отчеканенные на территории Туркмении и Армении, находившихся в то время под властью Арабского халифата [3].

К наиболее ранним, известным по историческим документам, поселениям на этой территории относятся село Семчинское (Семциньское). Оно располагалось в районе современной ул. Остоженки.

Первое упоминание содержится в духовной грамоте Ивана Калиты (1328) [8]. Впоследствии Семчинское отмечалось в Духовных грамотах московских князей как великокняжеское владение, а также в Губной московской записи 1486 г. [1]. Центром села был храм Успения Пресвятой Богородицы, возникновение которого, вероятно, следует отнести ко времени основания села. Первое упоминание о церкви относится к 1625 г. [6].

Однако, это было не первое поселение в данной местности.

Рис. 1. Место археологических работ 2015–2016 гг. на средневековом (1) и современном плане (2) г. Москвы

Как известно, 1954 г. сотрудник Музея истории и реконструкции г. Москвы М.Г. Рабинович произвел осмотр района церкви Ильи Обыденного без проведения земляных работ.

Следующим исследователем этой территории Р.Л. Розенфельдом в 1976 г. был составлен «Паспорт памятника» (№ 1406/93, сост. 16-11-1976 г.), в котором определяется мощность культурного слоя (1,5–2,0 м), дается датировка городища (ориентировочно XI–XIII вв.), фиксируется некий «расплывшийся вал», отмечается наличие железных наконечников стрел и копий, ножей, керамики курганного типа. Впрочем, тут же следует пояснение, что материал не собран, обнаружен при рытье могил при церкви, и описан со слов служащих церкви Ильи Обыденного.

В период с 1934 по 1998 гг. на Обыденском холме проводились обширные вскрытия культурного слоя, сопровождавшиеся археологическими работами. Материалов ранее рубежа XV–XVI вв. не обнаружено [4].

Кроме материалов охранных археологических работ 2014 г., проведенных вне пределов Обыденского холма, представляет интерес объект на Пречистенской наб., д. 43 (работы А.Г. Векслера), в которых были зафиксированы две ямы, содержащие древнерусский материал, в т.ч.: «серую»

керамику, красноглиняный горшок с клеймом на донце, удила, металлический ключ.

В 2015–2016 гг. археологическими работами исследовалась территория, на которой было заложено четыре раскопа, в целом имевших одинаковую стратиграфию (рис. 2).

Рис. 2. Сводная стратиграфия раскопов 1–4

Строительный горизонт 1. Техногенные балластные напластования XX в. Сюда вошли строительные и нивелировочные подсыпки существовавшего в середине XX в. спортивного корта, а также фундаменты и заполнение подвала здания, разрушенного в 1941 г. авиационной бомбой, и в

дальнейшем не восстанавливавшегося. С этим подвалом связан интересный комплекс находок, локализуемых достаточно компактно в пределах подвала и вполне претендующих на определение «вещевой клад» времен Первой мировой войны – сабля (рис. 3), фрагменты ножен, свисток, подметка австрийского форменного сапога, медальная колодка, жетон «Солдату на подарки в окопы 1916». Следует отметить, что саблями подобного образца оснащались не только воинские части, но и полиция.

Рис. 3. Офицерская сабля – часть «вещевого клада» с раскопа 2

Строительный горизонт 2. Светло-серая супесь с включениями битого кирпича, кирпичной крошки, извести. Датируется концом XVIII–XIX вв. С этим горизонтом связаны прекрасно сохранившаяся булыжная мостовая (рис. 4) и кирпичные столбовые фундаменты на известковой основе. Следует отметить интересную находку – прикладную печать с рукоятью и щитком. Полная высота изделия с рукоятью 4 см, щиток восьмиугольный, каменный. На щитке изображен олень. Также примечательна находка «техосмотра XIX века» – бирка извозчика № 272 Пречистенской части за 1862 г. (рис. 5).

Строительный горизонт 3. Темно-серая супесь с включениями золы, навоза и древесной щепы. Датируется концом XVII–концом XVIII вв. Фиксируемые сооружения – бревенчатые вымостки, бревенчатые срубы, дренажные колодцы и дощатые сараи.

Рис. 4. Расчистка мостовой XIX в.

Рис. 5. Находки, обнаруженные при археологических раскопках

Этот строительный горизонт связан с деятельностью Лесных рядов. Огромная масса строевого леса поступала из верховьев р. Москвы, из-под Клина и Рузы [4] и складировалась в наиболее удобных для этого местах. Освоение поймы р. Москвы затруднялось из-за частых наводнений, случавшихся не только в весенние разливы реки, но и при дождевых паводках. Однако для складов леса именно высокая песчаная пойма левого берега была более пригодна, чем, например, заболоченные участки Замоскворецкой поймы. Этим было обусловлено хозяйственное использование береговых участков, как в XVII в., так и в дальнейшем – до второй половины XIX столетия [9]. Именно отсюда лес развозился на «торги» или «лесные дворы» по всей Москве – за линию Садовых, на Миусскую площадь («в Миусы»), в Сокольники. К «лесным

товарам» причислялись также бондарные («бочарные») изделия, плотничьи изделия, мох для конопаченья стен и даже лапти.

Самый крупный лесной торг – Лесной торг на Трубе, располагался вдоль стен Белого города, со стороны Земляного города, между Тверскими воротами и р. Неглинной. Он отмечен на множестве исторических карт, от Сигизмундова плана (1610 г.) и карты Мериана (1643 г.) до плана Мичурина (1739 г.).

Планировочная система района Лесных рядов на современном Соймоновском проезде, сложившаяся к началу XIX в. характеризовалась преобладанием крупных участков с периметральной, преимущественно деревянной застройкой. Владельцами участков становились купцы и мещане, в основном занятые ремесленничеством и торговлей.

Береговые участки составляли так называемый «Новый Лесной ряд» и сдавались их владельцами в аренду под склады леса и дров [2]. Между складами и застроенными дворами вдоль всех «береговых мест» шел проезд, земля которого оставалась в частной собственности владельцев береговых участков.

Археологический набор, связанный с этим строительным горизонтом, достаточно велик, и в процентном соотношении, превосходит находки других периодов (рис. 6). К деревообработке, к примеру, относятся следующие находки: фрагменты железных пил (7 шт.), буравы и вертикальные сверла (5 шт.), топоры железные (2 шт.), резцы железные (2 шт.), скобели для снятия коры (2 шт.), прочие орудия (6 шт.)

Рис. 6. Диаграмма соотношения количества находок по периодам

Строительный горизонт 4. Темно-серая супесь с отдельными включениями мелкозернистого песка. Датируется XVII в. Среди находок этого горизонта следует отметить нательные кресты, железные ножи, муравленные, «красные» и рельефные полихромные печные изразцы, кожаную обувь и ее элементы, ангобированные подсвечники, а также предметы импорта – поливную керамику, изготовленную на круге высокого вращения (так называемый «каменный рейнский товар») и голландскую стеклянную бусину. Строений в это время, по сравнению с вышележащими слоями, меньше, однако фиксируются несколько бревенчатых срубов и один колодец.

Из находок, перемещенных из нижележащих слоев, необходимо отметить медные монеты ручной чеканки «пуло московское» и «пуло тверское».

Глубже всех находился самый древний **предматериковый горизонт**. Он был представлен серой гумусированной супесью, и относился к XVI – первой половиной XVII вв. С этим горизонтом связаны материковые ямы и одна постройка (рис. 7), а также артефакты, в основном представленные монетами ручной чеканки и керамикой, в т.ч. «серой» и курганной.

Рис. 7. Пол сооружения 11 в раскопе 2 (сохранился частично)

В предматерике найдено несколько более ранних находок, среди которых стоит отметить две «денги» 1389–1425 гг. и 1425–1462 гг. периода правления великих князей Василия I и Василия II соответственно.

Обнаружены и еще более ранние находки – наконечник дротика льяловской культуры (IV тыс. до н.э.), кремневый отщеп, фрагмент каменного шлифованного топора фатьяновской культуры. Следует отметить, что эти находки залегали вне синхронных им комплексов в явно переотложенном состоянии.

Интересна находка в яме XVI в. изделия эпохи неолита/бронзы – кремневого наконечника. Острие наконечника листовидное, с полной

покрывающей бифасиальной ретушью, удлинённых пропорций, близкое к иволистному. В отечественной практике описания и наименования изделий из кремня эпох неолита и бронзы, подобные листовидные острия определяются как наконечники метательного оружия – дротика. Наиболее вероятная культурно-хронологическая принадлежность находки – льяловская культура (IV тыс. до н.э.). Не исключена принадлежность изделия к волосовской культуре (первая половина III тыс. до н.э.).

Достаточно заманчиво интерпретировать эту находку как «громовую», или «Перунову» стрелу, однако недостаточная в данном случае доказательная база обязывает высказываться с осторожностью. Поверья о «громовых стрелах» были широко распространены в народной среде Восточной Европы. В них говорится о предметах, которые появляются при ударе молнии о землю. Они предохраняют от грозы и пожаров, являются лечебным средством, считаются оккультными талисманами. Однако, известные (например, по материалам Великого Новгорода [7] «громовые стрелы» часто имели т.н. вторичную доработку – орнаментированный оклад из драгоценных металлов, либо медного сплава. «Громовые стрелы», обнаруживаемые в некоторых вятических курганах, такую доработку не имели, однако целенаправленность их помещения в погребение, как и их сакральное наполнение, сомнения не вызывает. Наконечник же с Соймоновского проезда мог иметь как смысловое значение «громовой стрелы» в XVI в., так и являться случайно попавшим в слой предметом, благо вещественный материал этого периода не являются для центра г. Москвы абсолютно уникальными [5, №№ 27–30, 40, 43, 64] (см. рис. 2).

Работы 2015–2016 гг. расширили знания о прошлом г. Москвы, а музейный фонд г. Москвы пополнился более чем 2000 исторических артефактов (рис. 8).

Рис. 8. Изразцы различных печных наборов, обнаруженные при раскопках

Список литературы

1. Акты Археографической экспедиции. СПб., 1836. Т. 1. С. 87.
2. Васнецов А.М. Лесной торг в старой Москве // Старая Москва: сб. статей по истории Москвы XVII–XIX вв. М., 1929. Сб. I. Вып. 5. С. 152–160.
3. Векслер А.Г., Мельникова А.С. Российская история в московских кладях. М.: Жираф, 1999. С. 35.
4. Кондратьев И.И. Обыденское городище. Судьба одного археологического открытия. 2004. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://independent.academia.edu/%D0%98%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D0%B4%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%8C%D0%B5%D0%B2> (дата обращения: 20.11.2021).
5. Культура средневековой Москвы. Исторические ландшафты: в 3 т. / Под ред. Л.А. Беляева, Т.И. Макаровой, С.З. Чернова. М.: Наука, 2004. Т. 1. 444 с.
6. Паламарчук П.Г. Сорок сороков: в 2 т. М.: Астрель, 2007. Т. 2. 293 с.
7. Седова М.В. Амулет из древнего Новгорода // Советская археология. 1957. № 4. С. 166–167.
8. Собрание государственных грамот и договоров (СГГД). М., 1813. Ч. 1. С. 59.
9. Чернозубова Л.Е. Из истории застройки Москвы в первой половине XIX в. // Архитектурное наследство. 1959. № 9. С. 26.

V.A. Berkovich, M.G. Gusakov, N.V. Frolov

Archaeological Surveys in Construction LLC, Moscow, arheolog-rus@yandex.ru

ARCHAEOLOGICAL EXCAVATIONS ON THE SOYMONOVSKY TRAY IN MOSCOW

Abstract. On the right bank of the Chertoriy brook archaeological excavations have repeatedly taken place. Settlement complexes of four eras of Russian history from the early Middle Ages to the XX century were archaeologically discovered here. Merchants were actively settling here since the XVII century but over the time representatives of the Russian Orthodox Church started to settle more often in this area.

Key words: trade; timber processing; construction horizon; individual finds.

Беркович В.А., Гусаков М.Г., Егоров К.А., Фролов Н.В.

ООО «Археологические изыскания в строительстве», г. Москва, arheolog-rus@yandex.ru

ГОРОДСКАЯ УСАДЬБА XIX в. В ХАМОВНИКАХ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ 2012 г.)

Аннотация. Участок археологических исследований находился за пределами Земляного города. Заселение этих мест началось в XVII в. В результате археологических работ было исследовано три строительных горизонта. С точки зрения истории, наиболее интересный слой был отмечен как нижний горизонт, который содержал материалы XVII–XVIII вв. Однако не менее интересен был слой, обозначенный как верхний горизонт, в котором были исследованы фундаменты нескольких жилых сооружений и обнаружены аналоги на старинных планах г. Москвы в Архиве Древних актов. В результате теперь достоверно известно, кто жил в этом месте, и кто сменил предыдущих жильцов впоследствии.

Ключевые слова: верхний горизонт; мощность слоя; усадьба; флигели; фундаменты; погреб; индивидуальные находки.

Летом 2012 г. в восточной части внутреннего двора Хамовнического пивоваренного завода по адресу ул. Льва Толстого, вл. 23/7 ООО «Археологические изыскания в строительстве» провело охранные раскопки¹.

Участок исследования находился за пределами Земляного города. Заселение этой территории началось в XVII в., и носило очаговый характер [14]. Здесь, вдоль четвертой линии городских укреплений, существовало несколько слобод, самой значительной из которых была Тверская Константиновская (дворцовая Хамовная) слобода. В ней были сформированы трассы современных улиц Льва Толстого и Тимура Фрунзе. В 1970-х гг. на территории слободы в палатах Хамовного двора археологические исследования проводил Музей истории и реконструкции г. Москвы [2, 3].

Площадь археологического раскопа 2012 г. составила 670 м². Средняя мощность исследованного культурного слоя сравнительно невелика – 0,80 м (с учетом ям – 2,00 м), однако в нем были выделены три стратиграфических горизонта:

- верхний горизонт – техногенные напластования конца XIX–XX вв.;
- средний горизонт – усадебные слои конца XVIII–XIX вв.;
- нижний горизонт – усадебные слои конца XVII–XVIII вв.

Основу верхнего горизонта составляла коричневая супесь, насыщенная фрагментами асфальта, кирпичной и известковой крошки, каменного угля. С

¹Научное руководство раскопками: А.Г. Векслер. Общее руководство работами: В.А. Беркович. Начальник раскопа: Н.В. Фролов. В работах принимали участие: А.С. Бородкина, Е.И. Ботников, И.А. Гриднев, К.А. Егоров, А.С. Елдунов, М.А. Мусатов, Ю.Е. Петров, И.С. Пикунов, Т.С. Поддаева, В.В. Самсонов, С.М. Царева, С.В. Шевченко, а также студенты и преподаватели московских вузов.

этим горизонтом связаны четыре ямы средних размеров (диаметр 2,5–3,0 м) и шесть коммуникационных траншей.

Средний горизонт был самым информативным и объединял в себе слои серой и светло-серой супеси с включениями кирпичной и известковой крошки, древесного тлена и угля. К среднему горизонту относятся многочисленные (более 50) ямы различного назначения (столбовые, хозяйственные и др.), траншеи, а также фундаменты усадебных построек первой половины XIX в.

Нижний горизонт был представлен слоями светло-серой супеси с незначительными включениями известки, древесного угля и кирпичной крошки. Археологические следы существовавшей здесь усадебной застройки менее выразительны, чем в среднем горизонте: шесть хозяйственных ям, три столбовые ямы и две траншеи (рис. 1).

Рис. 1. Раскоп. Сводный план ям и сооружений: а – современный перекоп; б – комплексы конца XIX–начала XX в.; в – кирпичная кладка; г – комплексы конца XVIII–XIX вв.; д – комплексы конца XVII–XVIII вв. Чертеж

Полнее всего сохранились фундаменты главного дома городской усадьбы первой половины XIX в. (рис. 2). В пределах раскопа были вскрыты каменные основания двух дворовых ризалитов (частей зданий, выступающих за основную линию фасада).

Рис. 2. Фундаменты главного дома усадьбы В.М. Лавровой – С.М. Жихаревой. Вид с северо-запада. Фото Ю.Е. Петрова

Западный ризалит (6,20×8,20 м (до борта раскопа)) был сооружен без подвала. Его фундамент сложен из материалов вторичного использования: белокаменные блоки (15–30×15–28×10–22 см), целые и фрагментированные кирпичи (26–28×10–11×6–7 см) на известковом растворе. Кладки опирались на неглубокую (10–20 см) забутовку из битого кирпича с известью.

В заполнении были расчищены восемь квадратных (30×30 см) опор под лаги пола, а также фундамент печи. Он находился в северной части ризалита между двух пар опор, на расстоянии 0,95 м от внутреннего контура северо-западной стены. В сооружении основания печи были использованы кирпичи и блоки, аналогичные стенным.

Следует отметить, что непосредственно под западным ризалитом находился засыпанный погреб рубежа XVIII–XIX вв.

Восточный ризалит (5,70×9,70 м (до борта раскопа)) был возведен более основательно. Здесь использовался только цельный кирпич (28×11×6 см). Кладка носила регулярный характер (верстовая перевязка, толщина швов 1,0–1,3 см). Средняя толщина стен составляла 45 см. По всей вскрытой площади ризалита был зафиксирован подвал, глубиной до 2,20 м. Его заполнение включало в себя: темно-коричневую супесь с кирпичным боем, известью, обрезками металлических труб, фрагментами стекла, кафельной плитки, арматуры и пр.

При выборке подвального помещения, были обнаружены изразцовые гвозди и скопление фрагментов печных изразцов (рис. 3). Судя по всему, они принадлежали единому печному набору второй половины XIX в. [10] и происходили из этого сооружения.

Рис. 3. Изразцовые гвозди (1, 2), фрагменты печных изразцов (3, 4, 5), реконструкция изразца (6). Рисунок Т.С. Поддаевой

Планиграфический анализ выявленных фундаментов привел к следующим выводам:

- разновеликие дворовые ризалиты были построены одновременно, по единому проекту, каждый с определенным назначением;
- сооружение было ориентировано по трассе Долгого Хамовнического переулка (современная ул. Льва Толстого) и отстояло от него примерно на 20 м;
- общая длина дома составляла 23,3 м.

У южной стены западного ризалита обнаружено основание дворовой печи (рис. 4). Оно представляло собой прямоугольную (2,56×1,42 м) с односторонним закруглением кирпичную конструкцию на известковом растворе. Ее ориентировка почти совпадала с ориентировкой здания. В кладке фундамента были использованы клейменные кирпичи завода Байдакова (1840–

1870-е гг.) [9]. Этот завод располагался рядом с Хамовниками, на Воробьевых горах. Здесь производился кирпич наилучшего качества – его использовали для ремонта некоторых построек Кремля, включая Грановитую палату [1].

Рис. 4. Расчистка основания дворовой печи. Вид с запада. Фото Ю.Е. Петрова

Обращение к материалам Центрального архива научно-технической документации (ЦАНТД) г. Москвы и архива Мосгорнаследия позволило получить дополнительные сведения по истории исследуемого участка.

Наиболее ранние из них относятся к послепожарному времени (с 1814 г.). Владение до 1820 г. принадлежало генерал-лейтенантше В.М. Лавровой, дочери генерал-поручика М.В. Муромцева (1737–1799 гг.) и вдове генерал-лейтенанта Н.И. Лаврова (1760?–1813 гг.) (рис. 5). При ней в центральной части усадьбы был построен деревянный главный дом с двумя разновеликими ризалитами. На переулок (современная ул. Льва Толстого) торцами выходили два прямоугольных флигеля, в глубине двора находились небольшие жилые и хозяйственные постройки (рис. 6).

Рис. 5. Портрет В.М. Лавровой. Конец 1810-х гг. Художник П.Ф. Соколов

Рис. 6. Фрагмент плана владения генерал-лейтенантши В.М. Лавровой. 1817 г. ЦАНТД
 г. Москвы. Ф. 1. Хамовническая часть. Ед. хр. 313.316.317/309-307. Д. 1. Л. 1

С 1832 по 1864 гг. усадьбой владела капитан-лейтенантша С.М. Жихарева, дочь сенатора М.Г. Спиридова (1751–1829 гг.), вдова отставного капитан-лейтенанта И.М. Жихарева (1786–?); родная сестра декабриста М.М. Спиридова (1796–1854 гг.) и двоюродная сестра философа и публициста П.Я. Чаадаева (1793–1856 гг.) [6, 18]. На плане, датированном 1842 г., отражены произошедшие к тому времени изменения. На месте главного дома, повторяя его конфигурацию и размеры, было построено новое жилое здание; флигели развернуты длинными сторонами вдоль красной линии переуллка; изменился и состав дворовых построек. На плане отмечено, что дом деревянный на каменном фундаменте, одноэтажный с антресолями (рис. 7).

Рис. 7. Фрагмент генплана владения капитан-лейтенантши С.М. Жихаревой. 1842 г. ЦАНТД г. Москвы. Ф. 1. Хамовническая часть. Ед. хр. 313.316.317/309-307. Д. 4. Л. 1

В дальнейшем, дом без серьезных изменений уже в составе Хамовнического пиво-медоваренного завода, основанного в 1863 г. купцом В.Е. Ярославцевым, просуществовал до 1926 г. [8].

При совмещении исторических и археологических планов было подтверждено, что раскопом 2012 г. были вскрыты фундаменты юго-западной части главного дома усадьбы В.М. Лавровой – С.М. Жихаревой.

Разновеликость ризалитов исследованного сооружения прослеживается по историческим материалам, и является характерным признаком для зданий московского ампира [13]. В XIX в. к юго-западу от Долгого Хамовнического переулка (современная ул. Льва Толстого) существовало несколько схожих по планировке усадеб.

По переулку ближе к церкви Николая Чудотворца в *Хамовниках* располагалась усадьба, принадлежавшая Л.Н. Толстому. Главный дом, сооруженный в 1805 г., в перестроенном виде существует до сих пор (ул. Льва Толстого, 21). Он находится на одной линии с домом В.М. Лавровой, и так же ориентирован.

С другой стороны (ближе к Девичьему полю) была усадьба Барковых, в которой одно время жила французская актриса Мелани Гильбер. До своего отъезда в Россию она покорила сердце молодого Стендаля, который находясь осенью 1812 г. в Москве безуспешно искал ее в горящем городе и потом неоднократно вспоминал о ней в своих письмах [16, 17]. По своей композиции усадьба Барковых очень близка к изучаемой усадьбе. Здесь по внешней границе владения было два флигеля, в центральной части – главный дом с ризалитами, в глубине двора – хозяйственные постройки и сад.

В ходе раскопок была сформирована большая коллекция индивидуальных находок. Всего найдено более 1300 предметов. Их хронологический диапазон: конец XV–начало XX вв., с существенным преобладанием материала XVIII–первой половины XIX вв.

Следует отметить, что находки конца XV–XVI вв. (две монеты ручной чеканки (определение пломб и монет производилось С.П. Петуховым), фрагменты «красных» рельефных изразцов, часть керамической игрушки, пулелейка) малочисленны. Они обнаружены вне синхронных им комплексов, и носят, по-видимому, случайных характер (рис. 8).

Рис. 8. Находки конца XV–XVII вв.: 1 – фрагмент игрушки; 2, 3 – монеты; 4, 5 – фрагменты изразцов; 6 – пулелейка (1, 4, 5 – керамика; 2, 3 – медный сплав; 6 – железо). Рисунок Т.С. Поддаевой

Наиболее ранней находкой в раскопе 2012 г. явилась медная монета – «пуло» периода правления Великого князя Ивана III Васильевича (1462–1505 гг.) [5, 7]. Монета была отчеканена на Московском денежном дворе. Ее вес 0,56 г. На лицевой стороне монеты изображен петух с зубчатым гребнем, на оборотной – следы трехстрочной надписи: ...пл/кокн/нвов (см. рис. 8, 3).

Также заслуживает внимания железная пулелейка (см. рис. 8, 6). Она представляла собой шарнирные одногнездовые щипцы, предназначенные для изготовления мелких (диам. 6–7 мм) пистолетных пуль или дроби.

Находки из нижнего стратиграфического горизонта (конец XVII–XVIII вв.) отличаются большим разнообразием и составляют значительную часть коллекции. Среди них: предметы быта (светильники, курительные трубки, игрушки, ключи, вилки, столовая посуда и пр.); предметы одежды (металлические, костяные и деревянные пуговицы, обувные подковки, накладки); нательные кресты; монеты; строительные материалы (рельефные полихромные изразцы, кованые гвозди, пробой, подставы); отходы косторезного ремесла (рис. 9, 10).

Рис. 9. Находки конца XVII–XVIII вв.: 1, 2 – светильники; 3 – ключ; 4, 5, 6 – пуговицы (1, 2 – керамика; 3 – железо; 4 – кость; 5, 6 – медный сплав). Рисунок Т.С. Поддаевой

Рис. 10. Находки конца XVII–XVIII вв.: 1 – пластина; 2, 6 – нательные кресты; 3, 4 – клейма штофов; 5 – накладка; 7 – фрагмент монеты (1 – кость; 2, 5, 6 – медный сплав; 3, 4 – стекло; 7 – серебро). Рисунок Т.С. Поддаевой

Особый интерес представляют две нумизматические находки. Это – фрагмент серебряного рубля Петра II (1727–1730 гг.) со следами намеренной порчи и часть медной пластины с оттиском монеты «5 копеек» 1764 г. (см. рис. 10, обозначения 5, 7).

Среди других находок, характеризующих этот горизонт, также следует отметить клейма от стеклянных штофов (см. рис. 10, 3, 4). На них присутствует увенчанная короной маркировка: LONDON (вариант: LONDEN). Штофы с подобными клеймами часто встречаются в культурном слое XVIII в. как г. Москвы, так и других русских городов. В литературе высказано мнение, что многие из них являлись местным подражанием английскому импорту [4].

Найденный в этом горизонте керамический материал был представлен основными типами сосудов, характерными для московских слоев конца XVII–XVIII вв.: черно- и светлолощенная, мореная, белоглиняная расписная и белоглиняная гладкая посуда. Также было зафиксировано небольшое количество немосковской, т.н. «деревенской», белоглиняной и красноглиняной керамики (горшки), характеризующейся плохим качеством обжига и включениями в тесто крупных примесей песка и органики.

Непосредственно с усадьбой В.М. Лавровой – С.М. Жихаревой связаны основные находки из среднего горизонта (конец XVIII–XIX вв.). Это – большая серия гладких расписных изразцов, пуговицы, мебельная фурнитура, поливные помадные (косметические) банки, керамические подсвечники, фрагмент эфеса, металлические столовые приборы, фрагменты фарфоровой и фаянсовой посуды (рис. 11).

Рис. 11. Находки конца XVIII–XIX вв.: 1 – фрагмент образка; 2 – фрагмент эфеса шпаги; 3 – фрагмент подсвечника; 4 – монета; 5 – самоварный ключ; 6 – чашка (1 – эмаль; 2 – медный сплав, позолота; 3 – керамика; 4, 5 – медный сплав; 6 – фарфор).

Рисунок Т.С. Поддаевой

Может не случайно здесь был найден эмалевый образок святой великомученицы Варвары (первая владелица усадьбы – **Варвара Матвеевна Лаврова**). От него сохранился только красочный слой с поясным изображением св. Варвары в короне, белой тунике и красном плаще. С левой стороны нимба расположена надпись: **с му варвара** (см. рис. 11, обозначение 1). Палеографические особенности написания букв «а» и «в» позволяют отнести образок к XVIII в. [19].

Повседневную жизнь московской городской усадьбы иллюстрируют следующие находки:

– самоварный ключ медного сплава (см. рис. 11, 4). Он сохранился полностью и представляет собой круглый в поперечном сечении прут со сквозным горизонтальным каналом и ажурным навершием;

– верхняя часть розовоглиняного поливного подсвечника с ручкой (см. рис. 11, обозначение 3). Подсвечник был изготовлен из смеси красножгущихся и беложгущихся глин, и покрыт непрозрачной поливой темно-зеленого цвета.

– фарфоровая чаша с клеймом (см. рис. 11, обозначение б). Ее внешняя поверхность была украшена золотой росписью, нанесенной по бирюзовому фону, а в овальных «окнах», размещены изображения пейзажного характера. Судя по клейму на донце, эта чаша была изготовлена в 1850-е гг. на подмосковной фабрике А.Киселева [11].

Заводской период в истории участка нашел свое отражение в характерном составе находок второй половины XIX–начала XX вв.: стеклянная тара из-под пива, коньяка, лимонада, сельтерской и минеральной воды различных заводов – *Хамовнического, Шустова, Попова, Калинкина, Ланкина, Германа* (определением изделий из стекла занимался Ю.А. Лихтер); товарные пломбы (32 экз.); российские монеты (12 экз.) (рис. 12). Бутылки самого Хамовнического пиво-медоваренного завода изготавливались из зеленого или коричневого прозрачного стекла. Их тулово кроме двуглавого орла и надписей отмечала эмблема завода (см. рис. 12, обозначение 1).

Рис. 12. Находки 2-й половины XIX–начала XX вв.: 1 – бутылка; 2, 3, 4 – пломбы; 5 – бутылочное клеймо; 6 – флакон (2, 3, 4 – свинец; 1, 5 – стекло; 6 – керамика).

Рисунок Т.С. Поддаевой

Анализ археологических источников позволяет реконструировать историю хозяйственного освоения и застройки исследуемого участка следующим образом:

– до конца XVII в. эта территория, представлявшая собой часть Девичьего поля, оставалась незастроенной. Дворы Хамовной слободы сюда не доходили. Не выявлены здесь и следы пашни, сада или огорода. Культурный слой на участке практически не формировался, а находки средневекового времени единичны;

– в петровское время на участке появились первые усадьбы. К этому периоду относится упоминание поселения *«разных чинов людей»* [15], существовавшего с внешней стороны Пречистенских ворот Земляного города в приходе церкви Знамения Богородицы *в Зубове* (не сохранилась) [12];

– в XVIII–начале XIX вв. на участке продолжали существовать усадьбы. Как и в предыдущем периоде, застройка была полностью деревянной с незначительной степенью заглубления в грунт. Следы пожаров не выявлены;

– в первой половине XIX в. на располагавшихся здесь усадьбах велось деревянное и каменное строительство. В дальнейшем эти постройки в разной степени были приспособлены под нужды Хамовнического пивоваренного завода.

Список литературы

1. Баранова С.И. Москва изразцовая. М.: Московские учебники, 2006. 397 с.
2. Векслер А.Г. Археологические исследования памятников архитектуры в г. Москве // Археологические открытия 1977 г. М., 1978. С. 50, 51.
3. Векслер А.Г. Москва в Москве: история в недрах столицы. М., 1982. С. 217–219.
4. Векслер А.Г., Лихтер Ю.А. Об одном виде клейм на стеклянных штофах XVIII века // Археология Подмоскovie: материалы научного семинара. М., 2014. Вып. 10. С. 247–250.
5. Гайдуков П.Г. Медные русские монеты конца XIV–XVI веков. М., 1993. С. 204.
6. Декабристы. Биографический справочник / Под ред. С.В. Мироненко, М.В. Нечкина. М., 1988. С. 169–170.
7. Зайцев В.В. Русские монеты времени Ивана III и Василия III. Киев, 2006. С. 96.
8. Историко-архитектурное обследование Московского экспериментального завода напитков «Пиво из Хамовников», кв. № 457, домовладение № 309, ул. Льва Толстого, 23. Т. 1. М., 1994. ГУОП г. Москвы. Научно-исследовательский методический центр. Центр научной документации. Ш. 879/95. С. 14.
9. Киселев И.А. Архитектурные детали в русском зодчестве XVIII–XIX веков. М., 2005. С. 308–309, рис. 243.

10. Маслих С.А. Русское изразцовое искусство XV–XIX веков. М., 1976. Рис. 299.
11. Мусина Р.Р. Марки российского фарфора (1744–1917). М., 1995. С. 31, рис. 335.
12. Паламарчук П.Г. Сорок сороков: краткая иллюстрированная история всех московских храмов: в 4 т. М.: Книга и бизнес, 1995. Т. 3. С. 352–353.
13. Памятники архитектуры Москвы. Земляной город. М.: Искусство, 1989. 351 с.
14. Памятники архитектуры Москвы. Территория между Садовым кольцом и границами города XVIII века (от Земляного до Камер-Коллежского вала). М.: Искусство, 1998. 423 с.
15. Проект организации охранных археологических работ в связи со строительством административно-жилого комплекса по адресу: ул. Льва Толстого, вл. 23/7. М., 2008. ГУОП г. Москвы. Научно-исследовательский методический центр. Сектор документальных фондов. Ш. 1789/08. С. 24.
16. Стендаль. Собрание сочинений: в 15 т. М.: Правда, 1959. Т. 13. 456 с.
17. Стендаль. Собрание сочинений: в 15 т. М.: Правда, 1959. Т. 15. 368 с.
18. Чаадаев П.Я. Полное собрание сочинений и избранные письма: в 2 т. М.: Наука, 1991. Т. 2. 672 с.
19. Черепнин Л.В. Русская палеография. М., 1956. С. 478, табл. 17.

V.A. Berkovich, M.G. Gusakov, K.A. Egorov, N.V. Frolov

Archaeological Surveys in Construction LLC, Moscow, arheolog-rus@yandex.ru

CITY MANOR OF THE XIX CENTURY IN KHAMOVNIKI (BASED ON THE RESULTS OF ARCHAEOLOGICAL RESEARCH IN 2012)

Abstract. The site of archaeological research was located outside the Zemlyanoy Gorod. Settlement of these places began in the XVII century. As a result of archaeological work, three construction horizons were studied. Historically, the most interesting layer was marked as the lower horizon, which contained material from the XVII–XVIII centuries. However, no less interesting was the upper horizon in which the foundations of several residential buildings were examined. Analogues of these buildings were found on the old plans of Moscow in the Archive of Ancient Acts. As a result, now it is well-known people who lived in this place and who later replaced them.

Key words: upper horizon; layer thickness; manor house; wing; foundations; root cellar; individual finds.

Казначеев П.А., Камшилин А.Н., Ушаков Д.А., Кох В.В., Краюшкин Д.В.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, p_a_k@mail.ru

ПОИСК СКРЫТЫХ ПУСТОТ И ОСЛАБЛЕННЫХ ЗОН ПОД ДНОМ ИСКУССТВЕННОГО ВОДОЕМА С ПОМОЩЬЮ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКОВОГО МЕТОДА: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Аннотация. Геофизические методы, разработанные для одних приложений, активно начинают использоваться в других сферах. Например, археологическая геофизика привлекает все больше новых геофизических методов при проведении инженерно-геологических изысканий. Одно из таких приложений – обнаружение ненормативных фильтрационных потоков, которые могут нарушать функционирование и целостность гидротехнических сооружений. Особенно опасны повреждения противофильтрационных элементов, скрытых в грунтовых толщах от прямого наблюдения. Электроразведочные геофизические методы подходят для их выявления. На основе предложенного ранее измерителя плотности электрического тока был разработан геоэлектрический токовый метод обнаружения зон повышенной утечки электрического тока, ассоциируемых с зонами грунта, ослабленными из-за фильтрации. Проведен пробный полевой эксперимент в небольшом искусственном бетонированном водоеме с известной утечкой воды. По данным измерений тока определены возможные ослабленные зоны. Показано, что метод может быть полезен в археологической геофизике.

Ключевые слова: геоэлектрика; инженерно-геологические изыскания; археологическая геофизика; гидротехнические сооружения; фильтрация; противофильтрационные элементы; токовые измерения; локальный измеритель тока.

Введение

Электроразведочные методы при проведении инженерно-геологических изысканий активно используются в археологической геофизике. Современное развитие показывает, что задачи таких приложений зачастую схожи и в большей степени определяются характером исследуемого объекта. Одно из таких приложений – исследование частично покрытых водой искусственных объектов-водоемов, затопленных сооружений, прибрежных зон с сильным антропогенным влиянием (см., например, [3]). В инженерной геологии есть схожие задачи, связанные, прежде всего, с обследованием гидротехнических сооружений. Последние представляют собой сложные искусственные объекты, тесно связанные с природной средой. Они предназначены для изменения направлений естественных потоков воды, удерживания больших объемов жидкостей. Наиболее крупные гидротехнические сооружения – водохранилища, которые включают в себя дамбы и плотины, береговые укрепления, шлюзы и т.п. Основную задачу по удержанию объема воды в водохранилище осуществляют плотины и дамбы. Они имеют сложную структуру, позволяющую, с одной стороны, блокировать водные потоки, а с другой – быстро, эффективно и экономично вести строительство.

Противофильтрационные элементы в их структуре непосредственно блокируют потоки воды.

Аварии на гидротехнических сооружениях – крайне серьезное бедствие [6]. Одной из причин аварий является изменение структуры гидротехнического сооружения из-за ненормативной фильтрации. Существуют разные методы оценки суммарного объема фильтрации (через контроль расхода воды в водохранилище) и поиска зон фильтрации, среди которых подкрашивание воды, маркирование изотопами или идентификация по исходному составу. Для контроля грунтовых плотин используются визуальные (поиск водопроявлений), геодезические (оценка просадок) и гидрологические (обнаружение изменения уровня грунтовых вод) методы [5].

Несмотря на наличие разных методов, поиск причин и зон повышенной неконтролируемой фильтрации остается важной и актуальной инженерно-геологической задачей. Наибольший интерес для решения этой задачи представляют геофизические методы, позволяющие проводить дистанционный неразрушающий контроль состояния сооружений.

Геофизические методы инженерно-геологической направленности широко применяются для определения и контроля структуры искусственных сооружений, в т.ч. гидротехнических. Они дают возможность выявить отклонения структуры гидротехнического сооружения от проектной, ее изменение и деградацию. К активно используемым методам относятся методы электроразведки, в т.ч. – электротомография [4, 7, 9]. Указанные методы хорошо разработаны и позволяют оценить структуру гидротехнического сооружения при высоком контрасте электрических свойств элементов сооружения, зависящих от их насыщения водой.

Существующие методы электроразведки не всегда позволяют получить достаточную информацию о состоянии подобных объектов. Одно из препятствий состоит в том, что исследования обычно проводятся на доступной сухой части гидротехнического сооружения с высоким электрическим сопротивлением (на гребне плотины). Электродные исследования в водной части обычно ограничиваются измерением горизонтальных составляющих поля вблизи на поверхности воды. При этом трудно оценить геоэлектрический разрез в стороне от профиля установки.

Измерение электрического поля в водной (жидкой) среде возможно и успешно проводится с помощью традиционных измерительных электродных пар. Однако такие исследования на низких частотах предполагают гальванический контакт электрода со средой и обладают рядом недостатков. Первый из них – возникновение контактных явлений на границе электрод–среда, второй – наличие двух разнесенных в пространстве электродов для определения разности потенциалов, тогда как необходимо знать электрическое поле в одной точке среды. Поэтому авторами было предложено для обнаружения зон фильтрации измерять электрическое поле с помощью бесконтактных измерителей тока [8]. Один измеритель тока позволяет

определить одну электрическую величину (плотность электрического тока) практически в одной точке среды (точнее – в локальной области около себя) и исключает возникновение любых контактных явлений. Предыдущие опыты показали возможность измерения плотности электрического тока с помощью измерителя тока в грунтах [1]. Исследованию применимости токового метода для контроля плотин посвящена отдельная работа [2].

Для того чтобы проверить возможность обнаружения зон фильтрации в водоемах с помощью токового метода, использующего измерители тока, был спланирован и проведен полевой эксперимент. Суть эксперимента заключалась в измерении распределения плотности электрического тока в водоеме с фильтрацией, установленной по факту потери воды.

Методы и объект исследования

Фильтрация воды из водоемов определяется фильтрующей способностью грунтов, слагающих основание и борта. Она, в свою очередь, определяется коэффициентом проницаемости, измеряемым в м^2 . Измеритель тока позволяет определить величину плотности тока j (А/м^2), нормированной к току генератора I_A . Она имеет размерность $1/\text{м}^2$, ее можно представить как «коэффициент проникновения электрического тока», и она определяется удельным сопротивлением грунтов. Если между коэффициентом проницаемости и сопротивлением грунтов есть корреляция, то обнаружение зон фильтрации возможно по данным о распределении j/I_A .

Объект исследования представлял собой искусственный пруд размерами по берегу около 8×6 м и максимальным объемом не более 50 м^3 . Дно и стены пруда частично забетонированы, но дно имеет видимые нарушения сплошности около центра и на некоторых стыках со стенками (рис. 1, а). Установка зондирования (см. рис. 1) состояла из излучающей и измерительной частей. Один из излучающих электродов представлял собой диск из нержавеющей стали диаметром около 0,4 м, который прикреплялся к поплавку и погружался в воду («водный» электрод, см. рис. 1, б). Второй излучающий электрод представлял собой полусферу из нержавеющей стали радиусом около 0,08 м, размещался в залитой водой лунке и был унесен на условную бесконечность (на ~ 30 м от пруда, «земляной» электрод).

К излучающим электродам подсоединялся генератор Rigol DG1022Z через усилитель мощности Rigol PA1011. Это обеспечивало возможность генерации синусоидального сигнала частотой от 0,1 Гц до 1,0 МГц с напряжением амплитудой до 10 В и с током до 1 А. Ток генератора I_A измерялся отдельным датчиком. За счет всех использованных мер и, прежде всего, за счет большой площади электродов, приведенное ко входу генератора эквивалентное сопротивление составило около 100 Ом.

Рис. 1. Установка токовых измерений в полевом эксперименте: вид на установку в плане целиком (слева) и вид в разрезе на плавучий зонд (справа).

Обозначения: 1 – электрометрическая аппаратура, 2 – соединяющие кабели, 3 – «земляной» излучающий электрод, 4 – плавучий зонд, 5 – берег водоема, 6 – контур дна водоема, 7 – поплавок, 8 – «водяной» излучающий электрод, 9 – поддерживающие тросы, 10 – измеритель тока, 11 – пригруз и концентратор тока. Контур водной поверхности показан штриховой синей линией, приблизительное положение нарушений дна водоема показано штриховкой. Размеры даны в сантиметрах

Непосредственно в эксперименте ток излучающего электрода составил около 0,1 А, работа проводилась при синусоидальном сигнале частотой 170 Гц. Все измеряемые значения – амплитудные.

Измеритель тока располагался под излучающим электродом (см. рис. 1, б) и измерял вертикальную составляющую плотности тока. Под измерителем тока располагался трубообразный элемент, обеспечивающий пригруз и концентрацию тока для большей стабильности измерений [1]. Поплавок, «водный» электрод и измеритель тока составляли вместе плавучий зонд, контролируемо перемещаемый по поверхности воды с берега.

При измерениях было опробовано два способа – измерение со стационарной фиксацией в нескольких десятках точек (при глубине воды 0,7 м) и измерение по профилям в движении (при глубине воды 1,5 м). Рассматриваются результаты по второму варианту, он позволил получить больше информации за счет непрерывного измерения в движении. Профили располагались на расстоянии 0,5 м друг от друга и были параллельны длинной стороне водоема. Каждый профиль проходил два раза в прямом и обратном направлении, итоговые значения плотности тока получались усреднением по прямому и обратному ходу.

Полученные значения выходного сигнала измерителя тока $U_{\text{изм. тока}}$ были пересчитаны в плотность тока в соответствии с его передаточной характеристикой [7]. Коэффициент преобразования плотности тока в ток внутри отверстия для данного измерителя тока составляет $K_{ji} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; коэффициент преобразования тока в напряжение на выходе измерителя тока составляет $K_{iu} = 5,94 \text{ В/А}$. Полученные значения плотности тока j были нормированы к измеренному значению тока генератора I_A и была определена величина j/I_A :

$$j/I_A = U_{\text{изм. тока}} / (K_{ji} \cdot K_{iu} \cdot I_A).$$

Результаты экспериментов и обсуждение

По полученным данным была построена карта распределения j/I_A по поверхности водоема, путем аппроксимации значений между профилями (рис. 2).

Рис. 2. Результаты измерений нормированной плотности тока (цветовая палитра), контур водной поверхности водоема (жирная штриховая синяя линия) и приблизительное положение нарушений дна (заштрихованные области). Координатная сетка (x и y) дана в метрах; цветовые значения нормированной плотности тока j/I_A даны в 10^{-3} 1/м^2

Из обработанных результатов измерений, представленных на рис. 2, можно увидеть, что величина j/I_A показывает значительную вариацию по исследованной поверхности – от $1,5$ до $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/м}^2$. Это говорит о существенном влиянии распределения тока вблизи дна, т.к. конфигурация

плавучего зонда и положение измерителя тока относительно «водного» излучающего электрода остаются неизменными.

Было проведено сопоставление j/I_A и видимых нарушений сплошности дна. Над некоторыми нарушениями вблизи границ дна явно наблюдается увеличение j/I_A по сравнению со средним уровнем (нарушение слева, справа вверху и справа внизу). Над нарушением ближе к центру дна заметной аномалии не наблюдается.

Отдельно обращает внимание факт, что есть увеличение сигнала вблизи верхнего левого угла дна водоема без наблюдаемых нарушений. Также есть значительное понижение j/I_A в верхней левой четверти.

В целом, полученную картину можно интерпретировать следующим образом. Вдоль всего дна в его правой верхней, левой нижней и правой нижней четвертях эквивалентное сопротивление ниже, чем в левой верхней четверти. При этом вдоль кромки дна вблизи видимых нарушений сопротивление еще ниже. Пониженное сопротивление весьма вероятно связано с повышенной фильтрацией воды.

В тоже время повышенная «утечка» тока наблюдается не только над видимыми нарушениями, что говорит о возможной незаметной утечке через зоны повышенной трещиноватости в бетонном покрытии. Это говорит о том, что метод применим для обнаружения, например, скрытых заваленных и затопленных подводных ходов, пустот и т.п.

Выводы

В настоящее время актуальна задача обнаружения и контроля мест ненормативной фильтрации воды. Эта задача имеет как инженерно-геологическое (для обследования гидротехнических сооружений), так и археологическое (поиск затопленных и заваленных проходов, оценка структуры сооружений) приложение. Для решения этой задачи геофизическими методами был предложен электрометрический токовый метод, отличающийся от традиционных электродных измерений. Разработана схема и аппаратура токового метода. Был проведен полевой эксперимент по обнаружению зон пониженного сопротивления над дном водоема, для которого известен факт утечки воды. В результате измерений было определено, что практически над всеми нарушениями наблюдаются зоны повышенного значения вертикальной составляющей плотности тока, ассоциируемые с пониженным эквивалентным сопротивлением вблизи дна. Кроме того, обнаружены другие подобные зоны не над видимыми нарушениями. Эксперимент показал, что в измеряемый сигнал показывает значительную вариацию, что увеличивает надежность выделения подобных зон. Токовый метод в представленном варианте позволяет обнаруживать подобные зоны, возможно, ассоциированные с повышенной фильтрацией воды из водоема в окружающие грунты через затопленные ходы и т.п.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук и докторов наук № МК-2223.2020.5, а также частично в рамках Государственного задания ИФЗ РАН.

Список литературы

1. Казначеев П.А. Разработка и исследование комплекса средств активного геоэлектрического мониторинга с использованием локальных измерителей тока: дис. ... канд. техн. наук. М.: ИФЗ РАН, 2014. 227 с.
2. Казначеев П.А., Ушаков Д.А., Камшилин А.Н. Электрометрическое обследование плотины с диафрагмой: сравнение электродных и токовых измерений по данным моделирования // Геофизические исследования. 2021. № 4. (в печати).
3. Кузнецов В.Д., Ольховский С.В., Завойкин А.А. Подводные археологические исследования в Фанагории // Природа. 2019. Т. 1241. № 1. С. 57–67. <https://doi.org/10.7868/S0032874X19010071>.
4. Макаров Д.В., Модин И.Н. Электрометрические исследования насыпной плотины в зоне вечной мерзлоты: первый этап мониторинга // Инженерные изыскания. 2013. № 10–11. С. 116–121.
5. СТО 70238424.27.140.003-2010 Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования.
6. Arthur H.G. Teton dam failure // Proceedings of the engineering foundation Conference. New York: ASCE, 1977. P. 61–71.
7. Kamshilin A.N., Kaznacheev P.A. Local current gauge: instrument for geoelectric measurements // Seismic Instruments. 2018. Vol. 54, No. 5. P. 573–578. <https://doi.org/10.3103/S0747923918050079>.
8. Loperte A., Soldovieri F., Lapenna V. Monte Cotugno dam monitoring by the electrical resistivity tomography // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2015. Vol. 8, No. 11. P. 5346–5351. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2476663>.
9. Olenchenko V.V., Osipova P.S. Electrical resistivity tomography of the frozen embankment dam // Proceedings of the 16th EAGE International scientific and practical Conference “Engineering and Mining Geophysics”. Perm, 2020. P. 1–7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051007>.

P.A. Kaznacheev, A.N. Kamshilin, D.A. Ushakov, V.V. Kokh, D.V. Krayushkin

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, p_a_k@mail.ru

SEARCH FOR HIDDEN VOIDS AND WEAKENED ZONES UNDER BOTTOM OF ARTIFICIAL RESERVOIR USING THE GEOELECTRIC CURRENT METHOD: THE FIRST RESULTS OF FIELD EXPERIMENT

Abstract. Geophysical methods developed for some applications are actively being used for other applications. For example, archaeological geophysics involves more and more new geophysical methods from engineering-geological applications. One of such applications is the detection of abnormal filtration flows that can disrupt functioning and integrity of hydraulic facilities. Damage to watertight elements is especially dangerous. Geoelectrical exploration methods are suitable for detecting and tracking such disturbances. Based on the previously proposed local current gauge, a geoelectric current method was developed for detecting zones of increased leakage of electric current associated with zones of increased filtration through an watertight element. A test field experiment was conducted in small artificial concreted reservoir with known water leak. According to data of current measurement, zones of possible filtration are determined. It is shown that the method can be useful in archaeological geophysics.

Key words: geoelectric; engineering-geological survey; archaeological geophysics; hydraulic facilities; filtration; watertight element; current measurement; local current gauge.

Беркович В.А., Балашов А.Ю., Фролов Н.В., Лихтер Ю.А.

ООО «Археологические изыскания в строительстве», г. Москва, arheolog-rus@yandex.ru

РАСКОПКИ НА ТЕРРИТОРИИ ИСТОРИЧЕСКОЙ ОГОРОДНОЙ СЛОБОДЫ В г. МОСКВЕ

Аннотация. Участок археологических исследований находился на водоразделе рек Москвы и Яузы. В ходе работ был выявлен и полностью исследован подклет начала XVIII в. Особый интерес составили находки из стекла. Редким для московских слоев был фрагмент стеклянного стакана с росписью. В результате работ была зафиксирована хозяйственная постройка обычного, рядового жителя г. Москвы начала XVIII в. со стандартным набором предметов материальной культуры.

Ключевые слова: посольство Швейцарской Конфедерации; подклет; стекло; Огородная слобода; индивидуальные находки.

Осенью 2014 г. специалистами ООО «Археологические изыскания в строительстве» были проведены опережающие застройку археологические раскопки, связанные с реконструкцией посольства Швейцарской Конфедерации в России. Работы велись под постоянным методическим руководством А.Г. Векслера.

Работам предшествовал длительный этап разработки и согласования проектной документации в органах охраны памятников. Для работ была выбрана территория, не затронутая современной застройкой, зелеными насаждениями и предположительно свободная от действующих и неиспользуемых коммуникаций (согласно имеющимся в авторском распоряжении геоподосновам). Таким образом, была выбрана небольшая площадка, на которой предположительно может быть найден археологический материал (рис. 1). Площадь раскопа составила 60 м².

Историческая изучаемая местность расположена на водоразделе рек Москвы и Яузы. По этой территории протекали две малые реки: Черногрязка и Рачка. Первая из них являлась правым притоком р. Яузы. Ее русло было засыпано в начале XX в. Вторая – левый приток р. Москвы, в своей запруженной части образовывала Поганные пруды (Чистые пруды – в дальнейшем). Участок исследования современный, находится в пределах квартала, ограниченного: Большим и Малым Харитоньевскими переулками, Гусятниковым переулком и переулком Огородная Слобода

В раннемосковский период здесь проходили две дублирующие трассы Хомутовской дороги. Одна, вероятно, более ранняя, шла по линии современного Большого Харитоньевского переуллка и Хомутовского тупика, вторая – по линии улиц Покровки и Старой Басманной. С севера территорию ограничивал участок Юрьевской дороги (современная ул. Мясницкая), проходившей через Красное село в с. Стромынь и далее – в Юрьев-Польской.

Рис. 1. Локализация участка исследований на современном и историческом планах
г. Москвы

Ближайшее к исследуемой местности древнее поселение располагалось к северо-западу на левом берегу р. Неглинной. Это одно из ранних московских городищ. Упоминание о нем встречается в грамоте 1682 г. патриарха Иоакима о разрешении построить каменную церковь взамен деревянной «на Драчах, иже на старом городище» [3].

В XVI в. в исследуемой части Земляного города возникло несколько слобод, одной из которых являлась дворцовая Огородная Слобода. Время возникновения ее точно не установлено. Известно, что еще до начала правления династии Романовых здесь была построена церковь Святого Харитона Исповедника. В документах Патриаршего приказа храм впервые упоминается в 1618 г. [4].

В ходе реставрационных работ 1880–1881 гг. была найдена плита с храмовой надписью, по которой установили дату закладки каменного здания церкви: «Лета 7160 (1652) июля в 8 день начата строиться сия церковь во имя пресвятой Богородицы Владимирской при державе государя царя и великого князя Алексея Михайловича всея Руси самодержца меж патриаршества, а совершена сия церковь во имя преподобного отца нашего Харитония исповедника во 170 году июля в 30 день при священнике Артемии и дьяконе Иякове мирскою казной» [5].

В слободе был еще один храм – церковь Трех Святителей в Старых Огородниках. Документально церковь известна с 1635 г. [2]. В 1680 г. она была перестроена в камне, и просуществовала до 1928 г. [2].

Большая территория слободы первоначально была заселена не плотно. В первой половине XVII в. здесь нашлось место для иноземной слободы, в которой был *«некрещеных немец приходской двор»* [6].

В 1737 г. территория бывшей Огородной слободы сильно пострадала от пожара. В переписи 1744 г. в изучаемой местности упоминается множество пустырей. Земли небольших владений объединялись в обширные усадьбы знати, богатых купцов и фабрикантов. Сильный пожар в этой части города отмечен в 1812 г. После того, как в этом пожаре сгорело большинство деревянных построек изучаемой территории, она начинает приобретать современный облик.

История развития планировки исследуемого участка прослеживается с XVIII в. До 1817 г. здесь на пересечении двух переулков (современные Гусятников и Огородная Слобода) существовала обширная усадьба, принадлежавшая полковнику П.В. Чичерину (пер. пол. XVIII в.), секретарь-майору И.М. Голохвастову (1755–1767), статскому советнику А.С. Волкову (1767–1783), статской советнице Н.Г. Волковой (1783–1803), К.П. Лопухиной (1803–1817) [1]. В плане владение имело Г-образную форму с застройкой по границам и большим садом во внутриквартальной зоне. Основная часть усадебных сооружений представляла собой деревянные хозяйственные постройки. В 1784 г. в северном углу усадьбы был построен двухэтажный кирпичный корпус, в перестроенном виде дошедший до нашего времени. На планах первой половины XVIII в. застройка показана схематично, что не позволяет отождествить застройку с выявленными в раскопе ее элементами.

В пожар 1812 г. все деревянные строения сгорели, а в 1817 г. усадьба была разделена на два неравных владения: северо-западное и юго-восточное. Небольшим северо-западным участком владели: генерал-майор А.А. Башилов (1871–1851), Д.П. Швенцера (1851–1880), купец Козлов (1880–1892), Д.А. Фон-Беренс (1892–1901), Фон-Шлиппе (с 1901) [1]. Юго-восточное владение принадлежало: княгине М.И. Черкасской (1817–1840), Э.А. Фон-Беренсу и В.Ф. Карнацу (с 1880) [1]. Здесь в 1880-е гг. построены два однотипных жилых дома. Постройки были одноэтажные деревянные на каменных подвалах.

В 1960-е гг. после проведения работ по приспособлению участка здесь было размещено посольство Швейцарии.

Вскрытие горизонта балласта, а также работа с нижележащими слоями (серые супеси различных оттенков, насыщенные битым кирпичом XIX в., известковой крошкой, древесным углем) показали, что культурный слой сохранился фрагментарно: он был сnivelирован в результате строительных работ второй половины XX в. Общая мощность балласта составляла 1,6–2,0 м; мощность нижележащего культурного слоя, датируемого второй половиной XIX в., в тех местах, где этот слой сохранился, не превышала 25 см. Помимо этого, ниже уровня верхней границы материка была прослежена фундаментная забутовка зданий и деревянный колодец (зафиксирован в раскопе частично).

Однако, несмотря на многочисленные нарушения целостности напластований и материка, раскопом удалось целиком исследовать подклет более раннего по отношению к фиксируемым пластам сооружения (сооружение «2» в полевой документации) (рис. 2).

Сооружение 2. Каркасно-столбовая конструкция, заглублённая в материк.

Сооружение 2. Остатки деревянных конструкций в заполнении сооружения

Рис. 2. Сооружение «2» (подклет хозяйственного сарая начала XVIII в.)

Сооружение представляло собой заглубленный в материк на сохранившийся уровень 5–7 венцов деревянный сруб, квадратный в плане. Сооружение имело размеры около 4,5×4,5 м. Ориентировано сооружение вдоль красной линии современного переулка Огородная слобода. Внутреннее заполнение представлено темно-серой супесью с фрагментами древесного угля, известью, костями животных. В нижней части сооружения, в заполнении отмечается наличие навоза. При расчистке сооружения было обнаружено, что этот уровень маркирует упавшее по центру бревно, являющееся первоначально, скорее всего, коньком для двухскатной крыши сооружения. Других бревен в заполнении не отмечено, при общей достаточной сохранности дерева. Помимо этого, фиксировались две массивные лаги пола (доски, положенные на перпендикулярные им бруски). Сам настил пола не сохранился.

Уровень заглубленности сооружения, по-видимому, обусловлен уровнем грунтовых вод, зафиксированных на 10–15 см ниже уровня пола. К сожалению, у нас нет данных о сезонном колебании уровня грунтовых вод, однако на данном участке исследований не в сезон половодья оно не представляется значительным.

Авторам представляется вероятным интерпретация сооружения «2» как

подклета хозяйственного сарая. Упавшее бревно конька крыши маркирует уровень разрушения сооружения. И хотя заманчиво четко датировать это событие пожаром 1737 г., достаточных данных для этого нет. Верхняя часть внутреннего заполнения сооружения «1» (до уровня, маркированного упавшим бревном) формировалась, судя по находкам, в течении второй половины XVIII в., однако тут встречены и более поздние артефакты. Нижняя же часть заполнения коррелируется с достаточно однородным вещественным набором бытовых предметов, датируемых началом XVIII в. (рис. 3–7).

Рис. 3. Находки из стекла

Рис. 4. Стекланный стакан с росписью

Рис. 5. Керамический материал

Рис. 6. Керамический материал

Рис. 7. Находки из заполнения сооружения (керамика, железо, изделия медного сплава)

К первой категории находок, иллюстрирующих быт жителей Огородной Слободы начала XVIII в., можно отнести стеклянные изделия (см. рис. 3). Все они достаточно характерны, за исключением более редкого в московских слоях стеклянного стакана с росписью, о котором будет сказано ниже. В находках отмечены фрагменты следующих категорий изделий: 1) бокал, 2–3) стопы (открытые сосуды на поддоне), 4) бокал-ремер (эти бокалы с полусферическим туловом, полый конической ножкой, внизу которой располагалось дно сосуда, и винтообразной подножкой употреблялись исключительно для рейнских вин. Они были широко распространены в Западной Европе с XVI по XIX вв. На ножки, как правило, накладывали выпуклые лепешки в виде ягоды малины или ежевики, расположенные в шахматном порядке) 5) кувшин, 6–7) бутылки, 8) флакон (целый), 9) фрагменты штофов, в т.ч. с клеймом, имитирующим написание «DANZIG».

Следует отметить, что находок из стекла в сооружении зафиксировано в процентном соотношении немного.

Среди редких находок, фиксируемых в заполнении подклета, следует указать стеклянный сосуд с росписью (см. рис. 4).

Высокий открытый сосуд с коническим, расширяющимся кверху туловом и вогнутым дном. Край выпуклый. Размеры: высота – 9,5; диаметр сверху – 9; диаметр внизу – 5,58. Цвет стекла – серо-голубой сильный, стекло прозрачное. По центру сосуда проходит полоса декора, состоящая из повторяющихся (по-видимому три раза) сюжетных композиций – собака, стоящая на длинных задних лапах, возле неопределенного растения с наклоненными длинными стеблями с листьями.

Техника изготовления сосуда – выдувание, декор нанесен эмалевыми красками, наложенными толстым слоем. Эмаль росписи сохранилась плохо,

поэтому невозможно установить ее изначальный цвет. В настоящее время эмаль имеет бледнокоричневый цвет, но нельзя сказать, исходный ли это цвет или следствие загрязнения.

Сюжет «собака возле дерева» встречается на европейских стеклянных сосудах разного времени, с конца XVI по XIX вв.

По-видимому, этот сюжет восходит к эмблеме «Пес, грызущий древо» которая была опубликована в сборнике «Эмблемы и символы», неоднократно переиздававшейся в XVII–XVIII вв.

Среди керамических форм, следует отметить наличие керамики белоглиняной, ангобированной (белый ангоб по красной глине), чернолощеной (см. рис. 5, 6), а также отдельные целые изделия, характеризующие эпоху: фрагмент поливной чернильницы (см. рис. 7, 1) и фрагмент чернолощеного колокольчика (см. рис. 7, 2).

В наборе находок, обнаруженных в сооружении, также следует отметить предметы повседневного обихода: наперсток медного сплава мануфактурного производства (см. рис. 7, 4), пуговицы-гирьки (см. рис. 7, 5), ювелирное изделие – подвеску белого металла со стеклянной вставкой (см. рис. 7, 6), товарную западноевропейскую plombу (см. рис. 7, 7), обувные набивные металлические подковки (см. рис. 7, 8), предметы личного благочестия – три нательных креста (см. рис. 7, 10).

Среди находок, внимание привлекает не наличие, а, наоборот, отсутствие некоторых категорий. Так, в нумизматическом отношении, сооружение стерильно, за исключением находки одной монеты, да и то намеренно порченной (см. рис. 7, 3). Также не отмечено нахождения фрагментов курительных трубок – частого сопутствующего материала во владениях знатных, или хотя бы зажиточных людей Петровской эпохи.

В результате работ была зафиксирована хозяйственная постройка обычного, рядового жителя г. Москвы начала XVIII в. с обычным, *стандартным* набором предметов материальной культуры. Наряду с единичными, уникальными находками в культурном слое г. Москвы часты комплексы, которые можно расценивать как *фоновые*. И даже если с точки зрения презентабельности и музейного экспонирования они где-то проигрывают, то для построения полноценного генезиса развития г. Москвы от ее основания и до сегодняшнего момента, исследование и публикация таких комплексов просто необходима.

Экспозиция полученных результатов работ вызвала живейший интерес посетителей археологического музея «Гостиный двор», в т.ч. экскурсий из посольства Швейцарской Конфедерации в РФ и организации-застройщика (рис. 8).

Рис. 8. Прием делегации посольства Швейцарской Конфедерации. 2014 г.
Фото Ю.Е. Петрова

Список литературы

1. Историко-градостроительные исследования территории по адресу: переулок Огородная Слобода, 2/5 (ЦАО, район Басманный, квартал 286). М., 2006. Мосгорнаследие. Отдел документальных фондов. Шифр 863/10. С. 49.
2. История московских районов: энциклопедия / Под ред. К.А. Аверьянова. М.: Астрель, 2008. 830 с.
3. Криштафович Н.О. Археологические исследования при геологической съемке Московского уезда // Археологические известия и заметки. М., 1893. С. 418.
4. Метрика церкви Харитона в Огородниках. ЦИАМ. Ф. 454. Оп. 3. Д. 63. Л. 85.
5. Остроумов В. Харитоновская в Огородниках церковь. М.: Тип. Снегирева, 1883. 28 с.
6. Памятники архитектуры Москвы. Земляной город. М.: Искусство, 1989. 351 с.

V.A. Berkovich, A.Yu. Balashov, N.V. Frolov, Yu.A. Likhter

Archaeological Surveys in Construction LLC, Moscow, arheolog-rus@yandex.ru

EXCAVATIONS IN THE TERRITORY OF HISTORICAL OGORODNAYA SLOBODA IN MOSCOW

Abstract. The site of archaeological research was located at the watershed of the Moscow and Yauza rivers. Uncovered during the research the early XVIII century basement was identified and fully examined. Glass finds were of particular interest. A fragment of a glass with a painting was rare for the Moscow layers. As a result of the work, an outbuilding of a common Moscow resident at the beginning of the XVIII century with a standard set of material culture objects was recorded.

Key words: Embassy of Switzerland; basement; glass; Ogorodnaya Sloboda; individual finds.

Беркович В.А., Балашов А.Ю., Егоров К.А., Фролов Н.Ф.

ООО «Археологические изыскания в строительстве», г. Москва, arheolog-rus@yandex.ru

РАСКОПКИ ТВЕРСКОЙ-ЯМСКОЙ СЛОБОДЫ НА ТРИУМФАЛЬНОЙ ПЛОЩАДИ

Аннотация. Участок археологических исследований находился на Триумфальной площади г. Москвы. Вскрытые в ходе исследований напластования четко делились на три стратиграфических горизонта. Верхний относился ко времени реконструкции площади в 1960 гг., средний объединил напластования, отложившиеся в ходе строительных работ XIX – начала XX вв. Нижний горизонт относится к Тверской-Ямской слободе. Наибольший интерес составил именно. Анализ остатков слободской застройки позволил выявить следы ремонтов и пожаров. Кроме того, прослежены границы нескольких огородных участков. Каждый этап истории участка нашел свое отражение в характерном наборе археологических находок.

Ключевые слова: фундаменты; индивидуальные находки; строительные горизонты; Ямская слобода.

В 2010–2011 гг. силами ООО «Археологические изыскания в строительстве» под научным руководством А.Г. Векслера на Триумфальной площади были проведены опережающие строительство охранные археологические раскопки (рис. 1, 2).

Рис. 1. Археологические раскопки в юго-западной части Триумфальной площади. 2010 г.
Фото Ю.Е. Петрова

Рис. 2. Археологический раскоп в северо-восточной части Триумфальной площади.
2011 г. Фото Ю.Е. Петрова

Подобного рода масштабные работы здесь были организованы впервые. При их планировании учитывалось, что часть Триумфальной площади представляла собой сильно загруженную транспортную развязку, а культурные напластования и заглубленные в них сооружения на значительном пространстве были полностью уничтожены в ходе строительства тоннеля.

Основной исторической магистралью участка является Тверская дорога. С нею связано возникновение в этом районе Ямской слободы.

Впервые Тверская-Ямская слобода упоминается в 1566 г.: *«И царь и великий князь велел им с послы быти к Москве мая 30 день часу на пятом или на шестом дни, а ехати им с послы велел с болише дороги с Поклонные горы налево к мельнице на брод, а переехав реку, по запосаду к Тферской улице к Ямской слободе»* [8].

Следующее упоминание сохранилось в описании путешествия папского легата Антонио Поссевино в г. Москву: *«А того же года (1581) папин посол Антоний к Москве приехал. А стоял в Китай-городе, на Иванове дворе Серкова. А встречали его по наказу, за посадом, по Тверской дороге, за Ямскою слободою»* [7].

С XVI в. в слободе существовала церковь Василия Кесарийского. В правление царя Бориса Годунова (в 1591 г.) Тверская-Ямская слобода была выведена с территории Белого города за Земляной город. Туда же была перенесена и церковь Василия Кесарийского, которая ранее находилась напротив Воскресенского монастыря на Тверской улице [1]. Вероятно,

перемещение Ямской слободы дальше от центра города было связано с появлением в г. Москве новой линии укреплений – Скородома (трасса современного Садового кольца).

Вот как описал Тверскую-Ямскую слободу историк и археолог Ю.В. Готье: «Выехав из ворот Земляного города (трасса современного Садового кольца) по Тверской, путешественник, покидавший Москву, попадал в Тверскую Ямскую слободу, состоявшую при царе Михаиле из 60 дворов «ямских охотников», т.е. ямщиков, содержавших сообщение между Москвой и Тверью для надобностей Московского правительства... Все ямские дворы занимали совершенно одинаковое пространство по 15 саж. в длину и ширину да «в огороде и в огуменнике» 25 саж. по длиннику и 15 саж. в поперечнике. Ямская слобода была настоящей деревней. Ямские дворы были окружены пашней...» [4].

По описи 1628 г. в Тверской-Ямской слободе было «60 дворов ямских охотников, людей в них 230 человек», к 1686 г. число дворов достигло 107 [5].

Поздняя история слободы разделена на периоды двумя крупными пожарами, практически полностью ее уничтожавшими.

Первый пожар произошел в 1671 г. После него, по решению Земского приказа, слобода была перепланирована: «улицы распространены против прежнего вдвое и меж 10 дворов учинены проезжие большие места по переулку, чтоб впредь им от пожарного времени разорения не было; ...мерую ямские дворы и с огороды в длину по 15 сажен, поперег по 7 сажен; да два переулка в длину по 15 сажен, поперег по 14 сажен» [5]. В 1684–1688 гг. было построено новое каменное здание церкви Василия Кесарийского, приход которой к 1722 г. насчитывал 173 двора [6].

Второй крупный пожар произошел в июле 1773 г. Слобода выгорела до такой степени, что на плане «сочиненном при Московской полиции погоревшим сего 1773 года июля 14 дня в Москве за Земляным городом... святым церквам, обывательским дворам и прочему» отсутствуют все, кроме Большой Тверской-Ямской, улицы и переулки слободы. Вместо них даны проектируемые трассы (рис. 3) [9].

В докладе Комиссии для строения Петербурга и Москвы (8 октября 1773 г.) отмечалось, что «в Тверской ямской слободе ямщики утратили все свое имущество» [9]. Среди предлагаемых Комиссией мер, кроме всего прочего, была постройка 116 каменных домов, для чего казна должна была выделить в течение 6 лет 41760 руб. [9]. Однако, вплоть до 1830 г. Тверская-Ямская слобода оставалась преимущественно деревянной.

С конца XIX в. в районе бывшей слободы у Триумфальной площади стали появляться различного рода развлекательные заведения. На месте современного здания Концертного зала им. П.И. Чайковского находился театр «Буфф», переданный после революции труппе Вс. Мейерхольда. В соседнем здании располагался цирк братьев Никитиных, позже – мюзик-холл и Театр Оперетты (современный Театр Сатиры). В глубине сада «Аквариум» было

здание зимнего театра, которое арендовал для различных представлений Ш. Омон. Позднее здесь размещался Театр Оперетты, сейчас на этом месте здание Театра им. Моссовета. В доме купца А. Гладышева в 1910-е гг. находилось варьете «Альказар», а позже театры «Эстрады», «Сатиры», «Современник». С северо-запада площадь замыкало здание одного из первых московских кинотеатров.

Рис. 3. План 1773 г. Фрагмент из [9]

В 1930-е гг. в ходе строительства Горьковского радиуса Московского метрополитена, на отрезке трассы от площади Маяковского (современная Триумфальная площадь) до площади Белорусского вокзала были затронуты

слои, отложившиеся в слободской период. При этом обнаружены скопления навоза, фрагменты выделанной кожи, войлока, остатки конской сбруи [3].

Археологические раскопки 2010–2011 гг. дали новый обширный материал. Вскрытые в ходе исследований напластования четко делились на три стратиграфических горизонта.

Верхний горизонт связан с реконструкцией площади, проводившейся в 1960-1970 гг. Он представлен слоями дорожного покрытия, подстилающими их прослойками щебня и мощным слоем песчаной засыпки, толщина которого на отдельных участках достигала 2 м.

Средний горизонт объединил напластования, отложившиеся в ходе строительных работ XIX – начала XX вв. С этим горизонтом связаны остатки подвальных и полуподвальных помещений кирпичных построек. Так, в пределах трех раскопов исследована подземная часть дома купца Алексея Гладышева (вторая половина XIX в.).

Нижний горизонт представлен слоями, связанными с Тверской-Ямской слободой. Вместе с частоколами, хозяйственными и производственными ямами нами были исследованы подклеты жилых срубов, относящихся как минимум к двум строительным периодам (рис. 4–6).

Рис. 4. Остатки разновременной застройки (1 – дом купца А. Гладышева, 2 – колодец, 3 – слободские жилые срубы). Фото Ю.Е. Петрова

Рис. 5. Заглубленные в материк объекты (1 – фундамент XIX в., 2 – выгребная яма XIX в., 3 – строительные и хозяйственные ямы XVII–XVIII вв.). Фото Ю.Е. Петрова

Рис. 6. Остатки сгоревшей постройки XVIII в. Фото Ю.Е. Петрова

Анализ остатков слободской застройки позволил выявить следы ремонтов и пожаров. Кроме того, прослежены границы нескольких огородных участков.

Каждый этап истории участка нашел свое отражение в характерном наборе археологических находок.

Ко времени существования здесь театра «Современник» относятся нереализованные билеты, гардеробный номерок, штамп Росконцерта и крышка декорационного ящика (рис. 7).

Рис. 7. Находки, связанные с театром «Современник». Фото Ю.Е. Петрова

С деятельностью варьете «Альказар» связаны монеты начала XX в., деталь духового музыкального инструмента, многочисленная стеклянная и керамическая тара из-под вина, пива, коньяка, косметические и парфюмерные флаконы из европейских стран, бронзовая фурнитура (рис. 8).

Рис. 8. Находки из среднего стратиграфического горизонта, XIX–начало XX вв.
Фото Ю.Е. Петрова

Наиболее многочисленная часть коллекции относится ко времени существования здесь Тверской-Ямской слободы:

- бытовые предметы (подсвечники, светильники, лампадки, керамические игрушки, деревянные коромысло и коклюшки, костяные гребни, железные ключи, замки, ножи, детали сундуков, керамическая, берестяная и деревянная посуда, курительные трубки и пр.);

- предметы одежды (различные части кожаной обуви, пуговицы, пряжки, клепки, застежки, фрагменты кожаного ремня);

- инструменты и орудия труда (сапожная игла, шило, оселки, коса, топор, сечка);

- детали конской упряжи, подковы, удила;

- отходы косторезного и металлургического производств (спилы костей животных, железный шлак, крицы);

- строительные материалы (печные изразцы, плитки пола, кирпичи с клеймами, оконная слюда, фрагмент деревянного наличника, конек избы, железные подставки и пробой и пр.);

- предметы вооружения (наконечник стрелы, пули, фрагмент ядра);

- ювелирные и культовые изделия (фрагмент серьги, нательный крест, язык небольшого колокола);

- нумизматические находки XVII–XVIII вв., включая копейки периодов правления царей Михаила Федоровича и Алексея Михайловича, а также

двухкопеечник 1757–1762 гг., перечеканный из пятикопеечника 1727 г.¹
(рис. 9, 10).

Рис. 9. Находки из нижнего стратиграфического горизонта, XVII–XVIII вв.
Фото Ю.Е. Петрова

Рис. 10. Печные изразцы, конец XVII–XIX вв. Фото Ю.Е. Петрова

¹ Определение С.П. Петухова.

В ряду не типичных для городских слоев находок следует отметить стальной наконечник эспонтон – парадного оружия, принятого на вооружении в Русской армии с 1730 по 1807 гг. [2]. Найденный на Триумфальной площади экземпляр украшен гравированным изображением двуглавого орла с вензелем императора Александра I и, таким образом, датируется 1801–1807 гг. (рис. 11).

Рис. 11. Наконечник эспонтон, начало XIX в. Рисунок С.М. Царевой

В заключении необходимо отметить, что за последнее время концепция развития Триумфальной площади неоднократно менялась, и, какое бы решение в результате не было принято, необходимо, что бы оно учитывало большую археологическую ценность подземного пространства площади, подтвержденную раскопками 2010–2011 гг.

Список литературы

1. Акты Исторические, собранные и изданные Археографической комиссиею. СПб., 1841. Т. II. С. 283.
2. Беловинский Л.В. Российский историко-бытовой словарь. М.: Студия «ТРИТЭ», 1999. 526 с.
3. Горюнова Е.И. Итоги работ археологического надзора на строительстве П-ой очереди Московского метрополитена // МИА. 1947. № 7. С. 52–53.
4. Готье Ю.В. Окрестности допетровской Москвы // Москва в ее прошлом и настоящем. М.: Образование, 1909. Т. III. С. 29.
5. Забелин И.Е. Материалы для истории, археологии и статистики города Москвы. М.: Московская городская дума, 1884. Т. 1. Столбцы 714, 715.
6. Забелин И.Е. Материалы для истории, археологии и статистики города Москвы. М.: Московская городская дума, 1891. Т. 2. Столбцы 588, 589.
7. Известие историческое об Антонии Поссевино, после от римского папы Григория XIII, присланном к царю Ивану Васильевичу в 7088 году, в бытность его в России сочиненное // Древняя Российская Вифлиофика. М., 1788. Ч. 2. С. 71.
8. Памятники дипломатических сношений древней России с державами иностранными. Т. III // Сборник Императорского Русского Исторического Общества. СПб., 1892. Т. 71. С. 340.
9. Сытин П.В. История планировки и застройки Москвы. М., 1954. Т. 2. С. 61, 62.

V.A. Berkovich, A.Yu. Balashov, K.A. Egorov, N.V. Frolov

Archaeological Surveys in Construction LLC, Moscow, arheolog-rus@yandex.ru

EXCAVATION OF TVERSKAYA-YAMSKAYA SLOBODA AT TRIUMPHAL SQUARE

Abstract. The site of archaeological research was located on Triumfalnaya Square in Moscow. Layers uncovered during the studies were clearly divided into three stratigraphic horizons. The upper horizon dates back to the time of the reconstruction of the square in the 1960s, the middle horizon united the layers deposited during the construction work of the XIX – early XX centuries. The lower horizon belongs to the Tverskaya-Yamskaya Sloboda. The most interesting was the third horizon, related to the sloboda buildings. Analysis of the remnants of the sloboda buildings made it possible to reveal traces of repairs and fires. In addition, the boundaries of several gardens were traced. Each stage in the site's history is reflected in a characteristic set of archaeological finds.

Key words: foundations; individual finds; construction horizons; Yamskaya Sloboda.

Беркович В.А., Балашов А.Ю., Егоров К.А., Пономаренко А.К.

ООО «Археологические изыскания в строительстве», г. Москва, arheolog-rus@yandex.ru

АРХЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХРАМА СПАСА ПРЕОБРАЖЕНИЯ НА ПРЕОБРАЖЕНСКОЙ ПЛОЩАДИ В г. МОСКВЕ

Аннотация. В сквере на Преображенской площади г. Москвы были проведены предпроектные архитектурно-археологические исследования. Археологическими раскопками была полностью раскрыта подземная часть храма Спаса Преображения, определена степень сохранности фундаментов, уточнена планировка утраченного здания, изучены культурные напластования. В ходе раскопок выяснилось, что взрыв 1964 г. и последующие механизированные работы по сносу развалин и нивелировке поверхности превратили остатки храма в сплошной завал строительного мусора. В кладках апсиды и четверика были обнаружены два фрагмента белокаменных надгробий XVIII в. Были выявлены четыре строительных периода церкви. Полученные материалы послужили основой для разработки проекта реставрации фундаментов и воссоздания храма.

Ключевые слова: фундаменты; погреб; могильные плиты; церковь; строительный период.

Церковь Спаса Преображения, стоявшая до середины 1964 г. на Преображенской площади, является одним из московских храмов, снесенных по распоряжению Н.С. Хрущева.

Известно, что при Петре I в центре Преображенской солдатской слободы была поставлена полковая изба, в которой хранилась полотняная церковь с походным алтарем Преображения Господня. В 1747 г. сержант лейб-гвардии И. Третьяков купил в соседнем селе Семеновском деревянную церковь, которая была перенесена в Преображенское [4]. Освящение придела в честь апостолов Петра и Павла состоялось 19 июля 1747 г. Главный престол в честь Преображения Господня был освящен в 1750 г. Здание церкви оказалось ветхим и простояло не более 20 лет.

В 1763 г. стараниями священников П. Фадеева и Л. Васильева начался сбор средств на строительство каменной церкви. К 1768 г. были возведены трапезная и Петропавловский придел [7]. Новый храм находился в 4 саженьях к югу от старого, вскоре разобранного (рис. 1).

В 1781 г. построена четырехстолпная трехъярусная колокольня [7]. При этом здание церкви было существенно перестроено и вновь освящено.

В пожаре 1812 г. церковь не пострадала. Службы во время пребывания французской армии в г. Москве не прекращались. Вместе с тем в начале XIX в. храм пришел в запустение, и лишь в 1830 г. на средства церковного старосты купца М.Ф. Котова здание было отремонтировано и украшено (рис. 2).

В 1884–1886 гг. был построен придел Александра Невского. Трапезная и придел Петра и Павла подверглись перedelке [6].

23 мая 1883 г. у стен храма освящались новые знамена Преображенского и Семеновского полков. При этом старые знамена 1701–1711 гг. были переданы в церковь для хранения.

Рис. 1. Проект строительства каменного здания храма Спаса Преображения в Преображенском. Чертеж 1765 г.

Илл. 2. Храм Спаса Преображения на Преображенской площади. Фото из [2]

После революции 1917 г. службы в храме продолжались. Во время массового закрытия церквей здесь сохранялись иконы и утварь из других храмов. В 1920 г. церковь стала кафедральным храмом московских митрополитов. В 1940–1960-е гг. в храме находилась кафедра выдающегося богослова Русской Православной Церкви, митрополита Крутицкого и Коломенского Николая Ярушевского.

В ночь с 17 на 18 июля (в некоторых публикациях с 10 на 11 июля [4]) 1964 г., несмотря на многочисленные обращения прихожан в партийные и советские органы, храм под предлогом строительства метро был взорван.

В 2010 г. сотрудниками ООО «Археологические изыскания в строительстве»¹ в сквере на Преображенской площади были проведены предпроектные архитектурно-археологические исследования (рис. 3). Научно-методическое руководство работами осуществлял А.Г. Векслер (рис. 4).

Рис. 3. Фрагмент современного плана г. Москвы с указанием места раскопа

Рис. 4. Совещание на археологическом раскопе. Слева направо: Л.В. Кондрашев, А.Г. Векслер, К.А. Егоров, В.А. Беркович. Фото 2010 г.

¹ В работах принимали участие: К.Н. Антонов, В.А. Беркович, К.А. Егоров, В.С. Исаев, Ю.Е. Кашина, Р.А. Мешканцев, Е.М. Муха, Ю.Е. Петров, А.К. Пономаренко, К.Г. Прянишников, Ш.В. Хецуриани, С.М. Царева.

Археологическими раскопками, общая площадь которых превышала 1000 м², была полностью раскрыта подземная часть храма, определена степень сохранности фундаментов, уточнена планировка утраченного здания, изучены культурные напластования (рис. 5, 6).

Рис. 5. Обмерный план выявленных фундаментов. Чертеж

Рис. 6. Археологический раскоп. Вид с востока. Фото Ю.Е. Петрова

В ходе раскопок выяснилось, что взрыв 1964 г. и последующие механизированные работы по сносу развалин и нивелировке поверхности превратили остатки храма в сплошной завал строительного мусора. В западной части раскопа была выявлена гигантская (глубиной до 4 м) воронка, занимавшая значительную часть внутреннего пространства храма. Она была заполнена битым кирпичом, обломками перекрытий, искореженным железом и пр.

Предварительные исследования письменных источников, планов, схем, фото- и киноматериалов по истории храма позволили определить хронологию основных строительных периодов, подтвержденную результатами натурных археологических и архитектурных обследований. Были выделены четыре основных строительных периода, определивших общий план, внутреннюю структуру и внешний облик здания церкви (рис. 7).

1-й строительный период, 1765–1768 гг. В эти годы были построены древнейшие объемы храма: трапезная 1 и придел Петра и Павла.

Трапезная 1 существенно пострадала при взрыве. Сохранились фрагменты фундамента южной стены и небольшие (протяженностью до 3 м) участки западной стены. Фундаменты восточной и северной стен, а также центрального столба трапезной были полностью выбраны в ходе последующих строительных периодов. Кладка сложена горизонтальными рядами крупного (40–60×35–40×30–50 см) бутового камня-песчаника с минимальным использованием известкового раствора. Швы между крупными камнями расклинены мелкими кусками песчаника, пустоты частично заполнены кирпичным щебнем. Цоколь выложен прямоугольными тесаными белокаменными блоками, уложенными поочередно длинной и узкой стороной. Размеры камней: 60–70×37–40×20–25 см.

Рис. 7. Периоды строительства здания храма Спаса Преображения в Преображенском.
Схема

Придел Петра и Павла находился к востоку от трапезной 1. В ходе работ были выявлены фундаменты южной, восточной и северной стен. Строительные материалы и техника кладки аналогичны использованной при сооружении фундаментов трапезной 1. Следов основания престола в алтарной части придела Петра и Павла не обнаружено. Часть южной стены придела была разобрана в XIX в. при сооружении системы отопления.

На первый взгляд необычный порядок строительства здания церкви Спаса Преображения 1768 г. имеет аналогии в истории создания ряда храмов XVIII–XIX вв. Так, начиная с трапезных, были сооружены: церковь Иоанна Воина на Якиманке [3]; Покровская церковь с. Ситово [5]; Покровская (Димитриевская) церковь с. Остропята [5].

2-й строительный период, 1781 год. К этому времени относится строительство четверика, алтаря и колокольни.

Четверик был пристроен к трапезной 1 с восточной стороны. Работами выявлены фундаменты восточной, северной и южной стен. Южная стена четверика явилась продолжением северной стены придела Петра и Павла. Фундаменты представляли собой многослойные белокаменные забутовки, отличавшиеся от забутовок первого строительного периода большей плотностью и лучшим качеством исполнения. В забутовках четверика горизонтальные ряды из некрупных (18–25×15–20×8–14 см) необработанных кусков белого камня с редкими фрагментами песчаника разделены чередующимися прослойками известкового раствора и битого кирпича. В фундаментах южной и северной стен насчитывалось 7–8 рядов белого камня, в восточной – 8–9 рядов. Средняя ширина фундаментов составляла 180–200 см.

Алтарь располагался восточнее четверика (рис. 8). Исследованы фундаменты апсиды, северной и южной стен. Сохранились два нижних ряда кладки. Верхний ряд (вероятно, цокольный) имел регулярный характер: края выложены прямоугольными белокаменными блоками, ориентированными поочередно длинной и узкой стороной. Блоки хорошо отесаны. Размеры камней: 46–48×20–22×15–17 см. Известняк довольно плотный, светло-серых тонов. Швы кладки тонкие: 1,0–1,5 см. Раствор известковый, хорошего качества, серо-бежевого цвета. Средняя ширина фундамента на уровне верхнего ряда кладки достигала 155 см. Основание фундамента представляло собой многослойную забутовку из обломков белого камня, кирпича с проливкой известковым раствором.

В кладке апсиды было использовано белокаменное надгробие, датированное второй третью XVIII в. (рис. 9). Длина камня 215 см, ширина в изголовье 70 см, в изножии – 62 см, толщина более 32 см. На небольшом доступном для расчистки участке боковой грани камня выявлен фрагмент резного растительно-геометрического орнамента: ромб с аканфом в центре и трехлепестковыми розетками по углам грани. На орнаменте заметны следы росписи красками синего и красного цветов. На торце изголовья в рамке из полки и четвертного валика частично сохранились три нижние строки надписи:

[...] жітиз ево была 29 ле
ть 4 мца 25 дней тесоименітьство
ево бывасть сеньтзбрз 6 числа.

Рис. 8. Алтарная часть храма. Вид с юга. Фото К.А. Егорова

Рис. 9. Белокаменное надгробие с надписью, вторая треть XVIII в. (ПГП-1).
Фото К.А. Егорова

Часть еще одного надгробия была обнаружена в фундаменте южной стены четверика (рис. 10). На достаточно небольшом (24×27×22 см) фрагменте сохранились профилированная рамка со следами росписи и части четырех нижних строк резной надписи:

[... преста]
висз ра^[6] бжи[й ...]на[...]

ему 24 года [...]о[...]ро^к л[е.г. ейб-гвардии]
моско^вскаго [ба]талиону [...]
ме^шщерица і погребѣ[н] под си[м камнем].

Рис. 10. Фрагмент белокаменного надгробия с надписью, вторая треть XVIII в. (ППП-2).
Фото К.А. Егорова

Вероятно, эти вторично использованные в стенах каменного храма надгробия относились к кладбищу, располагавшемуся у деревянной церкви Спаса Преображения середины XVIII в. В пользу этого свидетельствует упоминание в одной из надписей лейб-гвардии Московского батальона (1726–1764 гг.), сформированного из отставных рот лейб-гвардии Преображенского и лейб-гвардии Семеновского полков [8].

Колокольня была пристроена к внешнему фасу западной стены трапезной 1 во втором строительном периоде. Работами были выявлены основания четырех столбов колокольни, кирпичная вымостка между ними и элементы западного входа в церковь (рис. 11). Основания столбов представляли собой близкие к квадратным платформы-пилоны, сложенные из белокаменных блоков и валунов на известковом растворе с применением колотого кирпича.

Рис. 11. Основание колокольни. Вид с севера. Фото Ю.Е. Петрова

Пилоны опирались на горизонтальные лаги, уложенные на бревенчатые сваи. Лаги были засыпаны слоем кирпичного щебня с проливкой известковым раствором. Вышележащая забутовка образована чередующимися слоями белого камня, битого кирпича и скрепляющего раствора.

В проходах между пилонами колокольни сохранились полы. Они представляли собой вымостку из кирпичей, которые были уложены плашмя в один ряд на известковый раствор и ориентированы длинными сторонами по ходу движения. Использованы кирпичи с размерами 25–26×12×6,5 см.

В ходе расчистки западных пилонов колокольни были выявлены две прямоугольные в плане площадки, представлявшие собой основания крыльца западного входа.

В 3-й строительный период, конец 1830-х гг., с юга к колокольне был пристроен юго-западный компартимент. Его стены имели фундаменты неглубокого заложения (70–80 см). Основу фундаментов составлял рваный камень-песчаник (размеры по фасу: 46×25 см; 34×18 см; 30×18 см; 30×12 см), необработанные фрагменты известняка (размеры по фасу: 58×23 см; 26×10 см; 24×8 см) и фрагменты красноглиняного кирпича с проливкой известковым раствором хорошего качества. Отличительной чертой являлось отсутствие характерной для 1-го и 2-го строительных периодов выраженной рядовости забутовки.

4-й строительный период, 1884–1886 гг., внес серьезные изменения в план церкви. Были построены северо-западный компартимент, трапезная 2, придел Александра Невского, подвал и система отопления.

Северо-западный компартимент был задуман как симметричное помещение существовавшему на тот момент юго-западному компартименту. Сохранились 13–14 рядов кирпичной кладки на известковом растворе. Кладка

регулярная, верстовая. Использованы кирпичи размерами 25,5–26×12×7–7,5 см. На отдельных кирпичках – маркировка завода А.Г. Гусарева [1]. Связующий раствор – известковый, хорошего качества, светло-серого цвета. Швы толщиной 1,0–1,5 см обработаны методом «затирки». Кирпичная кладка опиралась на забутовку из необработанных кусков известняка, фрагментов красноглиняного кирпича и известкового раствора.

Трапезная 2 примыкала с севера к трапезной 1 и располагалась между северо-западным компартиментом и северным приделом. Значительную часть подземного объема трапезной 2 занимало подвальное помещение. В ходе работ выявлены северная и западная стены, а также основания северо-западного и северо-восточного столбов. Стены трапезной сложены из кирпича на известковом растворе. В кладке использованы кирпичи с указанными выше размерами и маркировкой.

Придел Александра Невского находился севернее четверика. В ходе работ зафиксированы основания северной и восточной стен. Кирпичная кладка была возведена на белокаменной забутовке. Кладка регулярная, цепная. Раствор известковый, светло-серого цвета. Швы неравномерные: 0,7–1,5 см. В алтарной части придела расчищено основание престола, которое представляло собой близкую к квадратной (140×132 см) площадку, сложенную из кирпича на известковом растворе.

Подвал изначально представлял собой прямоугольное (6,9×5,30 м) в плане помещение. Его стены сложены из кирпича на известковом растворе. Система кладки – цепная. Из подвала выходили три калориферных канала. Здесь находился затопочный узел. Вход в помещение осуществлялся с севера. В XX в. подвал был значительно перестроен: его расширили в южном направлении, в северной стене пробили новый дверной проем, отопительный узел разобрали (рис. 12).

Подвальное помещение было засыпано слоем разрушения, состоявшего из коричневой супеси с многочисленными включениями битого кирпича, извести, фрагментов штукатурки. В этом слое встречались крупные обломки стен и сводов, бетонные блоки и плиты, стальные балки, трубы, радиаторы системы отопления и т.п.

Основная часть находок была сделана в пределах подвала. Исследованный комплекс имеет точную верхнюю дату – 18 июля 1964 г. Состав коллекции позволяет утверждать, что в советский период времени в подвале существовала небольшая мастерская, где производился ремонт и, возможно, изготовление церковной утвари и элементов интерьера. Здесь были найдены детали подсвечников и настенных светильников, разнообразные накладки («крест», «херувим», «виноградная лоза», «кленовый лист»), фрагменты окладов икон, кронштейны паникадил, детали ограждений, створка складня, подвеска хоругви, фрагмент медного сосуда, кадило с крышкой (рис. 13). К сохранившемуся инструментарию относятся бурав и зубило.

Рис. 12. Подвальное помещение храма. Вид с востока. Фото Ю.Е. Петрова

Рис. 13. Археологические находки из заполнения подвала. *Обозначения:* 1 – створка складня; 2 – кадило, крышка кадила, подставка подсвечника; 3 – накладка-«херувим»; 4 – накладки-«виноградная лоза»

Отопление храма осуществлялось через разветвленную, затрагивающую практически все церковные помещения, систему, для возведения которой потребовались масштабные земляные и строительные работы. Монтаж отопления сопровождался перекладкой полов и частичной разборкой фундаментных частей стен здания. Система отопления состояла из затопочного узла и сети подпольных каналов-воздуховодов, представлявших собой кирпичные желоба, перекрытые цилиндрическими сводами. Кладка стен велась в два кирпича (средняя толщина – 24 см). На отдельных участках внутренние стороны желобов были выложены слоем огнеупорного кирпича (размеры: 23–23,5×10,5×5,5–6 см). Дно каналов было выложено кирпичом и промазано раствором (рис. 14).

Рис. 14. Элемент системы отопления. Вид с юга. Фото Ю.Е. Петрова

Одним из важных результатов археологического исследования Преображенской церкви явилось обнаружение здесь находок, имеющих большое значение для воссоздания исторического облика храма. Это резные белокаменные архитектурные детали, каменные и керамические элементы облицовки полов и стен, железные связи, фурнитура, фрагменты перекрытий сводов, лепнины и деревянных элементов иконостаса с остатками росписи (рис. 15).

Рис. 15. Находки из слоя разрушения. *Обозначения:* 1 – фрагмент свода с росписью; 2 – фрагмент лепнины; 3 – деревянная резная деталь

Полученные материалы послужили основой для разработки ГУП «Моспроект-2» (мастерская № 12, арх. А.Н. Оболенский; мастерская № 13, арх. В.Ф. Коршунов) проекта реставрации фундаментов и воссоздания храма, освящение которого состоялось 8 мая 2015 г. (рис. 16–18).

Рис. 16. Восстановление Преображенского храма. Ноябрь 2013 г. Фото Ю.Е. Петрова

Рис. 17. Восстановление Преображенского храма. Апрель 2014 г. Фото Ю.Е. Петрова

Рис. 18. Храм Преображения Господня на Преображенской площади. Сентябрь 2016 г.
Фото К.А. Егорова

Список литературы

1. Баранова С.И. Москва изразцовая. М.: Московские учебники, 2006. 397 с.
2. Найденов Н.А. Москва. Соборы, монастыри и церкви: в 4 ч. М.: Типо-Литография И.И. Кушнерева и Ко, 1883. Ч. IV. № 67.
3. Паламарчук П.Г. Сорок сороков: краткая иллюстрированная история всех московских храмов: в 4 т. М.: Книга и бизнес, 1994. Т. 2. С. 559–560.
4. Паламарчук П.Г. Сорок сороков: краткая иллюстрированная история всех московских храмов: в 4 т. М.: Книга и бизнес, 1995. Т. 3. С. 527–528.
5. Приходы и церкви Тульской епархии. Тула: Тип. Соколова и Фортунатова,

1895. 781 с.

6. Синицын П.В. Преображенское и окружающие его места, их прошлое и настоящее. М., 1895. 195 с.
7. Церковь Спаса Преображения в Преображенском // Московское наследие. 2007. № 4. С. 80.
8. Чичерин А. История Лейб-гвардии Преображенского полка. 1683–1883 г.: в 4 т. СПб.: Лейб-гвардии Преображенский полк, 1883. Т. II. 642 с.

V.A. Berkovich, A.Yu. Balashov, K.A. Egorov, A.K. Ponomarenko

Archaeological Surveys in Construction LLC, Moscow, arheolog-rus@yandex.ru

ARCHAEOLOGICAL RESEARCH OF THE CHURCH OF THE TRANSFIGURATION AT PREOBRAZHenskAYA SQUARE IN MOSCOW

Abstract. Pre-design architectural and archaeological studies were carried out in the park on the Preobrazhenskaya Square in Moscow. Archaeological excavations completely revealed the underground part of the Church of the Transfiguration, determined the degree of preservation of the foundations, clarified the layout of the lost building and studied cultural layers. During the excavations, turned out that the explosion in 1964 and the subsequent mechanized demolition of the ruins and leveling of the surface turned the remains of the temple into a solid rubble of construction debris. In the masonry of the apse and the quadrangle, two fragments of white-stone tombstones of the XVIII century were found. Four construction periods were identified. The received materials served as the basis for the development of the foundation's restoration project and the reconstruction of the church.

Key words: foundations; cellar; gravestones; church; construction period.

Горлов И.О.

ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова», г. Москва, i.gorlov@marine-rc.ru

ПОДВОДНО-АРХЕОЛОГИЧЕСКИЕ РАБОТЫ В СОСТАВЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ НА ШЕЛЬФЕ. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Аннотация. Несмотря на длительное время, прошедшее с момента вхождения подводных археологических работ в практику проведения инженерных изысканий на шельфе, такие исследования продолжают восприниматься как экзотические. Практика организации и выполнения археологических полевых работ на участках водных объектов выявила ряд присущих им проблем и особенностей. В публикации рассматриваются наиболее острые проблемы и обобщаются ключевые аспекты успешного выполнения подводных археологических работ.

Ключевые слова: подводная археология; археологические полевые работы; инженерные изыскания на шельфе; инженерно-экологические изыскания; геофизические исследования.

Уникальность подводного наследия как источника знаний о прошлом человечества была признана мировым сообществом почти полвека назад. Более 20 лет международных усилий понадобилось для создания в рамках ЮНЕСКО единого подхода к его изучению, сохранению и управлению его ресурсами. Результатом этой деятельности стала конвенция ЮНЕСКО 2001 г. «Об охране подводного культурного наследия» [1]. Несмотря на то, что Россия не подписала Конвенцию, основные принципы ее признаются и лежат в основе подхода к сохранению подводного наследия в России.

В ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова» накоплен опыт организации, выполнения, сопровождения и взаимодействия по вопросам проведения историко-культурных исследований в составе морских инженерных изысканий. На основании этого опыта следует остановиться на ряде проблем и особенностей, характерных для археологических работ на участках водных объектов.

Подводные археологические работы вошли в практику инженерных изысканий достаточно давно, но до сегодняшнего дня продолжают восприниматься заказчиками и изыскателями скорее, как экзотическая случайность, а не стандартный вид инженерных изысканий на шельфе.

С принятием пересмотренной Европейской конвенции об охране археологического наследия [10] выполнение археологических разведок на участках, о которых нет сведений об отсутствии на них объектов археологического наследия, стало обязательным. К сожалению, в отношении водных объектов сохранялся правовой вакуум, обусловленный множественными несоответствиями в законодательстве, что значительно затрудняло вхождение подводных археологических работ в рутинную практику изысканий.

Рассматривая проблемы археологических работ, следует начать с вопроса о месте историко-культурных исследований при проведении инженерных изысканий.

В соответствии со ст. 47 Градостроительного кодекса РФ [11], перечень видов инженерных изысканий утвержден Постановлением Правительства РФ № 20 от 19.01.2006 «Об инженерных изысканиях для подготовки проектной документации, строительства, реконструкции объектов капитального строительства» [6].

Историко-культурные исследования не относятся к инженерным изысканиям. Определение историко-культурных исследований отсутствует в федеральных нормативно-правовых актах, но с небольшой вариабельностью формулируется в региональных [2, 3]:

«Историко-культурные исследования проводятся в целях обеспечения сохранения и государственной охраны объектов культурного наследия и включают в себя историко-архитектурные, историко-градостроительные и мемориальные исследования, археологические полевые работы и иные виды исследований».

Некорректным представляется употребление различных конструкций со словом «археология» для обозначения археологических полевых работ, как-то:

- историко-археологические изыскания;
- инженерно-археологические исследования;
- камеральные археологические изыскания и др.

Несмотря на то, что историко-культурные исследования в целом, и археологические полевые работы в частности не отнесены к инженерным изысканиям, в процессе проведения последних возникает необходимость выполнения различных видов историко-культурных исследований для целей Государственной историко-культурной экспертизы (ГИКЭ).

Одной из наиболее острых проблем, присущих сегодня археологическим работам в инженерных изысканиях в целом, и наиболее остро проявляющаяся в подводных работах, стала их непрогнозируемость и неочевидность необходимости выполнения для заказчика на этапе планирования инженерных изысканий.

Де факто, археологические работы на суше или на акватории, при подготовке к новому строительству, должны проводиться в подавляющем большинстве случаев, т.к. необходимость их выполнения проистекает из необходимости установления факта наличия либо отсутствия объектов археологического наследия на земельном участке, если ГИКЭ не была выполнена на этом участке ранее.

Однако в действующем СП 47.13330.2016 [8] упоминание археологических работ вообще исключено из текста документа. А необходимость выполнения становится очевидной только в момент получения предписания от органа охраны объектов культурного наследия.

Таким образом, до момента получения предписания о проведении ГИКЭ путем археологической разведки, о необходимости выполнения данного вида работ может не подозревать ни заказчик, ни изыскатель.

Непрозрачность приводит к отсутствию в бюджете инженерных изысканий средств на выполнение полевых работ. Археологические работы не попадают в программу работ, и не выполняются в полевой сезон, что толкает исполнителей к поиску альтернативных вариантов решения вопроса.

В подавляющем большинстве случаев археологические работы идут как скрытый и вложенный вид исследований внутри инженерно-экологических изысканий. Многие виды хозяйственного освоения, влияющие на сохранность объектов археологического наследия, не требуют прохождения в органах государственной экспертизы и ограничиваются прохождением экологической экспертизы, в ходе которой не уделяется должного внимания оценке корректности выполнения историко-культурных исследований.

Еще одной проблемой стал «камеральный» характер работ.

До недавнего времени в Положении о ГИКЭ [7] существовала лакуна, обусловленная неоднозначностью трактовки подпунктов д) и е) пункта 11_1. В частности, пункт 11_1 е) относился к ГИКЭ документации, за исключением научных отчетов о выполненных археологических работах, содержащей результаты исследований, в соответствии с которыми определяется наличие или отсутствие объектов, обладающих признаками объекта культурного наследия. Отдельные эксперты использовали данную формулировку для вынесения положительных заключений экспертизы на основании отчетов о работах, выполненных без проведения натурного обследования, получения соответствующих разрешений и, зачастую, выполненных исключительно на основании литературного обзора.

Не трудно догадаться, что такая форма проведения ГИКЭ стала популярна у заказчиков и исполнителей, в особенности, если речь не шла о прохождении в органах государственной экспертизы, и стала спасательным кругом для изыскателей, обнаруживающих археологические работы на этапах подготовки отчета.

Имеется и экономический эффект стремления к проведению историко-культурных исследований в камеральном формате. Это приводит к значительному снижению суммы, закладываемой заказчиком на выполнение историко-культурных исследований, и влияет на возможность выполнения полевых работ в рамках изначального бюджета проекта.

Согласно п. 10 ст 45.1 [9] порядок проведения археологических полевых работ, методы научных исследований объектов археологического наследия, состав и структура научного отчета о выполненных археологических полевых работах, требования к профессиональным знаниям и навыкам исследователя определяются Российской академией наук при осуществлении научной регламентации археологических полевых работ.

Правила проведения археологических полевых работ регламентируются двумя документами:

- Положением о порядке проведения археологических полевых работ и составления научной отчетной документации [5];
- Правилами проведения археологических работ на участках водных объектов [4] (далее – Правила).

Пункт 3.3 Правил, гласит:

«Если археологическая разведка проводится в составе государственной историко-культурной экспертизы для определения наличия или отсутствия объектов археологического наследия либо объектов, обладающих признаками объектов археологического наследия в границах участка водного объекта, подлежащего воздействию строительных или хозяйственных работ, обязательным этапом полевых работ является комплексное дистанционное обследование всей площади заданного участка водного объекта, за исключением участков, где такое обследование невозможно или нецелесообразно в связи с техническими ограничениями аппаратуры (глубина акватории менее 2 м, естественная изрезанность береговой линии, существующие строительные объекты в зоне обследования».

Состав комплекса дистанционных исследований также регламентируется Правилами и зависит от характера обследуемого участка.

В состав дистанционных исследований входит:

- гидролокационное обследование донной поверхности гидролокатором бокового обзора/интерферометром;
- обследование донной поверхности многолучевым эхолотом;
- профилирование дна высокочастотным сейсмоакустическим профилографом;
- морская магнитная съемка.

Обязательным этапом археологических полевых работ на участках водных объектов является изучение выделенных по результатам дистанционного исследования аномалий визуально, либо путем шурфовки. Данный этап в рутинной практике означает выполнение водолазного обследования, либо обследования с помощью телеуправляемых необитаемых аппаратов.

Важно отметить, что требования к качеству результатов дистанционного исследования для археологических работ превышают требования к качеству результатов аналогичных исследований в общей практике инженерных изысканий. В особенности это касается данных гидролокационного обследования и морской магнитной съемки.

К сожалению, общим местом стал тот факт, что качество данных геофизических исследований, выполненных без учета специфики археологических работ, оказывается либо вообще неприемлемым для археологии, либо приводит к увеличению количества выделяемых для заверки целей, за счет учета ошибок и невозможности первичной идентификации

аномалий, что в конечном итоге влечет возрастание трудоемкости этапа визуальной заверки и сроков выполнения работ. Качественные данные геофизических исследований критически необходимы для обеспечения качества и скорости археологических работ.

Следует добавить, что в ходе выполнения археологических работ время от времени возникает потребность в дообследовании района работ геофизическими методами. Такие работы не являются дублированием ранее выполненных геофизических исследований, т.к. служат для получения более полных и всесторонних данных, потребность в которых может быть установлена только в результате анализа первичной информации.

Нередко приходится слышать от представителей заказчиков мнение о бесперспективности проведения археологических работ по той причине, что район работ давно и интенсивно эксплуатируется, и в результате антропогенной нагрузки возможные археологические следы давно утрачены, либо наоборот, находится в удаленных регионах, где обнаружение следов человека маловероятно. Контраргументом этого мнения выступает сама практика подводных археологических работ. Представления человека о местах, удобных для проживания и хозяйствования, остаются достаточно постоянными в веках, и проведение археологических разведок на месте действующих портов, в устьях рек и на затопленных после окончания оледенения территориях приносят постоянные результаты в виде археологических свидетельств. Бесперспективность района и отсутствие объектов археологического наследия может быть установлено только в результате всесторонней археологической разведки.

Ввиду того, что Россия – подписант Европейской конвенции об охране археологического наследия (пересмотренной) [10], она со своей стороны реализует ее принципы охраны археологического наследия как на земле, так и под водой. С момента вступления в силу изменений, обусловленных принятием Конвенции, до сегодняшнего дня пройден долгий путь по адаптации правовой базы к принципам Конвенции. Как было упомянуто выше, археологическое наследие под водой оставалось в «серой» зоне правового поля. В 2021 г. произошли существенные изменения, которые отразятся на требованиях, предъявляемых к составу и объему археологических работ в составе инженерных изысканий.

Основная суть изменений, вводимых Федеральным законом № 193-ФЗ от 11.06.2021 [12] сводится к установлению полномочий региональных властей в области сохранения, использования, популяризации и госохраны объектов культурного наследия на примыкающих внутренних морских водах и территориальном море РФ, порядка использования водных объектов в границах территорий и защитных (охранных) зон объектов культурного наследия. Закон устанавливает обязанность собственников водных объектов и водопользователей не допускать причинение вреда объектам культурного наследия и вводит возможность приостановления или ограничения

водопользования в случае причинения вреда объектам культурного наследия. Важным аспектом изменений является распространение охранных мер на внутренние водные пути.

На практике вышеобозначенные изменения означают необходимость выполнения археологических полевых работ при проведении инженерных изысканий не только на море, но также и для строительства объектов речной инфраструктуры, оборудования подводных переходов и выполнения дноуглубительных работ на реках и озерах.

Вместо заключения.

Для избежания неприятных «сюрпризов» при выполнении инженерно-экологических и инженерных изысканий для строительства важна очевидность и прогнозируемость археологических полевых работ в составе инженерных изысканий, опирающаяся на прозрачность нормативной документации и осведомленность проектантов и изыскателей. Практика «камерального» выполнения историко-культурных исследований для установления факта наличия либо отсутствия объектов археологического наследия не только противоречит действующему законодательству, но и обретает ощутимые последствия для водопользователей.

Выполнение археологических полевых работ на участках водных объектов в первую очередь, требует качественных результатов геофизических исследований, которые являются неотъемлемой частью археологических работ. Структура организуемых работ должна предусматривать время на анализ результатов дистанционных исследований и включать этап визуальной заверки обнаруженных аномалий.

Изыскателям, непосредственно выполняющим инженерно-экологические изыскания, следует обращать особое внимание на очень высокую вероятность выполнения археологических работ в составе инженерных изысканий.

Список литературы

1. Конвенция ЮНЕСКО «Об охране подводного культурного наследия». 2001 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/underwater_heritage.shtml (дата обращения: 15.11.2021).
2. Методические указания по проведению комплексных историко-культурных исследований / Е.Е. Соловьева, Т.В. Царева, Е.Ю. Дутлова, А.А. Белоконь, О.Г. Ким / М.: Изд-во ГУП «НИИПИ генерального плана Москвы», 2009. 54 с.
3. Областной закон Ростовской области № 178-ЗС от 22.10.2004 «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) в Ростовской области».

4. Постановление Бюро Отделения историко-филологических наук РАН № 29 от 21.05.2019 «Правила проведения археологических работ на участках водных объектов».
5. Постановление Бюро Отделения историко-филологических наук РАН № 32 от 20.06.2018 «Положение о порядке проведения археологических полевых работ (археологических раскопок и разведок) и составления научной отчетной документации».
6. Постановление Правительства РФ № 20 от 19.01.2006 «Об инженерных изысканиях для подготовки проектной документации строительства, реконструкции объектов капитального строительства».
7. Постановление Правительства РФ № 569 от 15.07.2009 «Об утверждении Положения о государственной историко-культурной экспертизе».
8. СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96*».
9. Федеральный закон № 73-ФЗ от 25.06.2002 «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации».
10. Федеральный закон № 163-ФЗ от 27.06.2011 «Европейская конвенция об охране археологического наследия. (пересмотренная) (ETS № 143)».
11. Федеральный закон № 190-ФЗ от 29.12.2004 «Градостроительный кодекс Российской Федерации».
12. Федеральный закон № 193-ФЗ от 11.06.2021 «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

I.O. Gorlov

Lomonosov Moscow State University Marine Research Center LLC, Moscow, i.gorlov@marine-rc.ru

UNDERWATER ARCHAEOLOGICAL WORKS AS PART OF ENGINEERING SURVEYS ON SHELF. PROBLEMS AND PROSPECTS

Abstract. Despite the long time that has passed since the entry of underwater archaeological work into the practice of marine engineering surveys, such work continues to be perceived as exotic. The practice of organizing and performing archaeological fieldwork on the sites of water bodies has revealed a number of inherent problems and features. The publication examines the most acute problems and summarizes the key aspects of successful underwater archaeological work.

Key words: underwater archaeology; archaeological fieldwork; engineering surveys on shelf; engineering-ecological surveys; geophysical studies.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ

Васин Д.В., Лехов М.В.

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии,
г. Москва, vasin.denis1998@gmail.com, mvlekhov@geol.msu.ru

РАЗГРУЗКА ГРУНТОВЫХ ВОД В ДОЛИНУ р. МОСКВЫ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СКЛОНА КАРАМЫШЕВСКОЙ НАБЕРЕЖНОЙ

Аннотация. Публикация посвящена изучению гидрогеологических условий оползневого склона на Карамышевской набережной, а также оценке влияния потока подземных вод на его устойчивость. При оценке устойчивости склонов необходимо проводить исследования гидрогеологии района для учета гидродинамической силы, создаваемой потоком подземных вод. Гидрогеологические исследования в ходе инженерно-геологических изысканий, как правило, ограничиваются лишь замерами уровней грунтовых вод и могут сопровождаться нарушениями при определении их установившихся уровней. В то же время, при оценке устойчивости склонов необходимо проводить исследования гидрогеологии района для учета гидродинамической силы, создаваемой потоком подземных вод, с целью минимизации рисков, связанных с активизацией оползневых процессов. На основании архивных материалов, составленных в результате предыдущих работ на участке рекогносцировочного обследования территории, а также ретроспективного анализа составлен графический материал, включающий в себя карту распределения напоров и карту глубин залегания подземных вод, а также рассчитаны коэффициенты устойчивости склона в естественном и «абсолютно сухом» состоянии. В результате расчета устойчивости склона по наиболее слабой поверхности скольжения в современном и «абсолютно сухом» состояниях, было зафиксировано отличие в запасе устойчивости более чем в 1,5 раза. При помощи графиков эпюр кумулятивного сопротивления и оползневого давления продемонстрировано распределение сил вдоль поверхности смещения оползневого тела. В работе содержится краткое обоснование использования ряда дренажных скважин, установленных на бровке склона, как наиболее эффективного защитного мероприятия против развития оползневых процессов на изученном участке.

Ключевые слова: оползневой склон; Карамышевская набережная; поток подземных вод; устойчивость склона; гидродинамическая сила; гидрогеологические исследования; инженерно-геологические изыскания; активизация оползневых процессов; дренажные скважины; защитное мероприятие.

Введение

Склон на Карамышевской набережной имеет широкую известность – многие издания, такие как газета «Известия» освещали активизацию оползня здесь в разное время [6]. Этот участок многократно становился объектом исследований различных организаций [3], в связи со своей неустойчивостью, однако изучение гидрогеологических условий при этом не становилось при этом целевой задачей. На склоне располагается рекреационная зона, где

происходят ярко выраженные процессы оползания, эрозии и подтопления грунтовыми водами. У бровки склона расположены многочисленные инженерные сооружения: жилые здания, дороги и другие объекты.

Исследуемый участок оползневого склона на Карамышевской набережной

Рис. 1. Местоположение исследуемого участка

Проблема активизации процессов оползания склона на Карамышевской набережной уже долгое время является актуальной проблемой, до сих пор так и не нашедшая своего решения. Целью работы стало не только изучение гидрогеологических условий склона, но и оценка влияния гидродинамической силы, создаваемой потоком подземных вод, на его устойчивость, как основного фактора активизации оползневых процессов на участке.

Используемые материалы

При анализе исследуемого объекта использовались данные архивных фондов, материалы из открытых источников, а также результаты, полученные по итогам рекогносцировочного обследования территории.

Ретроспективный анализ показал, что значительную роль в уменьшении запаса устойчивости склона сыграло появление ниже по течению р. Москвы водохранилища, значительно расширившего русло реки и поднявшего ее уровень [7], что усилило влияние фактора подмыва рекой склона. Кроме того, ликвидация малой р. Ходынка, протекавшей здесь до прошлого века, также привела к поднятию уровней грунтовых вод на водоразделе и в области разгрузки, увеличивая степень водонасыщения склона.

Рис. 2. Река Ходынка и Карамышевская набережная на топографическом плане
г. Москвы 1838 г.

Рекогносцировочное обследование территории показало активное развитие склоновых процессов на исследуемом участке и примыкающим к нему территориях, выражающееся в искривленных стволах деревьев и их наклоне в сторону реки. В приуездной части реки, в основании склона наблюдаются суффозионные процессы, связанные со структурно-неустойчивыми отложениями мелкозернистых песков.

Рис. 3. Суффозия, подмыв берега и оплывание склона на Карамышевской набережной.
Фото Д.В. Васина

Склон характеризуется как интенсивно подмываемый. Это связано, как с меандрированием русла р. Москвы, которое определяет значительное перераспределение и изменение скоростей, вызывающих возникновение зон концентраций, так и с абразией, в первую очередь связанной здесь с регулярным проходом судов, вызывающих так называемые «корабельные волны».

Гидрогеологические условия участка исследований в пределах разведанной глубины (до отметки 78,1 м) характеризуются наличием надъюрского и подольско-мячковского водоносных комплексов. Воды четвертичных отложения и волжского водоносного горизонта гидравлически связаны, и поэтому рассматривались как единый водоносный комплекс. Анализ гидрогеологических условий показал, что на устойчивость склона наибольшее влияние оказывает именно первый от поверхности водоносный комплекс, режим которого обусловлен гидравлической связью с зарегулированным уровнем р. Москвы. Питание надъюрского водоносного комплекса осуществляется путем инфильтрации атмосферных осадков, а также связан с вероятными утечками из водонесущих коммуникаций, повсеместно располагающихся на участке. Таким образом, гидрогеологические условия на Карамышевской набережной обеспечивают интенсивное водонасыщение толщи четвертичных отложений и подстилающих их образований юрского возраста.

Для подробного изучения гидрогеологических условий построена карта фактического материала. Основой модели стала подробная топографическая съемка местности высокого качества, выполненная в 2019 г. Оцифровка высотных отметок и глубин залегания грунтовых вод на склоне и прилегающих к нему районов, позволила построить рельеф местности и создать плановую гидрогеологическую модель, позволяющую найти значения напора в каждой точке межскважинного пространства, а также определить глубину залегания грунтовых вод по всей территории склона (рис. 4).

Несмотря на большой объем фактического материала, использованного при ее построении, карта не всегда корректно отображает увиденную при натурном обследовании действительность. Например, места, где располагаются родники, на карте попадает в зону глубокого залегания грунтовых вод. Для получения точных уровней свободной поверхности необходимо проведение гидродинамической съемки режимных уровней, установив за ними надлежащее наблюдение.

Тем не менее, даже обладая некоторыми неточностями, построенная карта все же остается полезным инструментом в изучении склона, отражая основные черты и закономерности водопроявлений на рельефе.

Рис. 4. Карта глубин залегания грунтовых вод склона с указанием родников № 45, 46

Методы

Существенная часть решений расчетов устойчивости склонов, применяющаяся на практике, относится к инженерным методам, основанным на одном общем принципе – расчет силового баланса готового к оползанию массива в ненарушенном состоянии. Предполагаемый оползень разбивается на вертикальные блоки, в пределах которых параметры принимаются постоянными величинами. При этом схема усложняется неровностями рельефа, границ слоев и предполагаемой поверхности скольжения, неоднородностью грунтов, локальными нагрузками и подтоплениями подземными водами, а также наличием водоема в основании склона. Для оценки устойчивости силы по блокам суммируются, исходя из векторного разложения по наклону плоских участков поверхностей скольжения, и вычисляется коэффициент устойчивости, который характеризуется отношением сил, удерживающих массив грунта на наклонной поверхности, к силам, сдвигающим этот массив [4, 5]. Весь спектр инженерных методов, обусловленный различием гипотез, применяемых их авторами при расчете коэффициента устойчивости, основывается на теории предельного равновесия.

В любой расчетной модели принимается ряд условных допущений, из-за которых в результате и получаются хоть и близкие, но несколько отличающиеся значения:

- в некоторых методах силы взаимодействия между отсеками, на которые разбивается оползневой блок, не учитываются;

– принимаются излагаемые далее допущения о значениях и проявлениях давления грунтовых вод и сейсмической силы;

– в некоторых методах при рассмотрении равновесия массива принимается одно уравнение статики;

– в отдельных случаях теория предельного равновесия применяется к грунтовому массиву, находящемуся в запредельном состоянии (при $K_y < 1$).

Использование любого метода должно учитывать факторы дестабилизации склона, оказываемые воздействием подземных вод на склон. Такими факторами являются: ослабление прочностных свойств грунтов, увеличение их веса при водонасыщении, гидростатическое взвешивание и гидродинамика фильтрационного потока [1]. При расчетах веса считается, что массив полностью водонасыщен ниже поверхности грунтовых вод.

В то время как различные методы при оценке устойчивости склона дают результаты, различающиеся между собой в пределах 5–10%, вариативность результатов расчета с различной полнотой учета гидравлических сил могут достигать и превышать 30% барьер, что и определяет необходимость их учета при изучении оползневых склонов [4].

Коэффициент запаса устойчивости склона рассчитывается как отношение сумм удерживающих и сдвигающих сил, действующих на блоки, полученные путем разбивки массива:

$$K = \frac{\sum U_j}{\sum S_j}, \quad (1)$$

где U – удерживающие силы, S – сдвигающие силы.

В методе касательных сил при определении удерживающей силы U необходимо учитывать и фильтрационную силу Φ , направленную противоположно нормальной к поверхности скольжения силе N .

$$U = (N - \Phi)\operatorname{tg}\varphi + cl, \quad (2)$$

где U – удерживающая сила, N – нормальная проекция веса G , Φ – сила нормальная к поверхности скольжения, φ – угол наклона участка поверхности скольжения, C – удельное сцепление грунта, l – длина основания расчетного блока.

При решении профильных задач предполагается предпосылка о совпадении направления фильтрационного потока с направлением падения поверхности скольжения в плане. Поток подземных вод действует на грунты гидродинамической силой и силой взвешивания. Сила взвешивания – гидростатическая и определяется пьезометрической высотой h или давлением $p = \gamma h$ (где γ – объемный вес воды).

Гидродинамические силы в потоке воды, являются объемными и пропорциональны градиенту напора H , поэтому удельная сила и сила, действующая на объем отсека, определяются следующими зависимостями:

$$f = -\gamma \text{grad} H; \quad D = \iint_{\omega} f d\omega, \quad (3)$$

где f – удельная сила, γ – объемный вес воды, H – напор в каждой точке отсека, D – гидродинамическая сила, действующая на объем отсека, ω – объем, м.

Учет потока производится методом контурного интегрирования гидродинамической силы [4]. Из анализа гидрогеомеханического поля следует вывод о прямой зависимости между перепадами напоров в склоне и сдвигающей силой, действующей на него. Этот факт в дальнейшем будет рассмотрен на наглядном примере оценки устойчивости.

Оценка устойчивости склона

Для расчетов устойчивости склона в современном состоянии выбран поперечник, характерный для всего оползневого участка по сочетанию дестабилизирующих факторов.

При моделировании безнапорной фильтрации и определения данных распределения напоров в склоне использовалась программа PERFIL, использующая метод конечных элементов (МКЭ) и позволяющая получить решение по ленте тока для области с криволинейными границами и неоднородной проницаемостью грунтов, слагающих склон (рис. 5).

Рис. 5. Профильная модель фильтрации в склоне в естественном состоянии

В модели лента тока выбрана исходя из карты гидроизогипс. Метод конечных элементов позволяет подробно аппроксимировать криволинейную подвижную границу для решения профильных задач фильтрации со свободной

поверхностью. В модели применяется регулярная треугольная сетка, элементы которой обеспечивают непрерывный характер изменения коэффициентов результирующей матрицы в зависимости от положения свободной поверхности в итерационном счете [6].

По результатам моделирования определен удельный расход грунтовых вод, который составил $2,7 \text{ м}^2/\text{сут}$. Для возможности профильного моделирования фильтрации с учетом работы дренажных скважин, на правой границе вместо значений напоров был задан расход. Замена обусловлена тем, что при откачках значение напоров на правой границе может изменяться в зависимости от параметров скважин и их дебитов (рис. 6).

Рис. 6. Профильная модель фильтрации в склоне с граничным условием второго рода на правой границе

Программа SLUMP создана для поиска наименее стабильного состояния по цилиндрической поверхности скольжения, установленной в том или ином месте, с учетом: параметрической неоднородности массива, углового несогласия слоев, гидростатического давления, воздействия потока подземных вод на грунты и сооружения, а также гидростатического давления на подводный участок склона [4]. Программа основана на контурном интегрировании сил гидравлики, которые определяются значениями напоров и расходов потока, получаемых при расчете в программе PERFIL.

В расчетах использованы показатели прочностных свойств, определенные по параметрам, предоставленным изыскательскими организациями. Инженерно-геологические элементы объединены по принадлежности в литолого-генетические слои, и охарактеризованы близкими к фактическим значениями (табл. 1). В общем случае разбивочные отсеки принимают так, чтобы практически без потери точности в их пределах можно было принять поверхность за плоскость, а состояние грунта, действие внешних сил и т.п. были практически однородными [9].

Таблица 1
Расчетные значения прочностных свойств неводонасыщенных грунтов

Слой	Сцепление C , МПа	Угол внутреннего трения φ , °	Плотность грунта ρ , г/см ³
Песок (аQ _{III})	0,005	26	1,80
Супесь + песок dp(K ₁)	0,005	24	1,80
Суглинок dpJ _{3f1}	0,019	14	1,90
Суглинок + песок dp(gQ _{III})	0,003	26	1,90
Суглинок dp(J _{3f1})	0,018	19	1,92
Супесь + песок (K ₁)	0,005	30	1,90
Суглинок (J _{3f1} –J _{3eg})	0,021	14	2,00
Глины J	0,030	11	2,10

В табл. 2 представлены свойства грунтов при полном водонасыщении, что определяет сниженные значения показателей угла внутреннего трения и сцепления, но увеличение их плотности по сравнению с неводонасыщенными.

Таблица 2
Расчетные значения прочностных свойств водонасыщенных грунтов

Слой	Сцепление C , МПа	Угол внутреннего трения φ , °	Плотность грунта ρ , г/см ³
Песок (аQ _{III})	0,004	25	2,0
Супесь+песок dp(K ₁)	0,004	23	2,0
Суглинок dpJ _{3f1}	0,016	13	2,1
Суглинок + песок dp(gQ _{III})	0,002	25	2,1
Суглинок dp(J _{3f1})	0,015	18	2,1
Супесь + песок (K ₁)	0,004	29	2,1
Суглинок (J _{3f1} –J _{3eg})	0,020	13	2,2
Глины J	0,027	11	2,3

На рис. 7 красно-белая дуга обозначает цилиндрическую поверхность, по которой велся расчет коэффициента устойчивости склона. Ступенчатая пунктирная линия – эпюра оползневого давления. Серия вариантов расчета по различным цилиндрическим поверхностям показала, что наименьшим коэффициентом запаса устойчивости $K = 1,09$ по Терцаги обладает поверхность, захватывающая юрские глины и суглинки (см. рис. 7).

Для демонстрации влияния потока подземных вод на результаты расчетов коэффициента устойчивости и распределения оползневого давления по имитируемой поверхности на рис. 8 показан полностью «сухой» склон по исследуемому поперечнику. Рассчитанный коэффициент составил $K = 1,86$ (см. рис. 8).

Рис. 7. Цилиндрический сегмент с наименьшим запасом устойчивости $K = 1,09$ в современном состоянии. Красная линия – поверхность с минимальным запасом устойчивости

Рис. 8. Цилиндрический сегмент с наименьшим запасом устойчивости $K = 1,86$ в абсолютно сухом склоне

На рис. 9 представлены графики кумулятивного сопротивления сдвигу и оползневого давления, распределенного по поверхности смещения для склона в современном состоянии и для такого же склона, не подверженного воздействию потока подземных вод. Результаты показывают, что суммарные удерживающие силы по расчетным блокам «сухого» склона превышают эти показатели для склона в современном состоянии в 1,5 раза. Кроме того, из графика видно, что в основании оползневого тела удерживающие силы U достигают максимальных значений, в то время как пик суммы сдвигающих сил приходится на центральную часть исследуемой цилиндрической поверхности (см. рис. 9).

Защитные мероприятия по обеспечению устойчивости склона

Оползневой склон на Карамышевской набережной находится в состоянии предельного равновесия, что подтверждается многочисленными работами,

проводившимися на этом участке ранее, и проведенным в данной работе исследованием, для него необходимо разработать проект защитных мероприятий. Популярным способом защиты крутых склонов является установка контрбанкета в его основании, однако его установка на рассматриваемом в данной работе склоне не будет эффективна. Это следует из выводов о распределении удерживающих и сдвигающих силах, сделанных ранее. Контрбанкет, установленный в основании, где удерживающие силы и так достигают своих максимальных значений, не предотвратит оползания верхней, наиболее уязвимой части склона.

Рис. 9. Эпюры кумулятивного сопротивления и оползневое давление для склона в современном и абсолютно сухом состоянии

В качестве альтернативного противооползневого мероприятия было изучено два способа установки ряда вертикальных дренажных скважин по длине неустойчивого участка: в основании склона и на его бровке. Предполагается, что понижение уровней грунтовых вод и ослабление влияния гидрогеологического фактора приведет к ослаблению оползневых процессов.

Перед проведением расчета устойчивости склона в программе SLUMP была смоделирована профильная фильтрация при условии расположения на нем ряда вертикальных дренажных скважин обоими способами.

Для моделирования профильной фильтрации при условии работы ряда дренажных скважин в основании склона, скважинам были заданы следующие параметры:

- диаметр скважин $d_c = 0,4$ м;
- шаг скважин $\sigma = 25,0$ м;

– фильтрационное сопротивление ряда скважин рассчитывается по формуле:

$$L_d = \frac{\sigma}{2\pi} \ln \frac{\sigma}{\pi d_c}, \quad (4)$$

где $L_d = 11,9$ м;

- в скважинах задан напор $H_d = 126,0$ м;
- размер фильтра составляет 6,0 м.

Моделирование дренажа с приведенными выше параметрами представлено на рис. 10 и показывает значительное понижение уровней грунтовых вод по профилю склона. Имитация большего понижения не имела бы практической выгоды, поскольку при больших понижениях возрастет градиент потока на участке между скважиной и водоразделом, что привело бы к уменьшению удерживающих сил и спровоцировало активизацию оползневых процессов (рис. 10).

Рис. 10. Профильная модель фильтрации в оползневом склоне с учетом работы ряда вертикальных дренажных скважин на террасе склона

Для сравнения эффективности различных вариантов расположения дренажа был смоделирован ряд дренажных скважин, на этот раз расположенный на бровке склона (рис. 11). При моделировании на бровке были использованы следующие параметры скважин:

- диаметр скважин $d_c = 0,4$ м;
- шаг скважин $\sigma = 10,0$ м;
- фильтрационное сопротивление $L_d = 3,3$ м;
- в скважинах задан напор $H_d = 130,0$ м;
- размер фильтра составляет 6,0 м.

Полученные значения распределений напоров использованы в расчетах в программе SLUMP. Ниже приведены сравнительные таблицы для рассчитанных значений коэффициентов запаса устойчивости по наиболее слабым цилиндрическим поверхностям для обоих вариантов расположения скважин на склоне.

Рис. 11. Профильная модель фильтрации в оползневом склоне с учетом работы ряда вертикальных дренажных скважин на бровке склона

Расчеты различных вариантов размещения скважин на рис. 12, 13 показывают, что коэффициенты устойчивости, рассчитанные для одной и той же поверхности смещения, составляют: $K_{уст} = 1,21$ для ряда скважин на террасе и $K_{уст} = 1,36$ для ряда скважин, установленных на бровке склона (см. рис. 12, 13). Защитное мероприятие с понижением уровней грунтовых вод в обоих случаях показывает свою эффективность по сравнению с естественными условиями без применения дренажа. Прирост устойчивости в среднем составляет 15% и значения расчетного коэффициента приближается к относительно безопасным значениям $\sim 1,27$ (см. рис. 12, 13).

Рис. 12. Цилиндрический сегмент с наименьшим запасом устойчивости при имитации работы ряда дренажных скважин на террасе склона

Рис. 13. Цилиндрический сегмент с наименьшим запасом устойчивости при имитации работы ряда дренажных скважин на бровке склона

Из рис. 14 видно, что суммы оползневых давлений для случая с дренажом на террасе превышают таковые для случая расположения дренажа на бровке. Суммы удерживающих сил также больше для случая с бровкой. Разница может объясняться различием в распределении фильтрационных сил по изучаемому профилю, возникшем вследствие обоих вариантов дренажа, а также в существенной разнице значений объемного веса для грунтов в водонасыщенном и неводонасыщенном состоянии (см. рис. 14). Из моделирования случая для расположения скважин на террасе виден значительный перепад напоров, образовавшийся на крутом участке склона за счет искусственного понижения уровней. Эти факторы и объясняют значительную разницу, полученную в результате исследования коэффициентов устойчивости для обоих вариантов защитных мероприятий.

Рис. 14. Эпюры кумулятивного сопротивления и оползневое давление для двух вариантов расположения системы дренажа

Установка ряда дренажных скважин снизит градиенты потока, определяющие степень воздействия фильтрационных сил. Предполагается, что при рассмотрении такого защитного мероприятия, местом расположения оборудования будет выбрана именно бровка, как показавшая наилучшие результаты при моделировании.

По результатам всех приведенных результатов моделирования составлен сводный график оползневое давления для современного состояния и для двух вариантов дренажа (рис. 15).

Рис. 15. Эпюры оползневого давления для склона в естественном состоянии и двух вариантов расположения дренажа

Заключение

Рассматриваемый участок склона на Карамышевской набережной характеризуется глубокими оползнями и подтоплениями. На основании составленной карты гидроизогипс и карты глубины залегания грунтовых вод, были определены области вероятных подтоплений и высачивания подземных вод на поверхность склона. Решающее значение в дестабилизации склона на Карамышевской набережной имеет поток подземных вод, оказывающий взвешивающее и гидродинамическое воздействие.

В качестве примера рассмотрен характерный для всего склона поперечник. При помощи программы PERFIL по выбранной ленте тока, с учетом факторов перетекания, инфильтрации и латерального питания, был построен ряд фильтрационных моделей и определен удельный расход по фронту $q = 2,7 \text{ м}^2/\text{сут}$. Профильное моделирование фильтрации обеспечило

данные по напорам, которые использовались для учета действия объемной гидродинамической силы и силы взвешивания при расчетах коэффициентов устойчивости.

Расчет коэффициентов устойчивости на поперечнике проводился инженерными методами с разбивкой на вертикальные блоки выделенного в массиве цилиндрического сегмента, снизу ограниченного имитируемой поверхностью предполагаемого сдвига, а сверху дневной поверхностью. Коэффициент устойчивости определен отношением сумм сдвигающих и удерживающих сил.

Анализ результатов расчета и распределения сдвигающих и удерживающих сил вдоль имитируемых поверхностей, захватывающих отложения юрских суглинков и глин на разрезе показал, что при любом положении коэффициент запаса устойчивости оценивается значением $K \approx 1,15$. На основании полученных распределений оползневого давления на тело предполагаемого оползня сделан вывод о неэффективности защитного мероприятия по установке контрбанкета на террасе.

На основании расчетов проведена оценка эффективности действующего ряда вертикальных дренажных скважин с постоянной малodeбитной откачкой для двух вариантов их расположения вдоль склона: на террасе и на бровке.

Имитация работы скважин, в обоих случаях демонстрирует свою эффективность в уменьшении значения оползневого давления по предполагаемой поверхности смещения. Полученные коэффициенты запаса устойчивости для варианта расположения скважин на террасе и на бровке составили $K = 1,21$ и $K = 1,36$ соответственно.

Перепады напоров, возникающие при работе скважин, могут образовывать высокие градиенты, напрямую влияющие на фильтрационную силу воздействия на склон. Эпюры напряжений, представленные на рис. 15, наглядно демонстрируют превосходство расположения ряда вертикальных скважин на бровке. При выборе такого комплекса защитных мероприятий необходима установка режимных наблюдений за уровнями подземных вод и своевременное обслуживание системы дренажных скважин.

Список литературы

1. Гинзбург Л.К. Рекомендации по выбору методов расчета коэффициента устойчивости склона и оползневого давления. М.: Центральное бюро научно-технической информации, 1986. 123 с.
2. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. М.: Высшая школа, 1985. 352 с.
3. Казеев А.И. Механизм и закономерности развития глубоких оползневых подвижек в г. Москве в фазу катастрофической активизации оползневого процесса: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ИГЭ им. Е.М. Сергеева РАН, 2012. 24 с.

4. Лехов М.В. Гидрогеомеханика оползневых расчетов. Программа SLUMP // Инженерная геология. 2014. № 6. С. 32–48.
5. Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности: автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. М.: МГРИ-РГГРУ, 2014. 40 с.
6. Официальный сайт газеты «Известия». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://iz.ru/news/319333> (дата обращения: 10.04.2021)
7. LiveJournal. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://strogino-time.livejournal.com/3477.html> (дата обращения: 10.04.2021).

D.V. Vasin, M.V. Lekhov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, vasin.denis1998@gmail.com, mvlekhov@geol.msu.ru

UNLOADING OF GROUND WATER INTO THE MOSCOW RIVER VALLEY AND ITS INFLUENCE ON THE STABILITY OF THE KARAMYSHEVSKAYA EMBANKMENT

Abstract. The work is devoted to the study of the hydrogeological conditions of the landslide slope on the Karamyshevskaya embankment, as well as the assessment of the influence of the ground water flow on its stability. When assessing the stability of slopes, it is necessary to conduct studies of the hydrogeology of the area to take into account the hydrodynamic force created by the flow of ground water. Hydrogeological studies in the course of standard engineering-geological surveys, as a rule, are limited only to measurements of ground water levels and may be accompanied by violations in determining their established levels. At the same time, when assessing the stability of slopes, it is necessary to conduct studies of the hydrogeology of the area to take into account the hydrodynamic force created by the flow of ground water in order to minimize the risks associated with the activation of landslide processes. Based on archival materials compiled as a result of previous work on the site, a reconnaissance survey of the territory, as well as a retrospective analysis, graphic material was compiled, including a pressure distribution map and a map of the depths of ground water, and the slope stability coefficients in a natural and “absolutely dry” state were calculated. As a result of calculating the stability of the slope along the weakest sliding surface in modern and “absolutely dry” conditions, a difference in the stability margin of more than one and a half times was recorded. With the help of plots of cumulative resistance and landslide pressure, the distribution of forces along the displacement surface of the landslide body is demonstrated. The paper contains a brief justification for the use of a number of drainage wells installed on the edge of the slope as the most effective protective measure against the development of landslide processes in the studied area.

Key words: landslide slope; Karamyshevskaya Embankment; ground water flow; slope stability; hydrodynamic force; hydrogeological research; engineering-geological surveys; activation of landslide processes; drainage wells; protective measure.

Епифанова Д.Р.^{1,2}, Травкин А.И.³

¹ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, epifanovadr@bnipti.rosneft.ru

²НИУ МГСУ, Институт гидротехнического и энергетического строительства,
кафедра инженерных изысканий и геоэкологии, г. Москва

³г. Москва, anatology_tra@mail.ru

ОПАСНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА ТЕРРИТОРИИ ПРОЕКТИРУЕМОЙ ЗАСТРОЙКИ В ПРЕДЕЛАХ ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ г. УФЫ

Аннотация. Город Уфа один из крупнейших в России. Большая часть населения проживает в селитебной зоне, где практически отсутствуют площадки для строительства с благоприятными условиями по отношению к проявлениям опасных геологических и инженерно-геологических процессов: карстовых, карстово-суффозионных и склоновых. Эти факторы объясняют важность особо тщательного подхода к инженерно-геологическим исследованиям территорий, планируемых к застройке. Инженерно-геологическая основа для разработки генерального плана г. Уфы в масштабе 1:10 000 выполнена в конце XX – начале XXI вв. По архивным материалам составлен комплект синтетических карт для оценочного инженерно-геологического районирования города. Изученность инженерно-геологических условий территории г. Уфы достаточно высокая, но неравномерная по площади. Все составленные карты являются схематическими. В публикации рассматриваются геологические условия и опасные экзогенные геологические процессы и явления локальной территории, расположенной в юго-западной части г. Уфы и перспективной для многоэтажной застройки.

Ключевые слова: экзогенные процессы; карст; суффозия; эрозия; овраг; карта; инженерно-геологические условия; районирование.

Город Уфа с численностью населения более 1 млн чел. относится к группе крупнейших городов России [1, 2]. Большая часть населения проживает на территории так называемого Уфимского «полуострова», ограниченного транзитными реками Белая и Уфа, в селитебной зоне которого практически отсутствуют площадки для строительства с благоприятными условиями относительно опасных геологических и инженерно-геологических процессов.

В то же время г. Уфа все больше «устремляется в высоту» и уже нередким становится возведение здесь высотных (25 и более этажей) зданий.

Инженерно-геологическая основа, необходимая для разработки генерального плана г. Уфы в масштабе 1:10 000, изложена в отчетах, подготовленных по заданию Главархитектуры Администрации г. Уфы в 1996 и 2013 гг. по архивным материалам. Все составленные карты в них являются схематическими.

На стадии градостроительного проектирования необходим тщательный анализ инженерно-геологических условий планируемых к застройке территорий, которые характеризуются развитием карстовых, карстово-суффозионных, склоновых (оползневые) и флювиальных (оврагообразование, размыв) процессов. Таким образом, изучение влияния опасных геологических процессов, распространенных на ограниченной городской территории, на строительство является актуальной задачей.

В настоящей публикации на основе региональной работы [1] и отчета 2013 г. «Создание цифровой карты инженерно-геологического районирования в М 1:10 000 для разработки генерального плана городского округа город Уфа в Республике Башкортостан», подготовленного А.И. Травкиным, Д.Р. Байбиковой, С.А. Алтынбаевым, рассматриваются инженерно-геологические условия, экзогенные процессы и явления локальной территории (в дальнейшем – участок), расположенной в юго-западной части г. Уфы и перспективной для многоэтажной застройки (рис. 1).

Рис. 1. Фрагмент схематической геоморфологической карты территории г. Уфы. Масштаб фрагментов карт на рис. 1–5 произвольный, в отчете 2013 г. – 1:10 000

По архивным данным, на участке площадью 1,15 км² пробурено 214 скважин (инженерно-геологических и карстологических глубиной от 4,0 до 80,0 м), что согласно [3, табл. 6.1] соответствует масштабу 1:2 000 инженерно-геологической съемки для средней (II) категории сложности инженерно-геологических условий.

Участок занят плотной, преимущественно малоэтажной застройкой, кроме восточной части с капитальными 3–14-ти этажными зданиями.

В **геоморфологическом** отношении участок приурочен к правобережному коренному склону долины р. Белой, ее высокой пойме и ограничен тыловым швом последней (см. рис. 1).

На рис. 1 представлен фрагмент схематической геоморфологической карты с контуром рассматриваемого участка, характеризующегося ярко выраженными в рельефе формами: денудационным склоном водораздела (Q_{II-IV}) и склоном речной долины (Q*_{II-IV}), осложненными эрозионными и эрозионно-карстовыми оврагами (коричневый цвет), нерасчлененными (Q_{III-IV}) высокой поймой и I надпойменной террасой и их тыловыми швами.

Абсолютные отметки дневной поверхности изменяются от 92 (около уреза р. Белой) до 175 м (коренной склон) с уклоном на запад.

В **геологическом** отношении рассматриваемый участок представлен отложениями четвертичной и пермской систем (рис. 2).

Рис. 2. Фрагмент схематической геолого-литологической карты, совмещенной с картой четвертичных отложений

Четвертичная система (Q). При построении геолого-литологической карты «сняты» четвертичные, преимущественно техногенные, отложения до глубины 3,0 м. В руслах оврагов и на высокой пойме отложения представлены аллювием (aQ_{IV}): глинами, суглинками, супесями, песками и гравием; в понижениях, на склонах и у их подножия – делювием (dQ).

Пермская система (P) представлена уфимским (P_{1u}) и кунгурским (P_{1k}) ярусами. В составе первого – шешминский и соликамский горизонты.

Шешминский (P_{1ss}) горизонт сложен переслаивающимися глинами, песчаниками (местами загипсованными), известняками, алевролитами, мергелями; а также песчаниками, алевролитами общей мощностью от 15,0 до 60,0 м.

Соликамский горизонт (P_{1sk}) сложен глинами известковистыми, мергелем, известняком, аргиллитом и алевролитом. В нижней части разреза породы местами загипсованы. Мощность горизонта от 11,0 до 20,0 м.

Породы яруса трещиноватые и сильнотрещиноватые, кавернозные и закарстованные, с различной степенью выветрелости.

Кунгурский ярус (P_{1k}), представленный гипсом и ангидритом с маломощными прослоями глины и доломита, располагается на глубинах 36,0–56,0 м в пределах коренного склона и на глубине 27,0 м на высокой пойме. Гипсы, залегающие в кровле яруса, закарстованные, кавернозные, выветрелые. Вскрытая мощность сульфатов от 6,0 до 23,0 м.

Гидрогеологические условия. Территория характеризуется наличием водоносных горизонтов в четвертичных аллювиальных и делювиальных отложениях; водоносного комплекса в отложениях уфимского яруса и трещинно-карстовых вод в гипсах кунгурского яруса.

На рис. 3 представлена карта расположения и глубин залегания подземных вод – первого от поверхности водоносного горизонта:

- 1) в восточной части участка на пологом склоне водораздела на глубинах от 0,5 до 2,0 м и от 2,0 до 4,0 м;
- 2) на несколько более крутом склоне в пределах средней части участка на глубинах от 4,0–7,0 м;
- 3) на крутом склоне в западной части участка на глубинах > 7 м.

Рис. 3. Фрагмент схематической гидрогеологической карты (первого от поверхности водоносного горизонта)

Гидрогеологические условия участка определяются:

- высоким (относительно базиса эрозии) гипсометрическим положением (от 10 до 80 м) участка инженерно-геологических изысканий;
- наличием в разрезе сильнотрещиноватых, кавернозных и закарстованных с различной степенью выветрелости песчаников (иногда загипсованных), известняков, мергелей и гипсов;
- отсутствием выдержанного водоупора;
- сильной расчлененностью правобережного коренного склона долины р. Белая, что создает благоприятные условия для вертикально-нисходящих перетоков инфильтрационных вод.

В формировании гидрогеологических условий на участке основную роль выполняют водоносный комплекс в отложениях уфимского яруса и трещинно-карстовые воды в гипсах кунгурского яруса.

Водоносный комплекс в отложениях уфимского яруса образует систему этажнорасположенных водоносных горизонтов, пластов и линз мощностью от 1,0–3,0 до 8,0–10,0 м со сложной гидравлической связью [1].

Химический состав вод смешанный: гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридно-кальцево-магниевый с минерализацией от 1,3 до 3,2 г/л. Агрессивность вод по отношению к гипсам значительная (дефицит насыщения солями CaSO_4 достигает 2,0–2,8 г/л).

Трещинно-карстовые воды в прикровельной части гипсов кунгурского яруса залегают на глубинах 15,0–36,0 м на коренном склоне и на глубинах 4,0–10,0 м – на высокой пойме.

Коэффициенты фильтрации гипсов изменяются от 5,5 до 35,6 м/сут. По химическому составу карстовые воды сульфатные кальциевые с минерализацией 2,0–2,6 г/л.

Питание карстовых вод – за счет инфильтрации атмосферных осадков и утечек из водонесущих коммуникаций, перетоков из вышерасположенных горизонтов и паводковых речных вод, агрессивных к карбонатам и сульфатам.

Разгрузка – в местную эрозионную сеть и в долину р. Белой.

Из опасных геологических процессов на участке имеют развитие склоновые, карстовые, карстово-суффозионные и эрозионные (рис. 4).

Характеристика проявлений эрозионных и карстово-эрозионных процессов:

- 1 – овраг эрозионно-карстовый длиной 500 м, шириной от 15 до 240 м, на большей части длины и ширины засыпанный;
- 2 – овраг эрозионного происхождения длиной около 450 м, шириной 50–60 м, глубиной 5–9 м, на большей части длины засыпанный;
- 3 – овраг эрозионно-карстовый длиной 750 м, шириной от 20 до 160 м, на половину длины засыпанный;
- 4 – овраг эрозионного происхождения, длиной 250 м, шириной 80–100 м, большей частью длины засыпанный.

Примечание: овраги частично застроены 1–2-этажными домами

— граница затопления паводковыми водами 1%-й обеспеченности уровня р. Белой

Рис. 4. Фрагмент схематической карты проявлений опасных геологических и инженерно-геологических процессов

Склоновые и флювиальные процессы: эрозионные, денудационно- и эрозионно-аккумулятивные – проявляются в виде овражной эрозии, сноса и смыва вниз по склону продуктов выветривания и накопления последних в ложбинах, оврагах и у подножий склона.

Поверхность склона изрезана оврагами эрозионного (овраги 2 и 4) и эрозионно-карстового (овраги 1 и 3) происхождения, частично засыпанными.

Наиболее крутые участки склона долины р. Белой, сложенные суффозионно-неустойчивыми глинисто-карбонатными породами, подвержены плоскостному смыву, осыпаниям, вывалу отдельных глыб и сползанию небольших объемов масс. Эти процессы активизируются весной, когда тает снег и идут продолжительные дожди, ливни. Ранее частные дома строились в основном без соблюдения мер противокарстовой и противооползневой защиты, поэтому даже мелкие оползни способны привести к их деформациям. Такой случай произошел весной 2003 г. по ул. Ахтырская, д. 49а. В результате

сползания небольшой массы пород произошел провал и, как следствие, жилой дом покосился, в стенах появились трещины.

Карст на участке связан, главным образом, с кунгурскими гипсами и загипсованными породами уфимского яруса и, в значительно меньшей степени, с карбонатными породами уфимского яруса.

Проявления карстовых и карстово-суффозионных процессов встречены в пределах тылового шва в виде карстовых провалов № 50 и 55 (см. рис. 4), произошедших соответственно в 1946 и 1981 гг., и карстовой воронки № 3637, описание которых приведено в отчете об инженерно-геологических условиях территории III этапа работ – г. Уфа (I очередь) 1996 г. «Инженерно-геологическое обеспечение г. Уфы для разработки генплана в М 1:10 000» (ответственные исполнители – В.И. Мартин, З.Н. Рафикова, И.Н. Радионова). Кроме того, при бурении в гипсах кунгурского яруса в пределах коренного склона наблюдались провалы бурового снаряда на высоту 0,5–2,8 м, диагностируемые как карстовые полости, заполненные водой, воздухом или глиной текучей.

Не все проявления карстового процесса выражены в современном рельефе. Часть из них погребена под наносными глинистыми отложениями в олигоцене и плиоцене, а часть засыпана при освоении территории.

В 2013 г. по заданию Главархитектуры Администрации г. Уфы А.И. Травкиным, Д.Р. Байбиковой, С.А. Алтынбаевым выполнена работа «Создание цифровой карты инженерно-геологического районирования в масштабе 1:10 000 для разработки генерального плана городского округа г. Уфа в Республике Башкортостан по архивным материалам, на основе актуализации инженерно-геологических карт территории г. Уфы, составленных в 1994–1997 гг. и в 1999 г.». В масштабе 1:10 000 составлены карты: проявлений опасных геологических и инженерно-геологических процессов, геолого-литологическая, геоморфологическая, гидрогеологическая, затопления и инженерно-геологического районирования. Площадь объекта составила 900 км².

Инженерно-геологическое районирование территории г. Уфы согласно отчету 2013 г. основано на трехуровневой системе таксонов: район – подрайон – участок.

Районы выделены по геоморфологическим условиям и обозначаются на карте римскими цифрами: I, II, III, ... – всего восемь районов.

Подрайоны – по геолого-генетическим признакам и обозначаются строчными буквами русского алфавита: а, б, в, ... – всего десять подрайонов.

Участки выделены по видам проявлений опасных геологических и инженерно-геологических процессов. Обозначаются арабскими цифрами (1, 2, 3, ... – всего шесть участков).

На рассматриваемой территории (рис. 5), сохраняя обозначения таксонов, принятых для карты г. Уфы, выделяются следующих шесть участков

инженерно-геологического районирования: Ии6; Пи1,3; Ши1; Ши1,4; Шд1,4; Vв1 (расшифровку знаков см. на рис. 5).

Рис. 5. Фрагмент карты инженерно-геологического районирования

По степени благоприятности для строительства рассматриваемый участок относится к территориям: «А» – неблагоприятной и «Б» – условно благоприятной.

К территории «А» (неблагоприятная по проявлениям опасных геологических и инженерно-геологических процессов – участки: Пи1,3; Ши1; Ши1,4; Шд1,4; Vв1) относятся: западная часть участка, нерасчлененная (I надпойменная и высокая пойменная) терраса, периодически затапливаемая высокими паводковыми водами р. Белой, крутой и очень крутой склон (с уклоном поверхности > 15°), овраги и карстовое поле. В зависимости от вида опасных процессов (карстовых, суффозионных, склоновых, флювиальных) и их проявлений, на территории «А» требуется принятие мер по инженерной защите.

Территория «Б» (условно благоприятная по проявлениям опасных геологических и инженерно-геологических процессов – участок – Ии6) занимает восточную часть участка, где строительство возможно без ограничений с мероприятиями инженерной защиты – конструктивными и профилактическими, которые назначаются после выполнения инженерно-геологических изысканий на более детальных стадиях проектирования.

Таким образом, на основании проведенных геолого-литологических, гидрогеологических и геоморфологических исследований, анализа гидрогеологических и геологических процессов выполнена оценка локального участка городской территории по благоприятности для строительства.

Установлено, что на рассматриваемой территории имеется зона, застройка которой возможна без ограничений при условии проведения мероприятий по инженерной защите.

Показано, как аналогичные принципы и приемы построения результирующей карты инженерно-геологического районирования локального участка ранее были реализованы при создании цифровой карты инженерно-геологического районирования для разработки генерального плана городского округа г. Уфа в Республике Башкортостан.

Список литературы

1. Карст Башкортостана / Р.Ф. Абдрахманов, В.И. Мартин, В.Г. Попов, А.П. Рождественский, А.И. Смирнов, А.И. Травкин. Уфа: Информреклама, 2002. 384 с.
2. СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89*».
3. СП 47.13330.2012 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96*».

D.R. Epifanova^{1,2}, A.I. Travkin³

¹RN-BashNIPIneft LLC, Ufa, epifanovadr@bnipi.rosneft.ru

²Moscow State (National Research) University of Civil Engineering, Moscow

³Moscow, anatoly_tra@mail.ru

HAZARDOUS GEOLOGICAL PROCESSES ON THE TERRITORY OF THE PROJECTED DEVELOPMENT IN THE SOUTHWESTERN PART OF UFA

Abstract. Ufa is one of the largest cities in Russia. Most of the population lives in the residential area, where there are practically no construction sites with favorable conditions in relation to the manifestations of hazardous geological and engineering-geological processes: karst, karst-suffusion and slope. These factors explain the importance of a particularly careful approach to engineering-geological studies of the territories planned for development. Engineering-geological basis for the development of the General plan of Ufa on a scale of 1:10 000, completed in the late XX – early XXI centuries. Based on archival materials, a set of synthetic maps was compiled for the estimated engineering-geological zoning of the city's territory. The study of engineering-geological conditions of the territory of Ufa is quite high, but uneven in area. All compiled maps are schematic. The publication examines the geological conditions and hazardous exogenous geological processes and phenomena of the site located in the southwestern part of Ufa, promising for multi-storey buildings.
Key words: exogenous processes; karst; suffusion; erosion; ravine; map; engineering-geological conditions; zoning.

Фрих-Хар А.Ю.¹, Терехина Я.Е.², Шабалин Н.В.¹

¹ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова»,
г. Москва, frikhkhar@gmail.com, nikolai.shabalin@marine-rc.ru

²МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики,
г. Москва, ya.terekhina@sc-lmsu.com

КАРТИРОВАНИЕ ПОДВОДНЫХ ЛАНДШАФТОВ ДЛЯ МОРСКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Аннотация. В зарубежной практике многих стран морское пространственное планирование стало необходимым инструментом при подготовке к использованию морского пространства. В России данное направление только начинает развиваться. Одна из важнейших стадий морского пространственного планирования – выделение и оценка природных ресурсов морских акваторий, составление карт природных ресурсов и уязвимости. В настоящей работе представлены результаты предварительного районирования территории исследуемого тестового полигона. Полученные результаты станут основой для формирования морского пространственного плана изучаемого района в локальном масштабе.

Ключевые слова: морское пространственное планирование; подводный ландшафт; многолучевое эхолотирование; гидролокация бокового обзора; сейсмоакустическое профилирование; пробоотбор; телеуправляемый необитаемый подводный аппарат (ТНПА).

Введение

В настоящее время роль океана в жизни человека стремительно возрастает. Человечество ориентировано на широкое и комплексное освоение морских природных ресурсов: биологических, нефтегазовых, минеральных, рекреационных и др. Расширение этой области деятельности неизбежно ведет к конфликту интересов различных морепользователей, повышению вероятности возникновения экологических рисков, появляется необходимость поиска и применения инструмента управления акваториями. Таким инструментом является морское пространственное планирование.

Морское пространственное планирование – это практический инструмент (процедура) определения путей наиболее эффективного распределения и использования морского пространства, а также установления механизма взаимодействия между пользователями этого пространства с целью достижения баланса между промышленным, социально-экономическим развитием и сохранением природы для данной акватории путем открытого обсуждения с привлечением всех заинтересованных сторон [2]. Основные задачи морского пространственного планирования – определение стратегических приоритетов развития рассматриваемого морского пространства и, таким образом, предупреждение возможных конфликтов между заинтересованными морепользователями, управление и сокращение экологических рисков.

По масштабу морское пространственное планирование принято разделять на макромасштаб, региональный и локальный масштабы, а по времени горизонт планирования распространяется на многие годы – десятки лет.

За рубежом морское пространственное планирование развивается с 1980-х гг. в ходе реализации Комплексного управления прибрежными зонами (КУПЗ), обозначаемого как Integrated Coastal Area and River Basin Managment (ICARM), или крупными экосистемами [1]. На сегодняшний день более 40 стран занимаются морским пространственным планированием КУПЗ (ICARM), принципы управления в каждой сформулированы по-своему. При этом в Евросоюзе директива в отношении морского пространственного планирования вступила в силу в 2014 г., а в марте 2021 г. была принята новая и утверждена дорожная карта развития морского пространственного планирования в Балтийском регионе до 2030 г.

В России до настоящего времени не принято в законодательных документах определение морского пространственного планирования и нет органов власти, ответственных за морское пространственное планирование. Однако Министерством экономического развития РФ сформированы Методические рекомендации по разработке прибрежно-морского компонента Стратегии социально-экономического развития приморского субъекта, а федеральный закон «О морском пространственном планировании» продолжительное время находится в стадии разработки. С ноября 2021 г. на рассмотрении у Экспертного совета Морской коллегии при Правительстве РФ находится первый проект дорожной карты продвижения морского пространственного планирования в РФ.

Одной из важнейших стадий морского пространственного планирования является выделение и оценка природных ресурсов морских акваторий, т.е. определение всех компонент трехмерной водной среды: толщи воды, придонного слоя, дна. П.Я. Бакланов в [1] определяет следующие основные принципы выделения пространственных морских природно-ресурсных систем.

1. Оценка пространственной дифференциации приповерхностных слоев акватории:

- по гидрофизическим характеристикам;
- по наличию природно-ресурсных компонентов, их свойств и связей.

2. Оценка пространственной дифференциации придонных слоев:

- по донным ландшафтам;
- по придонным природным ресурсам, их свойствам и связям.

3. Оценка пространственной дифференциации донных слоев:

- по типам донного рельефа;
- по сочетаниям донных природных ресурсов с их свойствами и связями.

4. Оценка пространственной дифференциации всего морского пространства по сочетанию признаков и ресурсов, выделение морских природно-ресурсных систем.

5. Привязка выделенных морских природно-ресурсных систем к ареалам прибрежной территории.

Долгое время в отечественной практике существовал единственный нормативный технический документ федерального значения по инженерным

изысканиям на шельфе – СП 11-114-2004 [4], но он не включал инженерно-экологические изыскания и не содержал специальных требований к изучению подводных ландшафтов. В 2021 г. были разработаны и утверждены СП 504.1325800.2021 [6] и СП 502.1325800.2021 [5], которые определяют общие требования при проектировании водных объектов, в т.ч. для морских нефтегазопромысловых сооружений. В новом СП 504.1325800.2021 [6] увязаны методы, средства получения информации и их анализ для разных задач в ходе проведения инженерных изысканий. В инженерно-экологических изысканиях впервые прописан анализ подводных ландшафтов, а их исследование возможно только при применении комплексных инженерно-геофизических, гидрографических, геологических методов. Подводный ландшафт в СП 504.1325800.2021 [6] определяется как «территориальный комплекс, однородный по происхождению, геологическому строению и рельефу, гидрохимическим и гидрометеорологическим условиям, сообществам живых организмов».

Полевые исследования

В период полевого сезона 2021 г. на тестовом полигоне «Крестовые острова» в Кандалакшском заливе Белого моря (рис. 1) компанией ООО «СПЛИТ» был выполнен перечень работ: многолучевое эхолотирование, гидролокация бокового обзора, акустическое профилирование, геологический пробоотбор, гидрологические измерения, подводная фото- и видеосъемка. Схема расположения профилей гидроакустических наблюдений и точек пробоотбора представлена на рис. 2. Методы исследований и обработки материалов описаны в публикации [7], представленной в материалах Общероссийской научно-практической конференции «Инженерно-экологические изыскания – нормативно-правовая база, современные методы и оборудование» в 2021 г.

Рис. 1. Расположения места проведения полевых исследований
на полигоне «Крестовые острова»

Рис. 2. Схема расположения профилей гидроакустических наблюдений и точек пробоотбора на тестовом полигоне «Крестовые острова»

Предварительные результаты полевых исследований

На основании данных, собранных в полевой сезон 2021 г. на тестовом полигоне «Крестовые острова» было проведено предварительное районирование территории с выделением абиотических компонент подводных ландшафтов (рис. 3). Проведен геоморфологический анализ, определено геологическое строение четвертичных отложений. По данным пробоотбора проведен литодинамический и литофациальный анализ. Выделено три района, характерных для фиардовых берегов Белого моря. На основе результатов районирования, на втором этапе исследований были выбраны точки для проведения подводных видеонаблюдений, целью проведения которых является съемка морского дна для определения видового состава и количественного учета донной фауны, характеристики подводных ландшафтов. На тестовом полигоне была проведена подводная маршрутная видеосъемка с применением телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА), по методике маршрутного учета донной фауны с помощью ТНПА [3]. В результате применения данной методики возможно получить количественные показатели плотности популяций отдельных видов донных живых объектов и данные для статистической обработки.

В настоящее время продолжается обработка и анализ собранных полевых материалов. По результатам планируется составление морфогенетической карты исследуемого полигона.

Рис. 3. Предварительное районирование территории тестового полигона «Крестовые острова». Обозначения: 1 – структурно-денудационные равнины прибрежного мелководья; 2 – структурно-денудационные склоны прибрежного мелководья; 3 – пологоволнистая морская аккумулятивно-денудационная равнина с грядами и холмами ледникового происхождения

На рис. 4 представлено предварительное схематичное зонирование территории тестового полигона «Крестовые острова» по основным выделенным типам хозяйственной деятельности.

- Условные обозначения
- Зона активного рыболовства
 - Размещение особо охраняемой природной территории
 - Территория проведения научно-исследовательских работ
 - Зона подводного туризма (дайвинг)
 - Зона активного туризма

Рис. 4. Предварительное районирование территории тестового полигона «Крестовые острова» по типам хозяйственной деятельности

Как видно из рис. 4, эти зоны пересекаются и места пересечений могут потенциально являться зонами конфликтов интересов различных морепользователей. В дальнейшем в результате обработки полученных полевых данных на основе морфогенетической карты исследуемого полигона, карты распространения донных сообществ, будет уточнено и детализировано зонирование территории по типам хозяйственной деятельности. Все собранные результаты станут основой для формирования морского пространственного плана исследуемой территории в его локальном масштабе, который сможет послужить примером локального морского пространственного планирования на арктическом шельфе России.

Список литературы

1. Бакланов П.Я. Морское пространственное планирование: теоретические аспекты // Балтийский регион. 2018. Т. 10. № 2. С. 76–85.
2. Михайлова Е. Процесс морского пространственного планирования в мире, странах Балтийского региона и России. Обзор практик применения. Изд-во Общественного Совета Южного Берега Финского Залива при ООО «Декомиссия», 2017. 17 с.
3. Мокиевский В.О. Подводная видеосъемка как метод количественного изучения бентоса // Материалы XIV Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований» (МСОИ-2015). М., 2015. Т. II. С. 311–315.
4. СП 11-114-2004 Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений.
5. СП 502.1325800.2021 Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие требования.
6. СП 504.1325800.2021 Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования.
7. Терехина Я.Е., Фрих-Хар А.Ю., Токарев М.Ю. Технологии картографирования арктических подводных ландшафтов // Материалы Общероссийской научно-практической конференции «Инженерно-экологические изыскания – нормативно-правовая база, современные методы и оборудование». М.: Геомаркетинг, 2021. С. 21–30.

A.Yu. Frikh-Khar¹, Ya.E. Terekhina², N.V. Shabalin¹

¹Lomonosov Moscow State University Marine Research Center LLC,
Moscow, frikhkhar@gmail.com, nikolai.shabalin@marine-rc.ru

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, ya.terekhina@sc-lmsu.com

UNDERWATER LANDSCAPE MAPPING FOR MARINE SPATIAL PLANNING

Abstract. In the foreign practice of many countries, marine spatial planning has become a necessary tool for planning the use of marine space. In Russia, marine spatial planning is just beginning to develop. One of the most important stages of marine spatial planning is the allocation and assessment of natural resources of marine areas, mapping of natural resources and vulnerability. This publication presents the results of preliminary zoning of the territory of the test site under study. The results of the work will become the basis for the formation of a marine spatial plan of the studied area on a local scale.

Key words: marine spatial planning; underwater landscape; multi-beam echo sounding; side-scan sonar; seismoacoustic profiling; sampling; remotely operated underwater vehicle (ROV).

Никитин С.Н.¹, Погребченко В.В.¹, Никитина И.А.², Никитин М.С.²

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, niksn@ifz.ru, pogr@ifz.ru

²МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет,
г. Москва, irinaannikitina@gmail.com, mikes.nikitin@gmail.com

ОЦЕНКА ЛОКАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ДЛЯ СООРУЖЕНИЙ НОРМАЛЬНОГО И ПОНИЖЕННОГО УРОВНЯ ОТВЕТСТВЕННОСТИ

Аннотация. В актуальных нормативных технических документах снижены требования к видам и объемам исследований локальных сейсмических условий в составе инженерных изысканий для инженерных сооружений нормального и пониженного уровня ответственности. К сожалению, это может привести к критическому снижению точности определения расчетных параметров сейсмической опасности и сейсмического воздействия. Предлагаются методические приемы для повышения качества и достоверности результатов исследований без значительного увеличения затрат на производство работ.

Ключевые слова: сейсмическое микрорайонирование; сооружения нормального и пониженного уровня ответственности; сейсмическое воздействие; сейсмические свойства; модель сейсмогрунтовых условий; геологическая модель.

Поводом для публикации послужило неудовлетворительное состояние нормативных требований для сооружений нормального и пониженного уровня ответственности.

В соответствии с СП 14.13330.2018 [15] в сейсмических районах проектирование, строительство и эксплуатация инженерных сооружений производятся с учетом сейсмических нагрузок. Для расчета сейсмических нагрузок необходимы значения параметров сейсмической опасности (интенсивность в баллах сейсмической шкалы) и сейсмического воздействия (энергетические, кинематические, спектральные, в соответствии с техническим заданием заказчика). Эти параметры являются результатом специальных инженерно-сейсмологических исследований, которые проводятся в составе инженерно-геологических изысканий, включающих определение исходной (нормативной) сейсмичности по картам общего сейсмического районирования (ОСР), уточнение исходной сейсмичности (УСО, ДСР, УИС) района, уточнение сейсмической опасности до масштаба объекта – сейсмическое микрорайонирование (СМР) и расчет параметров сейсмического воздействия.

В соответствии с п. 6.1.3 СП 47.13330.2016 [16] в составе инженерных изысканий в сейсмических районах предусмотрены «сейсмологические и сеймотектонические исследования, сейсмическое микрорайонирование (СМР)». Причем п. 6.3.1.2 предписывает «уточнение исходной сейсмичности (УИС) и сейсмическое микрорайонирование (СМР) для сейсмических районов» с учетом п. 6.3.3.14 на первом этапе подготовки проектной документации.

П. 6.3.3.14 обязывает в техническом отчете по результатам проведения инженерно-геологических изысканий приводить:

«– сведения об исходной сейсмичности (принимаемой по соответствующей карте ОСР, указанной в задании) для объектов пониженного и нормального уровней ответственности;

– результаты уточнения исходной сейсмичности (УИС) (при нормативной сейсмичности 6 и более баллов по действующей карте ОСР, указанной в задании) для объектов повышенного уровня ответственности. Результаты дополнительных исследований имеют приоритет по отношению к картам ОСР при определении исходной интенсивности сейсмических воздействий для данной категории сооружений, если они утверждены в установленном порядке;

– результаты работ по сейсмическому микрорайонированию (при нормативной сейсмичности 7 и более баллов по действующей карте ОСР, указанной в задании) в соответствии с требованиями СП 14.13330.2014 [14]. Если по результатам инженерно-геологических изысканий установлено, что площадка сложена грунтами III или IV категории по сейсмическим свойствам (таблица 1 СП 14.13330.2014 [14]), сейсмическое микрорайонирование выполняется и при нормативной сейсмичности 6 баллов;

– параметры сейсмических воздействий, соответствующие методам расчетов сейсмостойкости, применяемым при проектировании конкретного объекта и указанным в задании».

Итак, первая трудность, с которой специалисты сталкиваются на практике – это **определение уровня ответственности сооружения**. Результат данной процедуры определяет виды и объемы исследований, а в конечном счете их стоимость.

В соответствии со ст. 4 «Идентификация зданий и сооружений» № 384-ФЗ [20]:

«– п. 8. К зданиям и сооружениям повышенного уровня ответственности относятся здания и сооружения, отнесенные в соответствии с Градостроительным кодексом Российской Федерации к особо опасным, технически сложным или уникальным объектам.

– п. 9. К зданиям и сооружениям нормального уровня ответственности относятся все здания и сооружения, за исключением зданий и сооружений повышенного и пониженного уровней ответственности.

– п. 10. К зданиям и сооружениям пониженного уровня ответственности относятся здания и сооружения временного (сезонного) назначения, а также здания и сооружения вспомогательного использования, связанные с осуществлением строительства или реконструкции здания или сооружения либо расположенные на земельных участках, предоставленных для индивидуального жилищного строительства».

Получается, что к сооружениям нормального и пониженного уровня ответственности можно отнести все те, которые не «повышенной». А перечень сооружений повышенной ответственности приведен в ст. 48.1 «Особо опасные, технически сложные и уникальные объекты» № 190-ФЗ [19]. Но, к сожалению,

список весьма ограниченный и часто возникают трудности при идентификации уровня ответственности исследуемого объекта.

Следующая трудность, в значительной степени связанная с первой, – это **выбор карты ОСР** для определения нормативной сейсмичности. В соответствии с п. 4.3 СП 14.13330.2018 [15]:

– карта А ОСР-2015 предназначена для оценки нормативной сейсмичности района при проектировании объектов, приведенных в позициях 3 и 4 табл. 4.2 (рис. 1) СП 14.13330.2018 [15];

– заказчик вправе принять для проектирования объектов, приведенных в позиции 3 табл. 4.2 (см. рис. 1), карту В ОСР-2015 при соответствующем обосновании.

3	Другие здания и сооружения, не указанные в позициях 1 и 2	1,0	1,0
4	Здания и сооружения временного (сезонного) назначения, а также здания и сооружения вспомогательного применения, связанные с осуществлением строительства или реконструкции здания или сооружения либо расположенные на земельных участках, предоставленных для индивидуального жилищного строительства	0,8	—
Примечания 1 Заказчик по указаниям нормативных и ведомственных документов или по представлению генерального проектировщика относит сооружения по назначению к позиции таблицы 3.			

Рис. 1. Фрагмент табл. 4.2 СП 14.13330.2018 [15]

Но самым неприятным является п. 4.4 СП 14.13330.2018 [15].

Полный комплекс исследований локальных сейсмических условий включает:

1. *Определение нормативной сейсмичности района расположения объекта по картам ОСР.*

2. Определение (по картам ДСР, если есть) и/или уточнение исходной сейсмичности площадки с учетом региональных факторов **УСО/УИС (СП 286.1325800.2016 [18])**.

3. Определение (по картам СМР, если есть) и/или уточнение сейсмичности площадки до масштаба объекта с учетом локальных факторов.

3.1. Выявление, локализацию и анализ факторов, оказывающих существенное влияние на сейсмические условия объекта (сбор и анализ исходных данных для **СМР**):

– по архивным и справочным материалам;

– по результатам:

а) геодезических, гидрометеорологических, геологических, геотехнических исследований;

б) специальных (для **СМР**) инженерно-геологических и инженерно-геофизических, полевых и лабораторных исследований [4, 5];

в) моделирования объекта **СМР** (грунтовый массив + сооружение).

3.2. *Количественную оценку* влияния выявленных факторов на изменчивость сейсмических условий различными методами:

- инженерно-геологических аналогий (ИГМ);
- сейсмических жесткостей (МСЖ) РСН 65-87 [12];
- решения прямой задачи (МПЗ) СП 283.1325800.2016 [17];
- инструментальными: регистрации землетрясений, взрывов, микросейсм [12];
- расчетными (моделирование реакции грунтовой толщи на динамическое воздействие).

4. Определение *параметров сейсмического воздействия* (расчетная сейсмическая интенсивность, пиковые ускорения, акселерограммы и т.д.) в соответствии с нормативными требованиями и ТЗ.

5. Анализ и сопоставление полученных результатов, *представление их в виде технического отчета*.

Но для сооружений нормального и пониженного уровня ответственности комплекс СМР значительно сокращен.

В соответствии с п. 4.4 СП 14.13330.2018 [15]: «расчетную сейсмичность площадки строительства объектов, проектируемых по карте А ОСР-2015, при отсутствии карт СМР *следует определять* по таблице 4.1».

А в соответствии с п. 5.19 СП 14.13330.2018 [15] вообще: «*необходимость учета сейсмических воздействий при проектировании зданий и сооружений пониженного уровня ответственности*, разрушение которых не связано с гибелью людей, порчей ценного оборудования и не вызывает прекращения непрерывных производственных процессов (склады, крановые эстакады, небольшие мастерские и др.), а также временных зданий и сооружений *устанавливается заказчиком*».

Таким образом **для сооружений нормального и пониженного уровня ответственности не предусмотрены:**

- УСО/УИС;
- специальные полевые и лабораторные исследования сейсмических свойств грунтов;
- моделирование грунтового массива/основания сооружения для СМР;
- инструментальные и расчетные методы СМР.

В результате такого сокращения комплекса СМР **возможны погрешности:**

- на этапе определения нормативной сейсмичности по ОСР (в целочисленных баллах) до 0,5 балла по MSK-64;
- на этапе предварительного СМР при выборе эталонной толщи до 0,7 балла по MSK-64;
- при идентификации категории грунта по сейсмическим свойствам по табл. 4.1 до 1 балла по MSK-64;
- при приведении многослойной толщи к однослойной (примечание 2 к табл. 4.1) до 0,5 балла по MSK-64.

Почему нельзя использовать нормативную сейсмичность по карте ОСР в качестве исходной?

На рис. 2 представлена карта-схема уточненной сейсмичности большого мегаполиса с населением более миллиона человек, расположенного в зоне умеренной сейсмичности.

Рис. 2. Карта-схема уточненной сейсмической опасности по сетке 0,5×0,5 км без корректировки ЛДФ-модели (изосейсты через 0,05 балла, цвет изосейст соответствует периоду повторяемости в табл. 1)

Карта получена с использованием тех же линеаментно-доменно-фокальных (ЛДФ) моделей, что и в ОСР-97/2015, но со сгущением сетки с 25 до 0,5 км. Иными словами, можно сказать, что ОСР-2015 детализирована до масштаба СМР, но результатом СМР эта карта-схема, разумеется, не является, т.к. в ней не учтены локальные факторы.

В табл. 1 приведены значения нормативной и уточненной сейсмической опасности в баллах MSK-64 для разных периодов повторяемости для географического центра этого города (Центральная площадь). Верхняя цветная строка – это нормативная сейсмичность для всего населенного пункта по Приложению А СП 14.13330.2018 [15], а нижняя цветная строка – уточненная исходная сейсмичность для центра города.

Нетрудно увидеть существенные отличия. Город находится в зоне «полубаллов» для карт В и С, т.е. самое малое приращение сейсмичности по результатам СМР ($\pm 0,2$ балла) может, при вторичном округлении до целочисленного значения, перевести площадку в $\pm 1,0$ балл.

Таблица 1

Нормативная и уточненная сейсмичность для разных периодов повторяемости

Карта	A	B	C
Период повторяемости T , лет	500	1000	5000
Приложение А к СП 14.13330.2018	–	6	8
ОСР-2015, сетка 0,5×0,5 км	5,9	6,5	7,6

На рис. 3 приведено трех- и двумерное графическое представление ошибки двойного округления. Первое округление (для многих неосознанно) происходит при использовании нормативного целочисленного значения сейсмичности (по Приложению А) в качестве исходного. Погрешность может достигать 0,5 балла (половина младшего разряда шкалы). Второе округление происходит, когда к целочисленному значению исходной сейсмичности прибавляется приращение сейсмической интенсивности (в десятых долях), полученное по результатам СМР, а потом снова округляется до целочисленного значения при оценке расчетных сейсмических нагрузок п. 5.2.2 СП 14.13330.2018 [15]. Погрешность второго округления соизмерима с первым, но может немного превышать полбалла. Как видно на рис. 3, особенно критичны области значений исходной сейсмичности около «полубалла». Напрашивается безусловный вывод: целочисленное значение исходной сейсмичности использовать нельзя. Исходную сейсмичность нужно уточнять до десятых долей балла. А пиковые ускорения можно получить и из «дробных» баллов.

Рис. 3. Ошибка двойного округления. Графическое представление

Обоснованием УИС для площадок, расположенных вблизи границ «зон балльности», также является примечание к Приложению А СП 14.13330.2018 [15]:

«В связи с тем, что расчет карт ОСР-2015 проводился по сетке 25×25 км², оценка сейсмической опасности пунктов, расположенных на расстоянии до 30 км от границ между зонами балльности, должна уточняться (ДСР и т.п.) или они должны быть отнесены к более сейсмоопасной зоне».

Но как быть, когда УСО/УИС не предусмотрено в бюджете на инженерно-геологические изыскания на основании нормативных требований?

Уточненное (до десятой) значение исходной сейсмичности можно получить с использованием доступных программ и сервисов (EAST, OpenQuake Engine, R-CRISIS):

– без корректировки ЛДФ-моделей зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) и моделей сейсмического эффекта (как было показано выше);

– в соответствии с п. 8.2 СП 286.1325800.2016 [18] с использованием доступных каталогов (РАН, IRIS) и опубликованных палеосейсмологических и сеймотектонических данных.

Почему нельзя ограничиваться только инженерно-геологическим методом СМР, то есть использовать расчетную сейсмичность по табл. 4.1 СП 14.13330.2018 [15] в качестве окончательного результата?

В публикации 2017 г. [10] проводилось сравнение результатов СМР, полученных разными методами, причем для некоторых методов дополнительно использовались разные наборы исходных данных. Все методы «прогоняли» на одной тестовой модели сейсмогрунтовых условий (табл. 2), полученной в результате упрощения реальной модели линейного объекта.

Таблица 2

Тестовая модель сейсмогрунтовых условий

№ ИГЭ	Грунт	Плотность, г/см ³	Скорость поперечных волн V_s , м/с	Сейсмическая жесткость, (г/см ³)·(м/с)	Категория грунта по табл. 4.1 СП 14.13330.2018 [15]
1	Суглинок	1,70	200	340	III
2	Песок	1,85	500	925	II
3	Известняк	2,30	1200	2760	I

Структура модели изображена на рис. 4: модель двумерная, по вертикали – глубина, по горизонтали – номер пикета, разрез сложен грунтами, относящимися к разным категориям по сейсмическим свойствам по табл. 4.1 СП 14.13330.2018 [15].

Рис. 4. Тестовая двумерная модель сейсмогрунтовых условий

Некоторые результаты тех исследований, имеющих отношение к поднятому вопросу, представлены на рис. 5:

- красный график – это изменение сейсмической интенсивности по профилю, полученной инженерно-геологическим методом (ИГМ), т.е. по табл. 4.1 СП 14.13330.2018 [15];

- темно-синий график получен стандартным методом МСЖ по РСН [11, 12], а скорости по результатам полевых сейсмоакустических исследований [3];

- светло-синий график – тоже МСЖ, но значения скоростей взяты из табл. 4.1 СП 14.13330.2018 [15], минимальные для каждой категории.

Нетрудно видеть, что синие графики МСЖ дают приемлемый результат, независимо от точности определения скоростей (!), а ИГМ дает недопустимую погрешность между 11-м и 14-м пикетами.

Полученные результаты подтвердили необходимость комплексирования методов СМР, и сложившаяся практика работ подтверждает это.

В комплекс СМР для сооружений нормального и пониженного уровня ответственности следует включать методы, дающие удовлетворительный по точности и достоверности результат, исходные данные для которых можно получить даже при сокращенном бюджете.

Рекомендуемые методы:

- МСЖ => РСН 60-86 [11], РСН 65-87 [12];
- МПЗ => СП 283.1325800.2016 [17].

На практике, для объектов нормального и пониженного уровня ответственности, вполне обосновано использовать простейшие модели сейсмогрунтовых условий (инженерно-геологическая модель + скорости распространения поперечных волн V_s => СП 283.1325800.2016) [17].

Условные обозначения

Красный – ИГМ по СП 14.13330.2018 [15]

Темно-синий – МСЖ, по модели сейсмогрунтовых условий с учетом изменений сейсмических свойств по глубине, с учетом границ таксонов

Темно-зеленый – МСЖ, значения, округленные до целочисленного значения

Светло-синий – МСЖ+, консервативные значения скоростей V_s (минимальные по табл. 4.1 СП 14.13330.2018 [15])

Светло-зеленый – МСЖ+, значения, округленные до целочисленного значения

Рис. 5. Сравнение результатов СМР разными методами

Определять скоростные свойства грунтов с допустимой точностью можно:

- по архивным и справочным материалам [7, 13];
- с использованием корреляционных зависимостей инженерно-геологических и инженерно-геофизических параметров [1, 2, 8, 9] и др.;
- (!) в крайнем случае брать минимальные скорости V_s из табл. 4.1 СП 14.13330.2018 [15].

Пиковые кинематические параметры сейсмического воздействия можно определять с использованием:

- Приложения Б ГОСТ Р 57546-2017 [6];
- п. 8.3 СП 286.1325800.2016 [18];
- пп. 7.8–7.11 СП 283.1325800.2016 [17].

Выводы

1. Результат должен быть не только получен, но и обоснован!
2. Результат должен быть воспроизводим!
3. Точность и детальность результата должны соответствовать цели и бюджету!

Список литературы

1. Алешин А.С. Континуальная теория сейсмического микрорайонирования. М.: Научный мир, 2017. 300 с.
2. Бондарев В.И. О взаимосвязи сейсмических и физико-механических свойств песчано-глинистых грунтов // Геология и разведка. 1983. № 2. С. 84–91.
3. Горяинов Н.Н. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Недра, 1992. 260 с.
4. ГОСТ 20522-2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний.
5. ГОСТ 25100-2011 Грунты. Классификация.
6. ГОСТ Р 57546-2017 Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности.
7. Методическое пособие «Руководство по учету сейсмических воздействий при проектировании гидротехнических сооружений». М.: Минстрой России, 2016. 283 с.
8. Миндель И.Г. Методика сейсмоакустических исследований физико-механических свойств связных и малосвязных грунтов // Труды ПНИИИС. М.: Стройиздат, 1975. Т. 35. С. 3–25.
9. Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмики. М.: Изд-во Московского университета, 1981. 176 с.
10. Никитин С.Н., Погребченко В.В., Никитина И.А. Способ сейсмического микрорайонирования инженерно-геологическим методом // Инженерные изыскания. 2017. № 6–7. С. 118–135.
11. РСН 60-86 Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Нормы производства работ.
12. РСН 65-87 Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ.
13. Руководство по составлению региональных таблиц нормативных и расчетных показателей свойств грунтов. М.: Стройиздат, 1981. 55 с.
14. СП 14.13330.2014 Строительство в сейсмических районах (с изменениями от 23.11.2015).
15. СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*».
16. СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96*».

17. СП 283.1325800.2016 Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрорайонирования.
18. СП 286.1325800.2016 Объекты строительные повышенной ответственности. Правила детального сейсмического районирования.
19. Федеральный закон № 190-ФЗ от 29.12.2004 «Градостроительный кодекс Российской Федерации».
20. Федеральный закон № 384-ФЗ от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

S.N. Nikitin¹, V.V. Pogrebchenko¹, I.A. Nikitina², M.S. Nikitin²

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, niksn@ifz.ru, pogr@ifz.ru

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, irinaannikitina@gmail.com, mikes.nikitin@gmail.com

ASSESSMENT OF LOCAL SEISMIC CONDITIONS FOR STRUCTURES OF NORMAL AND REDUCED LIABILITY

Abstract. The standards reduce the requirements for research on local seismic conditions for structures of normal and reduced liability. Unfortunately, this could lead to a critical reduction in the accuracy of the calculated seismic hazard and seismic impact parameters. Methods are offered to improve the quality and reliability of research results without significantly increasing the cost of works.

Key words: seismic microzoning; structures of normal and reduced liability; seismic impact; seismic properties; model of seismic ground conditions; geological model.