СГУГиТ

СИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Учредитель федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Сибирский
государственный университет геосистем
и технологий» (СГУГиТ)

Вестник СГУГиТ

Научный журнал

Издается с 1996 г.

Выходит 4 раза в год

Том 25, № 4, 2020

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4

Главный редактор

Д. т. н., проф.

Карпик Александр Петрович

Заместители главного редактора:

Д. т. н., проф. Д. В. Лисицкий

Д. т. н., проф. Г. А. Уставич

Редакционная коллегия:

Д. т. н., проф. В. С. Айрапетян

Д. б. н. К. С. Байков

К. т. н., проф. Г. Гиенко (США)

Д. т. н., проф. С. Златанова

(Нидерланды)

Д. т. н., доц. А. В. Комиссаров

Д. т. н., проф. М. Конечны (Чехия)

Д. ф.-м. н., проф. С. М. Копейкин
(США)

Д. б. н., проф. Ю. В. Кравцов

К. ф.-м. н., доц. Е. Левин (США)

Д. т. н., проф. Е. М. Мазурова

Акад. РАН Н. П. Похиленко

Д. ф.-м. н., проф. О. А. Романовский

Д. т. н., проф. А. П. Сизов

Д. г. н., проф. В. С. Тикунов

Д. ф.-м. н., проф. В. Ю. Тимофеев

Д. т. н., проф. А. С. Толстиков

Д. т. н., проф. Л. К. Трубина

Д. т. н., доц. В. С. Хорошилов

Д. т. н., проф. Ю. В. Чугуй

Д. т. н., проф. Д. А. Шаповалов

Акад. РАН М. И. Эпов

Д. т. н., проф. Р. Ягер (Германия)

До 2015 г. журнал выходил
под названием «Вестник СГГА»

С 2017 г. нумерация журнала
включает номер тома
(порядковый номер года издания)
и номер выпуска в текущем году

© СГУГиТ, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОДЕЗИЯ И МАРКШЕЙДЕРИЯ

- Е. Г. Гиенко, С. А. Паршиков, Е. А. Бубирь.* Святилище «Храм времени» в Северной Хакасии: моделирование светотеневой картины5
- Р. П. Горбулин, А. И. Уваров.* Нормирование точности геодезических измерений и строительно-монтажных работ при возведении стальных резервуаров под нефтепродукты 19
- Н. Т. Кемербаев.* Геодезическая информация в системе автоматизированного технического обеспечения и ремонтов27
- И. Ю. Лакеев.* Исследование пространственного распределения гравитационного поля методом ограничения спектральных окон....37
- Хабиб Мазен Хатум, М. Г. Мустафин.* Проектирование и оценка геодезических наблюдений за деформациями обнажений выемки при строительстве станции метрополитена 45

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ

- М. А. Алтынцев, П. А. Карпик.* Создание метрической имитационной модели «цифрового двойника» активным методом дистанционного зондирования Земли.....58
- С. А. Арбузов, Е. П. Хлебникова, В. Н. Никитин.* Автоматизированная идентификация и определение породного состава древесных растений по материалам цифровой многозональной аэросъемки лесных массивов.....68
- В. В. Дедкова, А. В. Комиссаров.* Анализ методов и средств контроля защитных сооружений магистральных трубопроводов77
- Д. В. Долгополов.* Возможности использования беспилотных авиационных систем для контроля соответствия результатов строительства площадных объектов трубопроводного транспорта проектным решениям.....85
- А. В. Комиссаров, М. М. Шляхова, М. А. Алтынцев, Е. Н. Кулик.* Критерии контроля защитных сооружений магистральных трубопроводов96

КАРТОГРАФИЯ И ГЕОИНФОРМАТИКА

- И. А. Аникеева.* Факторы, критерии и требования к изобразительному качеству материалов аэрофотосъемки, получаемой для целей картографирования104
- А. П. Карпик, Д. В. Лисицкий, А. Г. Осипов, В. Н. Савиных.* Геоинформационно-когнитивная репрезентация территориальных ресурсов120

Журнал зарегистрирован
Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных тех-
нологий и массовых коммуникаций –
свидетельство ПИ № ФС 77-62654
от 10 августа 2015 г.

Журнал входит в Перечень
рецензируемых научных
изданий, в которых должны быть
опубликованы основные научные
результаты диссертаций
на соискание ученой степени
кандидата и доктора наук

Журнал включен
в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ)

**Подписные индексы
в каталогах:**
«Пресса России» – 43809
Электронный каталог
«Российская периодика»
(www.ideg.ru) – 43809э

Технический редактор журнала
А. В. Конева

Адрес редакции:
630108, Новосибирск,
ул. Плахотного, 10, к. 436
E-mail: vestnik@ssga.ru
Тел. (383)361-06-55
http://vestnik.ssga.ru

Перевод на английский язык
Д. В. Романова

Редактор
Е. К. Деханова

Компьютерная верстка
Н. Ю. Леоновой

Дата выхода в свет 10.12.2020.
Формат 60 × 84 1/8.
Усл. печ. л. 20,32.
Тираж 1 000 экз. Заказ 156.

Редакционно-издательский
отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск,
ул. Плахотного, 10.
Отпечатано в картопечатной
лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск,
ул. Плахотного, 8.

<i>А. А. Колесников, Д. В. Грищенко.</i> Возможности использования web-технологий для визуализации данных, получаемых с помощью активных методов дистанционного зондирования	130
<i>Л. К. Радченко.</i> Познавательный аспект в картографии	138
<i>Л. К. Трубина, О. Н. Николаева, Е. И. Баранова.</i> Использование картографических онлайн-сервисов для расширения профессиональных компетенций обучающихся по направлению «Науки о Земле»	146

ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО, КАДАСТР И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ

<i>Е. И. Аврунев, А. И. Гиниятов.</i> Концептуальный подход к геодезическому обеспечению 3D-кадастра	152
<i>Т. Т. Горбачева, Л. А. Иванова, А. В. Румянцева, В. В. Максимова.</i> Повышение биогенности техногрунтов при создании растительного покрова как способа консервации хвостохранилищ горнопромышленных отходов.....	159
<i>А. Ю. Мельничук, О. В. Закаличная.</i> Оценка экологической стабильности территории Симферопольского района Республики Крым.....	172
<i>Д. В. Пархоменко, А. В. Чернов, И. В. Пархоменко.</i> Применение геоинформационных технологий для создания охранных зон пунктов государственной геодезической основы	184
<i>Т. А. Соколова, В. Н. Москвин.</i> Корректирование результатов государственной кадастровой оценки земель населенных пунктов.....	193

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

<i>А. В. Лаптев, Г. В. Купцов, В. А. Петров, В. В. Петров.</i> Компенсация астигматизма в блоке временного расширения импульса канала накачки мощной лазерной системы	205
<i>Т. Н. Хацевич, Е. В. Дружкин, К. Д. Волкова.</i> Малогабаритные тепловизионные приборы со сменными характеристиками	213

МЕТРОЛОГИЯ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

<i>Н. А. Вихарева</i> Метрологическое обеспечение средств измерений добротности и индуктивности.....	221
<i>С. В. Савельяев</i> Универсальные коаксиально-полосковое и зондовое контактные устройства и способы их калибровки.....	229
<i>В. М. Тиссен, А. С. Толстиков, Г. В. Симонова.</i> Прогнозирование параметров вращения Земли с помощью адаптивных гармонических моделей.....	238

ЮБИЛЕЙНЫЕ ДАТЫ

Константину Федоровичу Афонину, кандидату технических наук, доценту кафедры космической и физической геодезии СГУГиТ – 75 лет	246
Борису Тимофеевичу Мазурову, доктору технических наук, профессору кафедры космической и физической геодезии СГУГиТ – 60 лет	247
Виктору Бруновичу Шлишевскому, известному ученому-оптику – 70 лет	248

Памяти Константина Михайловича Антоновича (1940–2020)

250

SSUGT

SIBERIAN STATE
UNIVERSITY OF GEOSYSTEMS
AND TECHNOLOGIES

Founder Federal State Budgetary
Educational Institution of Higher Education
"Siberian State University
of Geosystems and Technologies"

Vestnik SSUGT

Scientific journal
Published since 1996
Issued 4 times a year

Volume 25(4), 2020

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4

Editor-in-Chief:

D. Sc. (Eng.), Prof. Karpik A. P.

Depute Editor-in-Chief:

D. Sc. (Eng.), Prof. D. V. Lisitsky

D. Sc. (Eng.), Prof. G. A. Ustavich

Editorial team:

D. Sc. (Eng.), Prof. V. S. Ajrapetyan

D. Sc. (Biol.) K. S. Baikov

Ph. D. (Eng.), Prof. G. Gienko (USA)

D. Sc. (Eng.), Prof. S. Zlatanova
(Netherlands)

D. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.

A. V. Komissarov

D. Sc. (Eng.), Prof. M. Konečný
(Czech Republic)

D. Sc. (Phys.-Math.), Prof.

S. M. Kopeikin (USA)

D. Sc. (Biol.), Prof. Yu. V. Kravtsov

Ph. D. (Phys.-Math.), Assoc. Prof.

E. Levin (USA)

D. Sc. (Eng.), Prof. E. M. Mazurova

Member of RAS N. P. Pokhilenko

D. Sc. (Phys.-Math.), Prof.

O. A. Romanovskij

D. Sc. (Eng.), Prof. A. P. Sizov

D. Sc. (Geogr.), Prof. V. S. Tikunov

D. Sc. (Phys.-Math.), Prof.

V. Yu. Timofeev

D. Sc. (Eng.), Prof. A. S. Tolstikov

D. Sc. (Eng.), Prof. L. K. Trubina

D. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.

V. S. Horoshilov

D. Sc. (Eng.), Prof. Yu. V. Chugui

D. Sc. (Eng.), Prof. D. A. Shapovalov

Member of RAS M. I. Epov

D. Sc. (Eng.), Prof. R. Jäger (Germany)

Before 2015 journal

was published under the name
«Vestnik SSGA»

Starting from 2017 numbering of the
volume refers to the number of years
the journal has been circulated. The
number of the issue refers to how
many times the journal was published
during the year

© SSUGT, 2020

CONTENTS

GEODESY AND MINE SURVEY

- E. G. Gienko, S. A. Parshikov, E. A. Bubir.* Sanctuary "Temple of Time" in Northern Khakassia: Modeling Light-And-Shadow Picture5
- R. P. Gorbulin, A. I. Uvarov.* Normalization of Accuracy of Geodesic Measurements and Construction and Installation Works when Establishing Steel Reservoirs under Oil Products19
- N. T. Kemberbayev.* Geodetic Information in Automated System of Technical Support and Maintenance27
- I. Yu. Lakeev.* Study of Spatial Distribution of Earth Gravitational Field by Spectral Window Limiting Method37
- Habib Mazen Hatoum, M. G. Mustafin.* Methodology for Designing and Evaluating Results of Geodesic Observations of Engineering Structures Using the Least Square Method45

REMOTE SENSING, PHOTOGRAMMETRY

- M. A. Altyntsev, P. A. Karpik.* Creating Metric Simulated Model of a "Digital Twin" by the Active Earth Remote Sensing Method58
- S. A. Arbuzov, E. P. Khlebnikova, V. N. Nikitin.* Automated Identification and Determination of the Breed Composition of Wood by Materials of Digital Multispectral Aerial Survey of Forests68
- V. V. Dedkova, A. V. Komissarov.* Analysis of Methods and Means of Control of Main Pipelines' Protective Structures77
- D. V. Dolgoplov.* Possibilities of Using Unmanned Aircraft Systems to Control Compliance of Construction Results of Pipeline Transport Facilities with Design Solutions85
- A. V. Komissarov, M. M. Shlyahova, M. A. Altyntsev, E. N. Kulik.* Criteria for Protective Construction Monitoring of Main Pipelines96

CARTOGRAPHY AND GEOINFORMATICS

- I. A. Anikeeva.* Factors, Criteria and Requirements for Fine Quality of Aerial Imagery, Obtained for Mapping Purposes104
- A. P. Karpik, D. V. Lisitsky, A. G. Osipov, V. N. Savinykh.* Geoinformational-Cognitive Representation of Territorial Resources120

Registration certificate

The journal is registered in the Federal Service for Supervision of Communications Information Technology, and Mass Media – Certificate
PI No. 77-62654 of August 10, 2015

The journal is included in the List of refereed scientific journals, recommended by HAC for publishing the scientific results of dissertations in candidacy for a degree of Candidate or Doctor of Science degree

Journal included in Russian Science Citation Index (RSCI)

Subscription indexes in catalogues:

«Russian press» – 43809
Electronic catalogue
«Russian periodicals»
(www.ideg.ru) – 43809

Layout editor of journal

A. V. Koneva

Reduction address:

630108, Novosibirsk,
10 Plakhotnogo St., r. 436
E-mail: vestnik@snga.ru
Phone: (383)361-06-55
http://vestnik.snga.ru

English translation

D. V. Romanov

Editor

E. K. Dehanova

Desktop publishing

N. Yu. Leonova

Issue data 10.12.2020.
Format 60 × 84 1/8.
Conv. pr. sheets 20,32.
Circulation 1 000 copies.
Order 156.

Printing and publication
department SSUGT
630108, Novosibirsk,
10 Plakhotnogo St.

Printed in map printing
laboratory SSUGT

630108, Novosibirsk,
8 Plakhotnogo St.

<i>A. A. Kolesnikov, D. V. Grishchenko.</i> Possibilities of Using Web-Technologies for Visualization of Data of Active Methods of Remote Sensing	130
<i>L. K. Radchenko.</i> Cognitive Aspect in Cartography	138
<i>L. K. Trubina, O. N. Nikolaeva, Y. I. Baranova.</i> The Usage of Online Map Services in Expanding of Professional Skills when Training in Earth Science.....	146

LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING

<i>E. I. Avruney, A. I. Giniyatov.</i> Conceptual Approach to Geodetic Support for 3d Cadastre	152
<i>T. T. Gorbacheva, L. A. Ivanova, A. V. Rumyantseva, V. V. Maksimova.</i> Increasing the Biogenicity of Technical Soils when Creating Vegetation Cover as a Method of Conservation Tailing Dumps for Mining Waste.....	159
<i>A. Y. Melnichuk, O. V. Zakalichnaya.</i> Evaluation of Ecological Stability of the Territory of Simferopol District of the Republic of Crimea	172
<i>D. V. Parkhomenko, A. V. Chernov, I. V. Parkhomenko.</i> Use of Gis Possibilities for Creation of Network Protection Zones.....	184
<i>T. A. Sokolova, V. N. Moskvina.</i> Correcting the State Cadastral Assessment Results of Local Residential Lands.....	193

OPTICAL AND ELECTRONIC DEVICES AND COMPLEXES

<i>A. V. Laptev, G. V. Kuptsov, V. A. Petrov, V. V. Petrov.</i> Astigmatism Compensation in Block of Temporal Broadening of Pulse for Pump Channel of High Power Laser System	205
<i>T. N. Khatsevich, E. V. Druzhkin, K. D. Volkova.</i> Handheld Thermal Vision Devices with Variable Characteristics	213

METROLOGY AND METROLOGICAL SUPPORT

<i>N. A. Vikhareva.</i> Metrological Support Means of Measurements of Q Factor and Inductivity	221
<i>S. V. Savelkaev.</i> Universal Coaxial-Stripline and Probe Test Fixtures and Their Calibration Methods	229
<i>V. M. Thyssen, A. A. Tolstikov, G. V. Simonova.</i> Prediction of Earth Rotation Parameters with Using Adaptive Harmonic Patterns	238

ANNIVERSARIES

To the 75-th Anniversary of Konstantin Fedorovich Afonin, Candidate of Technical Sciences, Docent of Space and Physical Geodesy Department, SSUGT.....	246
To the 60-th Anniversary of Boris Timofeevich Mazurov, Doctor of Technical Science, Professor of Space and Physical Geodesy Department, SSUGT	247
To the 70-th Anniversary of Viktor Brunovich Shlishevskij, Famous Siberian Scientist-Opticist.....	248

<i>In Memory of Konstantin Mikhailovich Antonovich (1940–2020).....</i>	250
---	-----

УДК [004.9:7.017.2]+291(571.513)
DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-5-18

СВЯТИЛИЩЕ «ХРАМ ВРЕМЕНИ» В СЕВЕРНОЙ ХАКАСИИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОТТЕНЕВОЙ КАРТИНЫ

Елена Геннадьевна Гиенко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии, e-mail: elenagienko@yandex.ru

Сергей Анатольевич Паршиков

НП «Экологический центр рационального освоения природных ресурсов» (НП ЭЦ РОПР), 660049, Россия, г. Красноярск, проспект Мира, 53, научный сотрудник, e-mail: srgkrs@mail.ru

Елизавета Александровна Бубирь

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, магистрант, тел. (984)295-05-15, e-mail: gkjslk@mail.ru

Приводятся результаты изучения археологического памятника Тагарской культуры (VIII–III вв. до н. э.) «Храм времени», расположенного в Северной Хакасии. Основной целью исследования являлось получение естественно-научных доказательств календарной значимости памятника, а также того, что его сооружение было выполнено в соответствии со светотеневой картиной во время восходов и заходов Солнца в равноденствия и зимнее солнцестояние. Для моделирования годичной освещенности памятника Солнцем были произведены ориентирование по азимуту, геодезические измерения, астрономические расчеты. Кроме того, с целью уточнения деталей, была применена имитация солнечного луча лазерным лучом тахеометра. Подтвердить результаты моделирования удалось с помощью непосредственных наблюдений в дни осеннего равноденствия и зимнего солнцестояния, когда было выполнено фотографирование с фиксацией моментов съемки для последующих астрономических расчетов. В результате обоснована важность астрономических методов исследования и непосредственных наблюдений в астрономически значимые дни года при изучении подобных археологических объектов. С помощью астрономических расчетов доказано, что светотеневая картина, наблюдаемая на памятнике в современное время, практически тождественна светотеневой картине в Тагарскую эпоху. Внесены предложения по использованию лазерного сканирования для моделирования светотеневой картины. Памятник «Храм времени» является уникальным объектом, представляет собой сложное пространственное построение в соответствии с освещенностью в астрономически значимые дни года. Направление основной оси памятника на восходящее Солнце в зимнее солнцестояние выполнено с погрешностью не более 1°, что свидетельствует о том, что древние строители памятника хорошо знали астрономические даты и решали прямую задачу путем непосредственных наблюдений за Солнцем. Измерения, расчеты, проведенное моделирование и натурные наблюдения подтвердили предположения о его календарной значимости открывателя памятника, д. и. н. В. Е. Ларичева.

Ключевые слова: астроархеология, календаристика, дни солнцестояний и равноденствий, астрономические и геодезические методы в археологии, светотеневая картина, лазерное сканирование, 3D-моделирование

Введение

Изучение динамики светотеневой картины, ее моделирование и непосредственное наблюдение в астрономически значимые дни года позволяет глубже понять назначение и функционирование археологических памятников, связанных со счислением времени и проведением культовых обрядов.

Использование светотеневой картины, возникающей при освещении древних памятников Солнцем в дни солнцестояний и равноденствий, с целью ведения календарей, а также для проведения соответствующих ритуалов, было широко распространено территориально и по времени.

Один из наиболее известных древнейших археологических памятников – курган Нью Грейндж (XXV в. до н. э.), где раз в году в зимнее солнцестояние лучи восходящего Солнца в течение 17 минут освещают центральную камеру, расположенную в конце 19 метрового коридора, ориентированного на юго-восток [1]. В храме бога Солнца Амона-Ра в Карнаке (XVI в. до н. э.), согласно описаниям Локьера [2], внутреннее святилище освещалось лишь в летнее солнцестояние при заходе Солнца.

Другой пример – пирамида Кукулькана в городе Чичен-Ица, Мексика (V в. н. э.) [3], где ежегодно в дни осеннего и весеннего равноденствий можно наблюдать явление, связанное с игрой теней. Здесь можно наблюдать светотеневое изображение «Пернатого змея», когда при восходе Солнца тени от больших ступеней медленно сползают вниз к основанию, где располагаются головы рептилий. В пещеру Риско-Кайдо (Канарские о-ва, Испания, культура I–XV вв. н. э.), включенную в мировое культурное наследие в 2019 г. [4], лучи света попадают в летнее время только после весеннего равноденствия, и по солнечным зайчикам, перемещающимся по стенам, можно определять время суток и время года [5]. Описание ряда подобных археологических памятников, выполненных с учетом их освещенности солнечным светом в астрономически значимые дни солнцестояний и равноденствий, приведено в [6] и [7]. Отображение в петроглифах направлений на заходящие Солнце и Луну отмечается в [8]. Авторами наблюда-

лась характерная светотеневая картина на памятниках Хакасии эпохи бронзы [9] и Горного Алтая [10, 11]. В статье [12], посвященной методике и методологии комплексных исследований древних мегалитических объектов в Сибири, рекомендуется обращать внимание на освещенность сакральных мегалитических объектов в астрономически значимые дни года.

Цель статьи и ограничение по объему не позволяют дать полный обзор подобных светотеневых эффектов, связанных с древними культами и ведением календаря, поэтому ограничимся предметом исследования.

Предмет исследования

Рассматриваемый в статье памятник расположен на западном склоне горного массива Грудь-гора на левом берегу реки Черной, недалеко от впадения ее в реку Белый Июс [13]. По ряду признаков объект относится к Тагарской археологической культуре (VIII–III в. до н. э.) [13, 14].

Памятник, открытый д. и. н. В. Е. Ларичевым в 2000 г., представляет собой небольшую скальную нишу, неглубокая полость которой создана путем извлечения блоков из расслоившегося пласта песчаника (рис. 1).

Рис. 1. Храм времени.
Фото С. А. Паршикова [15]

На полу ниши лежит прямоугольный блок песчаника, а сверху – массивная плита, образующая козырек и расположенная таким об-

разом, что внутреннее пространство ниши остается в летнее время в тени. Вход памятника обращен на юг (азимут центральной оси 173°). Ниша может вместить только одного человека в сидячем положении. Правая внутренняя стенка ниши, образованная скальным выступом, была подвергнута ее создателями обработке, в результате чего в верхней части внутреннего скального выступа образовалась слегка вогнутая плоскость с острым ребром по западному краю, развернутая в сторону юго-запада. Скалывание правого внутреннего выступа было выполнено и со стороны входа, вследствие чего на вертикальной стенке выступа, обращенной ко входу в нишу, появились острые ребра, разделенные небольшого размера кавернами.

На западном ребре внутреннего скального выступа ниши и на западном ребре покрывающей пол плиты имеется несколько рядов хорошо сохранившихся насечек (про-

пилов) (рис. 2, насечки *a–e*), а также гравированных нарезок (рис. 2, насечки *ж*).

Ряд с насечками (рис. 2, насечки *a–d*), образующий знаковую (и календарную систему), изображен на рис. 3.

Рис. 2. Внутреннее пространство Храма времени. Рисунок В. И. Жалковского [13]

Рис. 3. Ряд с насечками. Рисунок В. И. Жалковского [13]

В. Е. Ларичевым в 2004 г. была предложена расшифровка последовательностей насечек как календарной системы и высказана идея об особенностях освещенности памятника в астрономически значимые дни года. Подробное описание, анализ и оценка данных знаковых записей выполнены им в статье [13].

Методы исследования

Основная задача исследования заключалась в реконструкции освещения Солнцем

внутренней камеры в течение года, поскольку в летнее (экспедиционное) время она постоянно находится в тени. Для расчетов следовало определить точную ориентировку всего памятника и его деталей по сторонам света, а также найти связь памятника с основными астрономическими ориентирами.

Астроархеологические изыскания производились в летних полевых экспедициях 2009–2010 гг. Было выполнено определение географических координат с помощью ГНСС-навигатора и получен астрономический азимут начального направления на далекий ори-

ентир по наблюдениям Солнца, произведены горизонтная съемка от площадки перед нишей и соответствующие вычисления с целью установления мест восхода и захода Солнца и Луны в астрономически значимые дни солнцестояний и равноденствий.

Моделирование сезонной освещенности внутренней камеры памятника с требуемой точностью (1 угловая минута [16]) оказалось нетривиальной задачей, поскольку измерения внутри ниши с угломерным инструментом были невозможны из-за ее малых размеров. Определение направления основного скального ребра с насечками было выполнено с помощью обратного азимута, путем измерения угла от начального направления, $148 \pm 0,5^\circ$. Лазерной рулеткой были измерены габариты камеры, а электронным наклономером – наклоны образующих ее внутренних плоскостей. Кроме того, с помощью электронного тахеометра было выполнено «псевдосканирование» внутренней камеры – измерено «облако точек» для дальнейшего пространственного моделирования. Описание технологии подобного сканирования для изучения плоскостей с петроглифами приведено в [17, 18].

Для определения даты, когда луч восходящего Солнца попадает внутрь камеры впер-

вые в году и освещает первую насечку, расположенную на ребре (см. рис. 3, крайняя правая насечка в ряду а), был симитирован солнечный луч с помощью лазера электронного тахеометра в режиме измерения расстояния и измерены его горизонтальные и вертикальные направления (азимут A и высота h), рис. 4, а. По результатам измерений было вычислено склонение δ соответствующей суточной параллели и определена дата первого попадания солнечного луча на крайнюю насечку,

$$\delta = \arcsin(\sin \delta \cdot \sin \varphi - \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos A), \quad (1)$$

где высота h исправлена за вертикальную рефракцию и суточный параллакс; расчеты сделаны для центра диска Солнца. Вычисленное по показаниям тахеометра ($h = 17^\circ$, $A = 294^\circ 24,2'$) склонение Солнца близко к нулю ($0^\circ 33,5'$) и соответствует дате, близкой к равноденствию.

В итоге были измерены все возможные направления, наблюдаемые из камеры как в пределах входа в нее, так и через проемы с восточной и западной стороны, и смоделирована освещенность камеры в течение года. Результаты моделирования освещенности камеры опубликованы в [19].

Рис. 4. Первый луч Солнца в весеннее равноденствие:

а) моделирование с помощью лазерного луча тахеометра (фото Е. Г. Гиенко); б) натурные наблюдения 24.09.16, 2-й день после равноденствия, освещены 2-я, 3-я насечки (равноденствие – 22.09.16) (фото С. А. Паршикова)

По результатам расчетов были определены астрономически важные даты, связанные с функционированием памятника: осеннее равноденствие (когда впервые в году солнечный луч попадает в нишу на крайнюю к выходу насечку); зимнее солнцестояние (Солнце находится на минимальной высоте, освещаются все насечки и примерно 75 % задней стенки, вечером лучи заходящего солнца проникают внутрь ниши через западный проем и освещают еще раз всю восточную стенку и все насечки на ребре); весеннее равноденствие (последнее в году появление лучей Солнца внутри памятника на крайней насечке). Летнее Солнце, проходящее высоко над горизонтом, никогда не освещает внутреннее пространство ниши.

Натурные наблюдения в осеннее равноденствие и зимнее солнцестояние

Результаты моделирования были подтверждены непосредственными наблюдениями освещенности памятника при восходе Солнца в день осеннего равноденствия в 2016 г. [15]. В этот день был зафиксирован момент освещения первой насечки восходящим солнцем (рис. 4, б), и получены доказательства правильности теоретических расчетов, моделирования и календарного назначения памятника.

20.12.17 были выполнены непосредственные наблюдения освещенности памятника

и фотографическая съемка в течение светового дня, от восхода до захода Солнца в день зимнего солнцестояния. На рис. 5 и 6 показан момент появления первого луча восходящего Солнца на памятнике. Отчетливо освещена «голова» змееподобного солнцеголового существа (дракона?), выглядывающего из ниши (см. рис. 5), виден его язык и, как жемчужные четки, освещенные солнцем насечки (см. рис. 6). Следует отметить, что при наблюдении невооруженным глазом ниша выглядит темнее, а освещенные детали кажутся контрастнее, чем на фотографии с автоматической подстройкой освещенности.

Ближе к полудню Солнце осветило заднюю стенку ниши: там выделяются области «скального загара» (примерно три четверти) и более рыхлая полоса с белым налетом, которая никогда не освещается Солнцем, в таком же соотношении (75 %), что было смоделировано по результатам летних экспедиционных измерений. Заход зимнего Солнца при наблюдении от Храма произошел в расчетном направлении над горой Солбон, и при последних лучах задняя фронтальная плоскость ниши ушла в тень, но при этом полностью осветилась полочка с насечками («тело» дракона). Таким образом, предварительные астрономические расчеты и моделирование освещенности памятника в зимнее солнцестояние были полностью подтверждены натурными наблюдениями.

Рис. 5. Первый луч Солнца в зимнее солнцестояние 20.12.2017. Анфас. Фото Н. В. Радюк:
а) общий вид; б) увеличенный фрагмент

Рис. 6. Первый луч Солнца в зимнее солнцестояние 20.12.2017. Профиль. Фото Н. В. Радюк:
а) общий вид; б) увеличенный фрагмент

Непосредственные наблюдения и фотофиксация предоставили детали, которые практически невозможно смоделировать. «Голову» дракона изображает овальное кольцо из насечек, с небольшой линзообразной вогнутостью внутри. Как доказали наблюдения, вогнутость была сделана намеренно, для достижения вида солнцеподобной «головы» дракона при восходе зимнего Солнца, когда его лучи отражаются от вогнутой линзы «головы» дракона. С плоской или выпуклой серединой «головы» дракона картина была бы другая. Угол, под которым вырезан «язык» дракона, очевидно, также подбирался для наилучшей освещенности его зимним Солнцем и эффектного изображения мифического существа. Подобным образом, выпукло, сделано «тело» дракона с насечками; при освещении зимним солнцем оно наблюдается как зубчатый гребень по краю каменной полочки.

Таким образом, можно сделать вывод, что светотеневая картина на Храме времени в равноденствия и, особенно, в зимнее солнцестояние, выстраивалась создателями памятника таким образом, чтобы запечатлеть миф о борьбе добра (Солнца) и зла (дракона), и связать это с сезонными изменениями. Непосредственные наблюдения и астрономические расчеты дали

основания расшифровать семантику календарного мифа носителей тагарской культуры, не имевших письменности.

Изменения светотеневой картины со временем

Обстоятельства наблюдения светотеневой картины в равноденствия не зависят от эпохи, поскольку склонение равноденственного Солнца всегда равно нулю. В солнцестояния склонение Солнца равно наклону эклиптики к экватору, который медленно с долгим периодом изменяется вследствие прецессии от планет (примерно $\pm 0,5^\circ$ с периодом около 60 000 лет). Следовательно, современная светотеневая картина в зимнее солнцестояние будет отличаться от наблюдаемой в эпоху создания и функционирования памятника. Сделаем оценку этих изменений, для чего рассчитаем соответствующие направления на Солнце в 700 г. до н. э. (эпоха расцвета Тагарской археологической культуры [14]). Кроме того, рассчитаем, насколько изменяются обстоятельства освещения памятника в течение нескольких дней солнцеворота.

Для расчетов воспользуемся дифференциальными формулами, выведенными в [20]:

$$\begin{aligned} \partial \delta / \partial A &= -\cos h \cdot \cos \varphi \cdot \sin A / \cos \delta; \\ \partial \delta / \partial h &= (\cos h \cdot \sin \varphi - \sin h \cdot \cos \varphi \cdot \cos A) / \cos \delta, \end{aligned} \quad (2)$$

где h , A – высота Солнца и азимут направления на Солнце соответственно;

φ – географическая широта точки наблюдения;

δ – склонение Солнца.

$$\begin{aligned}\Delta A &= -(\Delta\delta \cdot \cos \delta) / (\cos h \cdot \cos \varphi \cdot \sin A); \\ \Delta h &= (\Delta\delta \cdot \cos \delta) / (\cos h \cdot \sin \varphi - \sin h \cdot \cos \varphi \cdot \cos A).\end{aligned}\quad (3)$$

Исходные данные для расчетов:

– географические координаты памятника, широта и долгота $\varphi = 54,725^\circ$, $\lambda = 89,715^\circ$;

– момент зимнего солнцестояния – 21.12.17, 23 ч 28 мин местного времени (UTC+7);

– момент фотографирования, определенный по встроенному в фотоаппарат ГНСС-навигатору, – 20.12.17, 10 ч 39 мин 18 с местного времени (UTC+7);

– горизонтальные координаты Солнца в момент фотографирования освещения памятника (рис. 5), рассчитанные для географической широты точки наблюдения по программе StarCalc [21] – $h = 6,5^\circ$, $A = 148,172^\circ$;

– склонения Солнца:

на момент фотографирования $\delta = -23^\circ 25,5'$;

в момент зимнего солнцестояния 2017 г.

$\delta = -23^\circ 26,1'$;

за трое суток до момента зимнего солнцестояния $\delta = -23^\circ 24,8'$;

в момент зимнего солнцестояния в 700 г. до н. э. $\delta = -23^\circ 46,9'$.

Расчеты изменений светотеневой картины, выраженные в изменениях азимута и высоты восходящего зимнего Солнца, формула (3), приведены в таблице.

Результаты расчетов изменения освещенности памятника

Разница координат	Разность по времени наблюдения	
	3 суток	2 717 лет
Склонение $\Delta\delta$, '	1,3	20,8
Азимут ΔA , '	4,0	63,0
Высота Δh , '	1,4	22,0

Следует отметить, что расчеты по дифференциальным формулам (3) совпали с расчетами непосредственных разностей координат по программе StarCalc [21].

Заменяя в (2) дифференциалы конечными разностями, получим выражения для изменений в азимуте ΔA и высоте Δh , обусловленные изменением склонения $\Delta\delta$:

По приведенным в таблице результатам можно сделать вывод, что в течение трех суток до и после зимнего солнцестояния направления на восходящее Солнце практически не меняются, и светотеневую картину, приведенную на фотографии от 20.12.17, можно считать идентичной дню зимнего солнцестояния (21.12.17 была пасмурная погода).

В таблице показано малое изменение наклона эклиптики к экватору в течение длительного промежутка времени (на величину меньше углового диаметра Солнца, $32'$). Тем не менее, для заданных условий изменения горизонтального направления восходящего Солнца превышают по величине один градус. Сделаем оценку влияния этого изменения на вид освещенности. При ширине насечки 2 см и длине первой части гребня («тела» дракона) 45 см разница в горизонтальном направлении при освещенности насечек может быть $\pm 1,2^\circ$. Таким образом, изменение в азимуте направления на Солнце, вызванное разницей эпох наблюдения, попадает в доверительный интервал, определяемый шириной насечек и длиной ребра, и практически не изменяет вид светотеневой картины в зимнее солнцестояние за промежуток времени от эпохи функционирования памятника.

Ряд с насечками

Ряд с насечками («тело» дракона) (рис. 3) можно разделить на две части по ориентации в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Внешняя, южная часть ряда. По фотографии, сделанной с установленного по отвесной линии штатива, можно сделать примерную оценку наклона к горизонту внешней части (см. рис. 6) ряда с насечками. Полученный результат $7-8^\circ$ близок к вычисленной высоте Солнца на момент фотографирования ($6,5^\circ$).

Азимут направления на Солнце, вычисленный по времени фотографирования ($148,172^\circ$), практически совпадает с полученными ранее результатами (148°). Отсюда можно сделать вывод, что направление внешней части ряда с насечками совпадает с направлением на восходящее зимнее Солнце с погрешностью не более 1° , то есть ряд с насечками наме-

ренно выстраивался по лучу восходящего зимнего Солнца, что является уникальной особенностью сооружения.

Вторая часть «тела» дракона на изломе ребра каменного блока начинается через 48–50 насечек от «головы» дракона, развернута по азимуту (рис. 7) и выровнена по горизонту.

Рис. 7. Схематичное изображение основных направлений Храма времени:

а) направление на заход зимнего Солнца $A = 224^\circ$, $h = 0^\circ$; б) внутренняя часть ряда, 48 см, $A = 190^\circ$; в) внешняя часть ряда, 48 см, $A = 148^\circ$; г) первая насечка на ряде и «голова» дракона; д) направление на восход равноденственного Солнца $A = 294^\circ$, $h = 17^\circ$; е) направление на восход зимнего Солнца $A = 148^\circ$, $h = 7^\circ$

В. Е. Ларичев в статье [13] привел расшифровку всех знаковых записей, показанных на рис. 3, как календарной системы, в основе которой солнечные, лунные циклы и период Венеры.

С точки зрения проведенных наблюдений в осеннее равноденствие и в зимнее солнцестояние можно внести следующие предложения по расшифровке основной части последовательности насечек (рис. 3, а). Всего она содержит 92 соприкасающихся насечки, далее, через интервал еще две, и далее пять несоприкасающихся между собой насечек образуют отдельную группу.

В 700 г. до н. э. между осенним равноденствием и зимним солнцестоянием было 88 суток, а между зимним солнцестоянием и весенним равноденствием — 91 сутки (расчеты по программе StarCalc). Гипотеза о нанесении насечек от осеннего равноденствия до зимнего солнцестояния по отметке светового луча восходящего Солнца не может быть при-

нята, поскольку в период зимнего солнцестояния расстояние между насечками должно быть существенно меньше, чем в дни, близкие к равноденствию, даже если принять во внимание разворот ребра. Вследствие этого возможно, что насечки наносились в качестве счета дней между зимним солнцестоянием и весенним равноденствием. И годовой цикл начинался в зимнее солнцестояние.

Назначение оставшихся семи насечек, с точки зрения освещенности памятника Солнцем, пока не ясно.

Новые методы исследований. 3D-модель и лазерное сканирование

При исследовании освещенности памятника, кроме классических геодезических и астрономических методов, были успешно применены работа с фотофиксацией (привязка по времени, ориентирование в пространстве), имитация светового луча лазер-

ным лучом тахеометра. Доказана важность натурных наблюдений в астрономически значимые дни года.

Было показано, что смоделировать освещенность памятника и уточнить детали его функционирования в течение полугода от осеннего до весеннего равноденствия можно при наличии точной 3D-модели. В настоящее время при использовании методов полевой 3D-фиксации в археологии активно используются две альтернативные технологии – трехмерное сканирование и наземная фотограмметрия, демонстрирующие прекрасные результаты в сотнях научных проектов по всему миру [22]. О реалиях, проблемах и перспективах использования данных технологий в практике российской археологии подробно рассказывается в статье [23], где отмечается, что сегодня достигнуто предельное качество полевой фиксации, к которому археологи стремились с XIX в. Теперь есть возможность создавать реалистичные трехмерные копии археологического объекта. При этом устраняется неизбежная при всех других типах фиксации субъективность, так как сохраняются пространственные взаимоотношения всех элементов объекта. По сути, создается цифровой архив процесса и результатов исследований, обеспечивающий возможность неограниченного количества обращений и изучения любых пространственных взаимоотношений.

Результаты исследования технологии создания высокоточных 3D-моделей памятников комбинированным методом с использованием фото-, стереосъемки и лазерного сканирования приведены в [24]. Для изучения Храма времени такой комбинированный метод будет наиболее подходящим.

Из существующих инструментов для создания пространственной модели Храма времени нами предлагается использовать ручной лазерный сканер, предназначенный для сканирования объектов малых форм, имеющий высокую точность измерений и возможность съемки различных полостей (пещер, гротов и т. п.) [25].

Для моделирования естественной освещенности памятника в течение суток и года необходимо точно знать местоположение (по ГНСС-измерениям) и ориентацию в про-

странстве по астрономическому азимуту. Из всех методов пространственного ориентирования полученной 3D-модели можно предложить следующие:

- использовать 3D-сканер со встроенным компасом. Точность определения азимута электронным компасом может достигать $0,1^\circ \approx 6'$, что для решаемых задач вполне достаточно;

- использовать реперные метки, ориентирование в пространстве которых определено по светотеневой картине (фотофиксация, направление тени, точное время фотографирования, астрономические расчеты направления на Солнце в это время) [11, 26].

Вместе с ориентированием памятника в пространстве необходимо выполнять геодезическую съемку горизонта, чтобы корректно рассчитывать направления на восходящее и заходящее Солнце. Так, вследствие местоположения Храма времени в логу на склоне горы, восход Солнца в равноденствия здесь происходит при высоте 17° над горизонтом, а восход зимнего Солнца – при высоте $6,5^\circ$.

Уточнить пространственное разрешение модели можно посредством метода внешнего механического слежения. Данный способ зачастую принимает форму лазерного трекера со встроенной камерой (для определения ориентации сканера) и точностью $\pm 0,06$ мм. Кроме того, можно использовать метод фотограмметрии, когда прибор оснащен тремя фотокамерами, обеспечивающими пространственные измерения в шесть степеней свободы с точностью $\pm 0,05$ мм + $0,05$ мм/м (возможность совершать геометрические движения в трехмерном пространстве) [27].

Помимо моделирования освещенности памятника, полученная пространственная модель высокого разрешения может быть использована при трасологических исследованиях, а также для сохранения памятника в цифровом виде в случае возможного его разрушения со временем.

Заключение

Памятник «Храм времени» является уникальным объектом, представляет собой сложное пространственное построение в соответ-

ствии с освещенностью в астрономически значимые дни года. Наблюдаемая светотеневая картина в равноденствие и в день зимнего солнцестояния, кроме подтверждения предварительных результатов моделирования, позволила приблизиться к пониманию семантики «драконической мифологии» представителей Тагарской культуры, не имеющих письменности. Измерения, расчеты, проведенное моделирование и натурные наблюдения подтвердили предположения В. Е. Ларичева о календарной значимости памятника.

Следует отметить высокую точность построения памятника представителями Тагарской археологической культуры (VIII–III в. до н. э.): скальное ребро с насечками направлено на восходящее зимнее Солнце в плане и по высоте с погрешностью не более одного градуса; в равноденствия первый луч восходящего Солнца освещает первую насечку ребра при расстоянии между насечками 1–1,5 см. Такая высокая точность объясняется тем, что древние строители памятника хорошо знали, почитали астрономические даты зимнего солнцестояния/равноденствий и решали прямую задачу путем непосредственных наблюдений за Солнцем.

Вторая важная особенность сооружения как точного календаря – нацеленность именно на восходящее Солнце. Так, по результатам натурных наблюдений Н. В. Радюк 13.03.20, «голова» дракона освещается Солнцем еще за неделю до весеннего равноденствия (в само равноденствие она уже остается в тени), но Солнце при этом находится высоко над горизонтом.

Как показывает опыт, непосредственные наблюдения рассчитанных заранее восходов и заходов светил, кроме подтверждения правильности измерений и вычислений, предоставляют возможность визуальной фиксации немоделируемых деталей и подробностей, помогающих понять устройство и предназна-

чение памятников культуры. Особенно это касается изменения светотеневой картины, связи ее с петроглифами и другими структурными элементами памятников. Подтверждение непосредственными наблюдениями расчетов и гипотез говорит о надежности и важности астрономических методов для археологии.

При изучении подобных памятников рекомендуется, кроме геодезических измерений и астрономических расчетов, работать с фотографиями светотеневой картины (с таймингом съемки), выполнять натурные наблюдения в астрономически значимые дни года, а также использовать лазерное сканирование в комбинации с фото- и стереосъемкой для построения 3D-модели памятника. Для подробного изучения насечек на Храме времени (их исполнение, форма, расположение, характер отражения ими Солнца) необходимы трасологические исследования.

Комплекс перечисленных методов и астрономические расчеты предоставляют естественно-научные доказательства для археологов, выявляя закономерности в расположении сооружений в целом и их деталей. Определение особенностей наблюдения Солнца в течение всего года и в разные исторические эпохи может быть выполнено по результатам геодезических измерений и 3D-моделирования в краткий летний экспедиционный период.

Благодарность

Авторы статьи выражают благодарность Наталии Васильевне Радюк и Сергею Федоровичу Ознобихину за фотографии астрономических событий на астроархеологических памятниках в дни равноденствий и зимнего солнцестояния, а также за помощь при наблюдении восхода Солнца на Храме времени в осеннее равноденствие в 2016 г. и зимнее солнцестояние в 2017 г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. O'Kelly M. J. Newgrange: archaeology, art and legend. New Aspects of Antiquity series. – London: Thames & Hudson, 1982. – 240 p.
2. Локьер Д. Н. Рассвет астрономии. Планеты и звезды в мифах древних народов. – М.: ЗАО Центрполиграф, 2013. – 445 с.
3. Ruggles C., Cotte M. Heritage Sites of Astronomy and Archaeoastronomy in the context of the UNESCO World Heritage Convention: a Thematic Study. – Paris: ICOMOS–IAU, 2010. – 272 p.

4. Portal to the Heritage of Astronomy. Веб-портал Астрономического наследия под эгидой ЮНЕСКО в коллаборации с Международным астрономическим союзом IAU [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www3.astronomicalheritage.net/index.php> (дата обращения: 20.02.2020).
5. Cuenca Sanabria J., García Navarro M., González Arratia L., Montelongo J. El culto a las cuevas entre los aborígenes canarios: el almogaren de Risco Caído (Gran Canaria) // *Almogaren*. – 2008. – Vol. 39. – P. 153–190.
6. Magli G. The Scientific Foundations of Archaeoastronomy. In: *Archaeoastronomy. Undergraduate Lecture Notes in Physics*. – Springer, Cham. 2016. – 246 p.
7. Хокинс Дж. Кроме Стоунхенджа. – М. : Мир, 1977. – 268 с.
8. Potemkina T. M. Sky on the rocks of onega lake according to data of the archaeoastronomy // *Archaeoastronomy and Ancient Technologies*. – 2016. – Vol. 4 (1). – P. 19–80.
9. Larichev V. E., Parshikov S. A., Gienko E. G. The Shadow of God and the Zurvan Iconography // *Archaeoastronomy and Ancient Technologies*. – 2015. – Vol. 3 (2). – P. 1–22.
10. Гиенко Е. Г., Маточкин Е. П., Маточкин П. Е. Солнце, луна и тени от мегалитов на Тархатинском мегалитическом комплексе // *Гуманитарные науки в Сибири*. – 2011. – № 3. – С. 15–18.
11. Гиенко Е. Г. Определение астрономической ориентировки археологических памятников по часовому углу Солнца на примере петроглифа со спиральями (Горный Алтай) // *Archaeoastronomy and Ancient Technologies*. – 2016. – Т. 4 (2). – С. 59–68.
12. Марсадилов Л. С., Паранина Г. Н. Методика и методология комплексных исследований древних сакральных мегалитических объектов // *Мировоззрение населения Южной Сибири и Центральной Азии в исторической ретроспективе : сборник*. – Барнаул, 2012. – С. 166–183.
13. Ларичев В. Е. Парадоксы Времени (к проблеме характера религии тагарской культуры) // *Евразия: культурное наследие древних цивилизаций. Вып. 3: Парадоксы в археологии : сборник статей*. – Новосибирск : РИЦ НГУ, 2004. – С. 113–141.
14. Поляков А. В., Святко С. В. Радиоуглеродное датирование археологических памятников неолита – начала железного века среднего Енисея : обзор результатов и новые данные // *Теория и практика археологических исследований*. – 2009. – Вып. 5. – С. 20–56.
15. Larichev V. E., Gienko E. G., Parshikov S. A. Sanctuary. «The Temple of Time» in North Khakasy: Methods of Research, Reconstruction of its Appointment // *Universum Humanitarium*. – 2017. – No. 2. – P. 32–44.
16. Тетерин Г. Н., Синянская М. Л. Точность геодезических измерений в ретроспективе и перспективе (по историческим эпохам) // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.)*. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 34–39.
17. Ларичев В. Е., Паршиков С. А. Приборы и методы изучения структуры и пространственных координат некоторых видов наскальных изображений (на материалах Северной Хакасии) // *Вестник НГУ. Серия: История, филология. Вып. 7: Археология и этнография*. – 2010. – Т. 9. – С. 39–45.
18. Прокопьева С. А. Применение автоматизированных средств измерений и представления данных при геодезическом обеспечении археологических исследований // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотоъёмка*. – 2010. – № 1. – С. 10–14.
19. Ларичев В. Е., Гиенко Е. Г., Паршиков С. А. Свет и тень в стенах Тагарского святилища (инструментарий и метод фиксации ритмов освещения и погружения во мрак структур сакрального объекта по мере смены сезонов; семантические реконструкции) // *Современные решения актуальных проблем евразийской археологии : сборник научных статей*. – Барнаул : Изд-во Алтайского гос. университета, 2013. – С. 291–296.
20. Гиенко Е. Г. Уточнение датирования и особенностей функционирования астроархеологических памятников по астрономо-геодезическим данным // *Вестник СГУГиТ*. – 2018. – Т. 23, № 4. – С. 19–32.
21. Уваров С. С. *StarCalc. 500 лучших программ для Вашего компьютера*. – СПб. : Питер, 2009. – 301 с.
22. Использование и востребованность лазерного сканирования [Электронный ресурс]: археология и историко-культурные работы. – 2020. – Режим доступа: <https://geopriz.ru/wp-content/uploads/Lazernoe-skanirovanie.pdf> (дата обращения: 25.02.2020).
23. Зайцева О. В. «3D революция» в археологической фиксации в российской перспективе // *Сибирские исторические исследования*. – 2014. – № 4. – С. 10–20.

24. Уколова А. В., Сенчурин Е. Е. Исследование технологий создания трехмерных моделей памятников на основе фото-, стереосъемки и лазерного сканирования // Изв. вузов. Геодезия и аэрофото-съемка. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 643–648. doi: 10.30533/0536-101X-2018-62-6-643-648.
25. Гужов В. И. Методы измерения 3D-профиля объектов. Контактные, триангуляционные системы и методы структурированного освещения : учеб. пособие – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – 82 с.
26. Куницкий В. И., Гиенко Е. Г. Анализ точности метода определения ориентировки плоскостей с петроглифами по времени их освещенности солнцем // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Между-нар. науч. конгр. : Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке» : сб. материалов в 2 т. (Ново-сibirск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 3–8.
27. Профессиональное 3D-сканирование [Электронный ресурс]: ручные 3d сканеры. – 2020. – Ре-жим доступа: <https://cybercom.ru/catalog/3d-scanners/ruchnye-3d-skanery/> (дата обращения: 25.02.2020).

Получено 01.06.2020

© Е. Г. Гиенко, С. А. Паршиков, Е. А. Бубирь, 2020

SANCTUARY "TEMPLE OF TIME" IN NORTHERN KHAKASSIA: MODELING LIGHT-AND-SHADOW PICTURE

Elena G. Gienko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy, e-mail: elenagienko@yandex.ru

Sergey A. Parshikov

NP Ecological Center for the Rational Development of Natural Resources (NP EC ROPR), 53, Prospect Mira, Krasnoyarsk, 660049, Russia, Researcher, e-mail: srgkrs@mail.ru

Elizaveta A. Bubir

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Master Student, phone: (984)295-05-15, e-mail: gkjslk@mail.ru

The results of the study of the archaeological monument of Tagar culture (VIII-III centuries BC) "Temple of time", located in Northern Khakassia, are described. The main purpose of the study was to obtain natural scientific evidence of the monument calendar significance, as well as that its construction was performed in accordance with the light-and-dark picture during the sunrise and sunset at the equinoxes and winter solstice. To modeling the annual illumination of the monument by the Sun, azimuth orientation, geodesic measurements, and astronomical calculations were performed. In addition, in order to clarify the details, the simulation of a solar beam with a total station laser beam was applied. The modeling results were confirmed by direct observations during the autumnal equinox and winter solstice, when photographs were taken with recording of the shooting moments for subsequent astronomical calculations. As a result, the importance of astronomical research methods and direct observations on astronomically significant days of the year in the study of such archaeological objects is justified. Using astronomical calculations, it is proved that the light-and-shadow picture observed on the monument in modern times is almost identical to the light-and-shadow picture in the Tagar epoch. Suggestions have been made for using laser scanning to model a light-and-shadow picture. The monument "Temple of Time" is a unique object, it is a complex spatial structure in accordance with the illumination on astronomically significant days of the year. The direction of the main axis of the monument to the rising Sun at the winter solstice is made with an error of no more than 1° , which indicates that the ancient organizers of the monument knew astronomical dates well and solved a direct problem by direct observations of the Sun. Measurements, calculations, modeling and field observations confirmed the assumptions about its calendar significance of the monument's discoverer, doctor of historical Sciences V. E. Larichev.

Keywords: astroarchaeology, calendaristics, solstices and equinoxes, astronomical and geodesic methods in archaeology, light-and-shadow picture, laser scanning, 3D modeling

REFERENCES

1. O'Kelly, M. J. (1982). *Newgrange: archaeology, art and legend. New Aspects of Antiquity series*. London: Thames & Hudson, 240 p.
2. Lokyer, D. N. (2013). *Rassvet astronomii. Planety i zvezdy v mifakh drevnikh narodov [The dawn of astronomy. Planets and stars in the myths of ancient peoples]*. Moscow: ZAO Tsentrpoligraf Publ., 445 p. [in Russian].
3. Ruggles, C., & Cotte, M. (2010). *Heritage Sites of Astronomy and Archaeoastronomy in the context of the UNESCO World Heritage Convention: a Thematic Study*. Paris: ICOMOS–IAU, 272 p.
4. Portal to the Heritage of Astronomy. (n. d.). Retrieved from <https://www3.astronomicalheritage.net/index.php>.
5. Cuenca Sanabria, J., García Navarro, M., González Arratia, L., & Montelongo, J. (2008). El culto a las cuevas entre los aborígenes canarios: el almogaren de Risco Caído (Gran Canaria). *Almogaren*, 39, 153–190.
6. Magli, G. (2016). The Scientific Foundations of Archaeoastronomy. In: *Archaeoastronomy. Undergraduate Lecture Notes in Physics*. Springer, Cham, 246 p.
7. Hawkins, G.S. (1977). *Krome Stoundkhendzha [Beyond Stonehenge]*. Moscow: Mir Publ., 268 p. [in Russian].
8. Potemkina, T. M. (2016). Sky on the rocks of Onega Lake according to data of the archaeoastronomy. *Archaeoastronomy and Ancient Technologies*, 4(1), 19–80.
9. Larichev, V. E., Parshikov, S. A., & Gienko, E. G. (2015). The Shadow of God and the Zurvan Iconography. *Archaeoastronomy and Ancient Technologies*, 3(2), 1–22.
10. Gienko, E. G., Matochkin, E. P., & Matochkin, P. E. (2011). The Sun, the Moon and Shades in the Tarhatinsky Megalithic Complex. *Gumanitarnye nauki v Sibiri [Humanitarian Sciences in Siberia]*, 3, 15–18 [in Russian].
11. Gienko, E. G. (2016). Determination of astronomical orientation of archaeological sites on the hour angle of the Sun on the example of petroglyph spiral (Mountain Altai). *Archaeoastronomy and Ancient Technologies*, 4(2), 59–68 [in Russian].
12. Marsadolov, L. S., & Paranina, G. N. (2012). Method and methodology of complex studies of ancient sacred megalithic objects. In *Sbornik materialov: Mirovozzrenie naseleniya Yuzhnoy Sibiri i tsentral'noy Azii v istoricheskoy retrospektive [Proceedings of the Worldview of the Population of Southern Siberia and Central Asia in the Historical Retrospective]* (pp. 166–183). Barnaul [in Russian].
13. Larichev, V. E. (2004). Paradoxes of time (to the problem of the origin of the religion of Tagar culture). In *Sbornik statey: Evraziya: Kul'turnoe nasledie drevnikh tsivilizatsiy. Vyp. 3: Paradoksey v arkheologii [Proceedings of Eurasia: Cultural Heritage of Ancient Civilizations: Issue 3. Paradoxes in Archeology]* (pp. 113–141). Novosibirsk: RIC NSU Publ. [in Russian].
14. Polyakov, A. V. & Svyatko, S. V. (2009). Radiocarbon dating of archaeological sites of middle Yenisey from neolithic to early Iron Age: overview of the results and new research data. *Teoriya i praktika arkheologicheskikh issledovaniy [Theory and Practice of Archaeological Research]*, 5, 20–56 [in Russian].
15. Larichev, V. E., Gienko, E. G., & Parshikov, S. A. (2017). Sanctuary "The Temple of Time" in North Khakasy: Methods of Research, Reconstruction of its Appointment. *Universum Humanitarium*, 2, 32–44.
16. Teterin, G. N., & Sinyanskaya, M. L. (2015). The accuracy of geodetic measurements in retrospective and perspective (historical eras). In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2015: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2015: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Cartography, Geoinformatics and Mine Surveying]* (pp. 34–39). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
17. Larichev, V. E., & Parshikov, S. A. (2010). Devices and methods for studying the structure and spatial coordinates of some types of rock paintings (on materials of Northern Khakassia). *Vestnik NGU. Seriya: Istoriya, filologiya. Vyp. 7: Arkheologiya i etnografiya [Vestnik NSU. Series: History, Philology. Issue 7: Archeology and Ethnography]*, 9, 39–45 [in Russian].
18. Prokop'yeva, S. A. (2010). Application of automated measuring instruments and data presentation for geodetic support of archaeological research. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 1, 10–14 [in Russian].
19. Larichev, V. E., Gienko, E. G., & Parshikov, S. A. (2013). The light and shadow in the walls of the Tagar's sanctuary (instrumentation and method of fixing the rhythms of lighting and immersion in the darkness of structures of the sacred object as the seasons change; semantic reconstructions). In *Sbornik nauchnykh*

statey: *Sovremennye resheniya aktual'nykh problem evraziyskoy arkheologii* [Proceedings of Modern Solutions to the Current Problems of Eurasian Archeology] (pp. 291–296). Barnaul: Altai State University Publ. [in Russian].

20. Gienko, E. G. (2018). Refinement of astroarchaeology monuments dating and functioning by astrometric-geodetic data. *Vestnik SGUGiT* [Vestnik SSUGT], 23(4), 19–32 [in Russian].

21. Uvarov, S. S. (2009). *StarCalc. 500 luchshikh programm dlya Vashego komp'yutera* [StarCalc. 500 best programs for your computer]. Saint Petersburg: Piter Publ. [in Russian].

22. Use and demand of laser scanning. Archeology and historical and cultural works. (2020). Retrieved from <https://geopriz.ru/wp-content/uploads/Lazernoe-skanirovanie.pdf>. [In Russian]

23. Zaytseva, O. V. (2014). "3D revolution" in archaeological recording in Russian perspective. *Sibirskie istoricheskie issledovaniya* [Siberian Historical Research], 4, 10–20 [in Russian]

24. Ukolova, A. V., & Senchurin, E. E. (2018). Research of technologies for creating three-dimensional (3D) models of monuments, based on photography, stereo photo and laser scanning. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka* [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography], 62(6), 643–648 [in Russian]

25. Guzhov, I. (2015). *Metody izmereniya 3D-profil'ya ob'ektov. Kontaktnye, triangulyatsi-onnye sistemy i metody strukturirovannogo osveshcheniya* [Methods of 3D-profile measurement of the objects. Contact, triangulation systems and methods of the structured illumination]. Novosibirsk: NGTU Publ., 82 p. [in Russian].

26. Kunitsky, V. I., & Gienko, E. G. (2017). The accuracy analysis of the method of determining the orientation of the planes with petroglyphs by the time of the sun illumination. *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2017: Masterskaya nauchnaya sessiya: T. 2. Pervye shagi v nauke* [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2017: Master's Scientific Session: Vol. 2. First Steps in Science] (pp. 3–8). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

27. Professional 3D-scanning. Handheld 3d scanners. (2020). Retrieved from: <https://cybercom.ru/catalog/3d-scanners/ruchnye-3d-skanery> [in Russian].

Received 01.06.2020

© E. G. Gienko, S. A. Parshikov, E. A. Bubir, 2020

УДК [528.02+528.48:693]:665.6/.7
DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-19-26

НОРМИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И СТРОИТЕЛЬНО-МОНТАЖНЫХ РАБОТ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ПОД НЕФТЕПРОДУКТЫ

Роман Павлович Горбулин

Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, 644008, Россия, г. Омск, ул. Сибакловская, 4, аспирант кафедры геодезии и дистанционного зондирования, тел. (3812)65-37-18, e-mail: rp.gorbulin21.06.02@omgau.org

Анатолий Иванович Уваров

Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, 644008, Россия, г. Омск, ул. Сибакловская, 4, кандидат технических наук, доцент кафедры геодезии и дистанционного зондирования, тел. (3812)65-37-18, e-mail: ai.uvarov@omgau.org

Принято считать, что точность геометрических характеристик элементов конструкций является одним из ключевых показателей особенностей строительства. В ГОСТ 21778-81 указывается, что в производстве используются необходимые средства и принципы технологического обеспечения точности при разработке проекта сооружений. Точность строительных элементов по геометрическим характеристикам зависит от неточностей изготовления деталей, геодезических разбивочных и строительно-монтажных работ. Из этого следует, что показатели по точности геометрических характеристик и надежности строительных систем по назначению взаимосвязаны. Коэффициенты надежности строительных систем по назначению зависят от уровня ответственности зданий и сооружений. Поэтому цель нашей работы – обоснование назначения точности геодезических работ при возведении стальных резервуаров с учетом уровня их ответственности. Предлагается в строительных нормах и правилах по проектированию строительных конструкций и элементов при их вычислениях по методу предельных состояний использовать систему частных коэффициентов уже из пяти групп. Обоснованы показатели средних квадратических отклонений при монтаже и эксплуатации стальных резервуаров с учетом их ответственности. Предложено допуски на геометрические параметры при возведении стальных резервуаров назначать с учетом показателей их надежности по ответственности. Выполнено обоснование норм точности (значений средних квадратических отклонений) на геодезическое обеспечение возведения стальных резервуаров с учетом класса сооружения и показателей надежности их строительных конструкций по ответственности.

Ключевые слова: нормы точности, резервуары, коэффициенты надежности, геодезические измерения, деформации, показатели ответственности, геометрические параметры, класс сооружения

Введение

Территория нашей страны покрыта многолетней мерзлотой на 64 %, как правило, добыча нефти и газа приходится на освоение северных районов, соответственно возникает вопрос о хранении этих ресурсов. Одно из немногих решений о сохранности ресурсов – это стальные резервуары, которые свою очередь должны обеспечиваться качественным обследованием для предотвращения аварийных ситуаций. Стоимость свайных фундаментов с ростверком и плитами обычно превышает стоимость конструкций резервуаров.

Геодезическое обеспечение монтажа и дальнейшей эксплуатации таких сооружений является важной задачей.

Большое количество нормативных документов и научных исследований посвящено геодезическому обеспечению монтажа сооружений, исследованию их деформаций, в том числе касающихся стальных резервуаров [1–27], что говорит об актуальности исследований в данном направлении. Для обеспечения устойчивой работы резервуаров при их возведении необходимо выполнять геодезические работы по нормам точности, учитывающим уровень ответственности сооружений.

Методы и материалы

В работе [2] при расчетах строительных конструкций по предельным состояниям предложено в нормах проектирования использовать систему частных коэффициентов надежности из пяти групп, в том числе коэффициентов надежности их по назначению и точности геометрических параметров.

Точность геометрических параметров строительных конструкций зависит от погрешностей изготовления деталей, геодезических разбивочных и строительно-монтажных работ. Погрешности же в положении строительных элементов оказывают влияние на надежность конструкций зданий и сооружений.

Следовательно, показатели точности геометрических параметров и надежности строительных конструкций по назначению взаимосвязаны. Коэффициенты надежности строительных конструкций по назначению зависят от уровней ответственности зданий и сооружений. Поэтому необходимо обоснование точности возведения стальных резервуаров с учетом ответственности зданий и сооружений. Исследования по мониторингу резервуаров отражены в работах зарубежных авторов [3–8].

Под надежностью строительных систем следует понимать способность их выполнять заданные функции в эксплуатационный период. Другими словами, надежность можно охарактеризовать как вероятность того, что в заданный период эксплуатации не наступит ни одно из недопустимых предельных состояний для строительных конструкций или их элементов.

Способность конструктивных систем выполнять, при заданных условиях возведения и во время эксплуатации, установленные для них функции изучает прикладная теория надежности. Расчет конструктивных элементов уже по допустимым напряжениям (традиционным методом) предполагает собой метод оценки или обеспечения механической прочности (надежности).

Российскими учеными в 1938 г. был изобретен способ расчета конструкций (бетонных, железобетонных и каменных) с учетом разрушающих нагрузок, а затем и способ, учитывающий предельные состояния. Способ расчета

по предельным состояниям вводится в действие в Советском Союзе с 1955 г. в качестве общего метода для расчета строительных элементов, а с 1962 г. – для расчета оснований.

В расчетах конструктивных элементов по несущей способности (по первому предельному состоянию) в нормах проектирования вместо единого коэффициента запаса вводится ряд коэффициентов, которые берут во внимание переменчивость фактических значений нагрузок, прочностных характеристик материалов и условий работы конструктивных элементов.

Затраты на возведение стальных резервуаров в большей степени зависят от расходов материалов, эксплуатации машин и оборудования, трудозатрат и в меньшей степени от назначения объектов или уровня ответственности зданий. Показатель же надежности существенно зависит от назначения объектов и показателей уровня ответственности зданий. В основных положениях по проектированию вводится четвертый коэффициент, учитывающий уровень ответственности сооружений или надежности по назначению. При разработке же других конструктивных элементов зданий и сооружений показатели ответственности сооружений или надежности по назначению не учитывались, так как не были установлены.

В работе [2] рекомендуется применять показатели ответственности для различных по назначению сооружений. Предлагается также в строительных нормах и правилах по проектированию строительных конструкций и элементов при их вычислениях по методу предельных состояний использовать систему частных коэффициентов уже из пяти групп.

В этом случае неравенство, учитываемое при расчете конструкций по первому предельному состоянию – по прочности или устойчивости (по несущей способности), можно представить в следующем виде:

$$\frac{\gamma_{ni}}{\gamma_{ti}(N^H * \gamma_{fi})} \leq \Phi \left(\frac{S_i; R_i^H; 1}{\gamma_{mi}; \gamma_{di}} \right), \quad (1)$$

где N^H – усилия от нормативных нагрузок;

Φ – функция, описывающая род усилия (сжатие, изгиб и т. д.);

S_i – характеристики сечения (геометрические);

R_i^H – характеристика нормативного сопротивления материалов;

γ_{fi} – коэффициенты надежности, учитывающие нагрузку;

γ_{mi} – коэффициенты надежности, учитывающие материал;

γ_{di} – коэффициенты, учитывающие условия работ;

γ_{ni} – коэффициенты, учитывающие ответственность зданий и сооружений или надежность конструкций;

γ_{ti} – коэффициенты надежности, учитывающие точность геометрических параметров конструкций.

Коэффициенты γ_{fi} , γ_{mi} , γ_{di} в научной литературе в достаточной мере исследованы. Принципы учета уровня ответственности зданий и сооружений в целях проектирования конструкций описаны в работе [9], а в нормативных документах по расчету строительных систем приведены значения коэффициентов надежности согласно их назначению.

Следует отметить, что значимость коэффициентов надежности по точности геометрических характеристик исследована недостаточно. В пособии [10] предлагается допуск на геометрические параметры строительных конструктивных элементов при их возведении устанавливать с учетом показателей ответственности.

С учетом ответственности сооружений в работе [2] коэффициенты надежности по назначению γ_{ni} рекомендуется принимать равными: 1; 0,95; 0,9.

С учетом этих показателей средние квадратические отклонения (нормы точности) при возведении строительных конструкций в работах [11, 12] предложено назначать следующим образом:

$$\gamma_n = 1; t = 3; P = 0,997; \sigma = \frac{\Delta}{6} = \pm \frac{\delta}{3}; \quad (2)$$

$$\gamma_n = 0,95; t = 2; P = 0,95; \sigma = \frac{\Delta}{4} = \pm \frac{\delta}{2}; \quad (3)$$

$$\gamma_n = 0,9; t = 1,65; P = 0,9; \sigma = \frac{\Delta}{3,3} = \pm \frac{\delta}{1,65}. \quad (4)$$

При этом допускается отклонение размера и положения строительного компонента в ходе изготовления и монтажа от проектного или номинального значения (x_0) в интервале $2t$. В этом случае границы этого интервала принимаются за предельные отклонения размеров или положения строительного элемента.

В соответствии с ГОСТ [13], здания и сооружения подразделяют по их ответственности на три уровня: I – повышенный; II – нормальный; III – пониженный.

Стальные резервуары под нефтепродукты относятся к сооружениям с повышенным уровнем ответственности и делятся на классы по опасности в зависимости от их номинального объема. Несвоевременное определение нарушений в работе резервуарных парков может повлечь за собой тяжелые социальные, экономические и экологические последствия, поэтому нужен качественный мониторинг их деформаций с помощью современных электронных приборов и средств измерений. В статье [14] дано описание комплекса инженерно-геодезических изысканий, выполняемых при наблюдениях за вертикальными смещениями фундаментов объектов нефтегазовой промышленности в северных районах. Технология измерения геометрических параметров оболочки резервуаров и их оснований описаны в [15]. При расчете конструкций, геометрических элементов и параметров резервуаров и их оснований коэффициент надежности по ответственности γ_n рекомендуется принять равным: для I уровня – от 0,95 до 1,2; II уровня – 0,95; III уровня – менее 0,95, но не менее 0,8. В примечании к стандарту отмечено, что настоящий пункт не распространяется на здания и сооружения, учет ответственности которых установлен в соответствующих документах. При проектировании резервуаров и расчете норм точности для условий Крайнего Севера необходимо учитывать наличие многолетнемерзлых грунтов и свайных оснований, на которых размещаются сооружения (рисунок).

Резервуары на свайном основании
в Республике Саха (Якутия)

С учетом этих особенностей, а также изменений, внесенных в ГОСТ [16], предлагается назначать средние квадратические отклонения (нормы точности) при возведении стальных резервуаров и мониторинге их деформаций с учетом уровней ответственности:

– для I уровня, с вероятностью $P = 0,997$

$$0,95 < \gamma_n \leq 1,2; t = 3; \sigma = \frac{\Delta}{6} = \pm \frac{\delta}{3}; \quad (5)$$

– для II уровня с вероятностью $P = 0,95$

$$\gamma = 0,95; t = 2; \sigma = \frac{\Delta}{4} = \pm \frac{\delta}{2}; \quad (6)$$

– для III уровня с вероятностью $P = 0,9$

$$0,8 < \gamma_n \leq 0,95; t = 1,65; \sigma = \frac{\Delta}{3,3} = \pm \frac{\delta}{1,65}. \quad (7)$$

Результаты

С учетом изменений, внесенных в ГОСТ [16], предлагается назначать нормы точности в зависимости от класса сооружений. При проектировании стальных резервуаров необходимо использовать коэффициенты надежности по ответственности [17], минимальные значения которых приведены в табл. 1.

В зависимости от номинального объема резервуары подразделяются на следующие классы, характеристики которых приведены в табл. 2.

Таблица 1

Минимальные значения коэффициентов
надежности по ответственности

Класс сооружений	Уровень ответственности	Минимальные значения коэффициента надежности по ответственности, γ_n
КС-3	повышенный	1,1
КС-2	нормальный	1,0
КС-1	пониженный	0,8

Таблица 2

Классификация резервуаров по уровню
их ответственности

Класс резервуара	Объем V , м ³
I	от 50 000 до 120 000
II	от 2 000 до 50 000
III	от 1 000 до 20 000
IV	1 000 и менее

Класс резервуара должен учитываться при назначении:

– специальных требований к методам изготовления, материалам, объемам контроля качества;

– значений коэффициентов надежности по ответственности;

– выборе средств и способов геодезических измерений при монтаже и мониторинге деформаций.

Отнесем резервуары I класса к сооружениям с повышенным уровнем ответственности (КС-3), резервуары II класса – к сооружениям нормального уровня ответственности, резервуары III и IV классов – к сооружениям с пониженным уровнем ответственности, так как для резервуаров, мостов, стадионов в нормах проектирования таких типов сложных конструкций допускается устанавливать иные классы соответствующих сооружений.

С учетом требований, предъявляемых для каждого класса сооружений, получим нормы точности на геодезическое обеспечение при возведении и мониторинге деформаций стальных резервуаров:

– для класса сооружений КС-1 с вероятностью

$$P = 0,9; t = 1,65; \gamma_n = 0,8; \sigma = \frac{\Delta}{3,3} = \pm \frac{\delta}{1,65}. \quad (8)$$

– для класса сооружений КС-2 с вероятностью

$$P = 0,95; t = 2; \gamma_n = 1,0; \sigma = \frac{\Delta}{4} = \pm \frac{\delta}{2}; \quad (9)$$

– для класса сооружений КС-3 с вероятностью

$$P = 0,997; t = 3; \gamma_n = 1,1; \sigma = \frac{\Delta}{6} = \pm \frac{\delta}{3}. \quad (10)$$

Таким образом, получены обоснованные нормы точности на геодезические работы при возведении резервуаров вертикальных стальных. Нормы учитывают уровень ответственности сооружений с необходимой достоверной вероятностью (надежностью) и обеспечивают соблюдение допусков на их геометрические параметры. При расчете необходимой точности геодезических измерений за основу следует принимать значения предельных значений отклонений (допусков).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- ГОСТ 21778–81. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Основные положения. – Введ. 01.07.81. – М. : Стандартинформ, 1981. – 13 с.
- Отставнов В. А., Смирнов А. Ф., Райзер В. Д., Сухов Ю. Д. Учет ответственности зданий и сооружений в нормах проектирования строительных конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. – 1981. – № 1. – С. 1–5.
- Beshr A. A. Accurate surveying measurements for smart Structural members : M. Sc. Thesis. – Mansoura : Mansoura university, 2004. – 194 p.
- Beshr A. A. Development and Innovation of Technologies for Deformation Monitoring of Engineering Structures Using Highly Accurate Modern Surveying Techniques and Instruments : Ph. D. thesis. – Russia, Novosibirsk : Siberian State Geodesy Academy, 2010. – 205 p.
- Ehigiator-Irughe R., Beshr A. A., Ehiorobo J. O., Ehigiator O. M. Modification of Geodetic Methods for Determining the Monitoring Station Coordinates on the Surface of Cylindrical Oil Storage Tank // Research Journal of Engineering and Applied Sciences (RJEAS). – 2011. – Vol. 1 (1). – P. 58–63.
- Ashraf A. B., Ehigiator-Irughe R. A., Ehigiator O. M. Structural deformation analysis of cylindrical oil storage tank using geodetic observations // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сборник материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА. Т. 1. – С. 38–43.
- Середович В. А., Эхилятор–Иругхе Р., Эхилятор О. М., Ориакхи Х. Прогноз деформаций с использованием функций показательного многочлена // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 1. – С. 148–154.
- Vanatwerp R. L. Engineering and design: deformation monitoring and control surveying : Engineer manual. – USA, Washington DC : US Army Corps of Engineering, 1994. – 141 p.
- Правила учета степени ответственности зданий и сооружений при проектировании конструкций // Бюллетень строительной техники. – 1981. – № 7. – С. 12–15.
- Столбов Ю. В., Столбова С. Ю. Геодезическое обеспечение строительства зданий и сооружений : учеб. пособие. – Омск : ОмГАУ, 2012. – 119 с.
- Столбов Ю. В., Синютина Т. П., Кокуленко С. Ю. Вероятностно-статистический метод расчета точности строительно-монтажных и разбивочных работ при строительстве многоэтажных каркасных зданий // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Город и транспорт». – Омск : СибАДИ, 1996. Ч. II. – С. 53–55.
- Столбов Ю. В., Кокуленко С. Ю., Ляшко С. В. Обоснование точности детальной разбивки осей и монтажа конструкций при возведении одноэтажных зданий дрожжзавода в городе Омске // Строительство в новых хозяйственных условиях : сборник научных трудов. – Омск : Изд-во СибАДИ, 1999. – С. 22–31.
- ГОСТ 27751–88. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения – Введ. 01.07.88. – М. : Стандартинформ, 1988 г. – 9 с.
- Гарагуль А. С., Уваров А. И., Горбулин Р. П. Геодезический мониторинг деформаций сооружений нефтегазоконденсатного комплекса // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2018. – № 10 (165). – С. 52–59.
- Горбулин Р. П., Уваров А. И., Пронина Л. А. Геодезические методы контроля наблюдений за деформациями резервуаров // XXIV науч.-техн. студ. конф. – Омск : Омский государственный аграрный университет. – 2018. – С. 41–47.

16. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – Введ. 01.07.2014 – М. : Стандартинформ, 2015. – 16 с.
17. ГОСТ 31385–2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. – Введ. 01.01.2016. – М. : Стандартинформ, 2016. – 5 с.
18. Гуляев Ю. П. Анализ подходов к обоснованию точности геодезических наблюдений за деформационными процессами // Геодезия и картография. – 2007. – № 8. – С. 11–16.
19. Новоселов Б. А., Новоселов Д. Б. Геодезический контроль строительства и эксплуатации главного корпуса обогатительной фабрики «Распадская» // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 1. – С. 66–71.
20. Калинин И. С. Разработка технологических решений и исследования по оптимизации методики геодезического мониторинга геотехнических систем заполярья : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2014. – 24 с.
21. Сальников В. Г. Совершенствование методики геодезических измерений для обеспечения строительства и эксплуатации энергетических объектов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2015. – 24 с.
22. Гайсин Э. Ш., Гайсин М. Ш. Современное состояние проблем обеспечения надежности резервуаров для нефти и нефтепродуктов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2016. – № 2. – С. 31–40.
23. Хрисаненкова Т. М. Исследование деформаций стенок цилиндрических резервуаров // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика : материалы конф. г. Воронеж. – Воронеж : Изд-во ВГЛУ им. Г. Ф. Морозова, 2015. – С. 156–159.
24. Бурков П. В., Буркова С. П., Тимофеев В. Ю., Алешкина А. А., Ащеулова А. А. Исследование состояния днища вертикального стального резервуара, анализ методик диагностики его состояния и выявления причин его деформации // Вестник КузГТУ. – 2013. – № 4. – С. 79–81.
25. Могильный С. Г., Шоломицкий А. А., Фролов И. С. Геодезический мониторинг и выверка металлургического оборудования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 132–143.
26. Никонов А. В. Особенности применения современных геодезических приборов при наблюдении за осадками и деформациями зданий и сооружений объектов энергетики // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 4 (24). – С. 12–19.
27. Гуляев Ю. П. Прогнозирование деформации сооружений на основе результатов геодезических наблюдений : монография. – Новосибирск : СГГА, 2008. – 256 с.

Получено 16.03.2020

© Р. П. Горбулин, А. И. Уваров, 2020

NORMALIZATION OF ACCURACY OF GEODESIC MEASUREMENTS AND CONSTRUCTION AND INSTALLATION WORKS WHEN ESTABLISHING STEEL RESERVOIRS UNDER OIL PRODUCTS

Roman P. Gorbulin

Omsk State Agrarian University P. A. Stolypin, 4, Sibakovskaya St., Omsk, 644008, Russia, Ph. D. Student, Department of Geodesy and Remote Sensing, phone: (3812)65-37-18, e-mail: rp.gorbulin 06.21.02@omgau.org

Anatoly I. Uvarov

Omsk State Agrarian University P. A. Stolypin, 4, Sibakovskaya St., Omsk, 644008, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Geodesy and Remote Sensing, phone: (3812) 65-37-18, e-mail: ai.uvarov@omgau.org

It is generally accepted that the accuracy of the geometric characteristics of structural elements is one of the key indicators of construction features. GOST 21778-81 states that the necessary means and principles of technological accuracy are used in the production of the design of structures. The accuracy of building elements according to geometric characteristics depends on inaccuracies in the manufacture of parts, geodetic alignment

and construction works. From this it follows that the indicators for the accuracy of geometric characteristics and the reliability of building systems for the purpose are interconnected. The reliability factors of building systems for the intended purpose depend on the level of responsibility of buildings and structures. Therefore, the purpose of our work is to justify the purpose of the accuracy of geodetic works in the construction of steel tanks, taking into account the level of their responsibility. Conducting research by many authors indicate that the distribution of errors in the sizes and positions of the structure of components is subject to the normal distribution law. It is proved that elementary errors in the position of the order of components and nodes are summed up. The value of the reliability factors for the accuracy of the geometric parameters of the building structures of steel tanks is not yet sufficiently substantiated. Tolerances for geometric parameters in the construction of steel tanks are proposed to be assigned taking into account the indicators of their reliability in terms of responsibility. The substantiation of the accuracy standards (mean square deviations) for the geodetic support of the construction of steel tanks was carried out taking into account the class of construction and reliability indicators of their building structures in terms of responsibility.

Keywords: accuracy standards, tanks, reliability factors, geodetic measurements, deformations, indicators of responsibility, geometric parameters, class of construction

REFERENCES

1. GOST 21778-81. (1981). A system for ensuring the accuracy of geometric parameters in construction. Key Points. Moscow: Standartinform Publ., 13 p. [in Russian]
2. Otstavnov, V. A., Smirnov, A. F., Rayzer, V. D., & Sukhov, Yu. D. (1981). Accounting for the responsibility of buildings and structures in the norms of design of building structures. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy [Construction Mechanics and Calculation of Structures]*, 1, 1–5 [in Russian].
3. Beshr, A. A. (2004). Accurate surveying measurements for smart Structural members. *M. Sc. Thesis*. Mansoura: Mansoura university Publ., 194 p.
4. Beshr, A. A. (2010). Development and Innovation of Technologies for Deformation Monitoring of Engineering Structures Using Highly Accurate Modern Surveying Techniques and Instruments. *Ph. D. thesis*. Russia, Novosibirsk: Siberian State Geodesy Academy Publ., 205 p.
5. Ehigiator-Irughe, R., Beshr, A. A., Ehiorobo, J. O., & Ehigiator, O. M. (2011). Modification of Geodetic Methods for Determining the Monitoring Station Coordinates on the Surface of Cylindrical Oil Storage Tank. *Research Journal of Engineering and Applied Sciences (RJEAS)*, 1(1), 58–63 [in Russian].
6. Ashraf, A. B., Ehigiator-Irughe, R. A., & Ehigiator, O. M. (2010). Structural deformation analysis of cylindrical oil storage tank using geodetic observations. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2010: T. 1 [Proceedings of GEO-Siberia-2010: Vol. 1]* (pp. 38–43). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
7. Seredovich, V. A., Ehigiator-Irughe, R., Ehigiator, M. O., & Oriakhi Henry. (2012). Deformation Prediction Using Exponential Polynomial Functions. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2012: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, kartografiya, geoinformatika i marksheyderiya [Proceedings of Interekspo GEO-Siberia-2012: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Cartography, Geoinformation and Mine Surviving]* (pp. 148–154). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
8. Vanatwerp, R. L. (1994). *Engineering and design: deformation monitoring and control surveying: Engineer manual*. USA, Washington DC: US Army Corps of Engineering Publ., 141 p.
9. Rules for accounting for the degree of responsibility of buildings and structures in the design of structures. (1981). *Byulleten' stroitel'noy tekhniki [Bulletin of Construction Equipment]*, 7, 12–15 [in Russian].
10. Stolbov, Yu. V., & Stolbova, S. Yu. (2012). *Geodezicheskoe obespechenie stroitel'stva zdaniy i sooruzheniy [Geodetic support for the construction of buildings and structures]*. Omsk: OmGAU Publ., 119 p. [in Russian].
11. Stolbov, Yu. V., Sinyutina, T. P., Kokulenko, & S. Yu. (1996). Probabilistic-statistical method for calculating the accuracy of construction and alignment works in the construction of multi-storey frame buildings. In *Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: ch. II. Gorod i transport [Proceedings of International Scientific and Practical Conferences: Part II. City and Transport]* (pp. 53–55). Omsk: SibADI Publ. [in Russian].
12. Stolbov, Yu. V., Kokulenko, S. Yu., & Lyashko, S. V. (1999). Justification of the accuracy of a detailed breakdown of axes and installation of structures during the construction of single-story buildings of a yeast plant in the city of Omsk. In *Sbornik nauchnykh trudov: Stroitel'stvo v novykh khozyaystvennykh*

usloviyakh [Collection of Scientific Papers: Construction in New Economic Conditions] (pp. 22–31). Omsk: SibADI Publ. [in Russian].

13. GOST 27751–88. (1988). Reliability of building structures and foundations. Key Points. Moscow: Standartinform, 9 p. [in Russian].

14. Garagul, A. S., Uvarov, A. I., & Gorbulin, R. P. (2018). Geodetic monitoring of deformations of structures of the oil and gas condensate complex. *Zemleustroystvo, kadastr i monitoring zemel' [Land Management, Cadastre and Land Monitoring]*, 10(165), 52–59 [in Russian].

15. Gorbulin, R. P., Uvarov, A. I., & Pronina, L. A. (2018). Geodesic methods for monitoring observations of tank deformations. In *Sbornik materialov XXIV nauchno-tehnicheskoy studencheskoy konferentsii [Proceedings of XXIV Scientific and Technical Student Conferences]* (pp. 41–47). Omsk: Omsk State Agrarian University Publ. [in Russian].

16. GOST 27751–2014. (2015). Reliability of building structures and foundations. Key Points. Moscow: Standartinform Publ., 16 p. [in Russian].

17. GOST 31385–2016. (2016). Vertical cylindrical steel tanks for oil and oil products. Moscow: Standartinform Publ., 5 p. [in Russian].

18. Gulyaev, Yu. P. (2007). Analysis of approaches to substantiating the accuracy of geodetic observations of deformation processes. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 8, 11–16 [in Russian].

19. Novoselov, B. A., & Novoselov, D. B. (2012). Geodetic control of the construction and operation of the main building of the Raspadskaya concentrator. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2012: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. I. Geodeziya, kartografiya, geoinformatika i marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Cartography, Geoinformation and Mine Surviving]* (pp. 66–71). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

20. Kalinchenko, I. S. (2014). Development of technological solutions and research to optimize the method of geodetic monitoring of geotechnical systems of the Arctic. *Extended abstract of candidate's thesis*. Novosibirsk, 24 p. [in Russian].

21. Salnikov, V. G. (2015). Improving the methodology of geodetic measurements to ensure the construction and operation of energy facilities. *Extended abstract of candidate's thesis*. Novosibirsk, 24 p. [in Russian].

22. Gaysin, E. Sh., & Gaysin, M. Sh. (2016). The current state of the problems of ensuring the reliability of reservoirs for oil and oil products. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya [Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons]*, 2, 31–40 [in Russian].

23. Khrisanenkova, T. M. (2015). The study of the deformation of the walls of cylindrical reservoirs. In *Sbornik materialov konferentsii: Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika. Proceedings of Conferences: Actual Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice* (pp. 156–159). Voronezh: VGLTU im. G. F. Morozova Publ. [in Russian].

24. Burkov, P. V., Burkova, S. P., Timofeev, V. Yu., Aleshkina, A. A., & Ascheulova, A. A. (2013). Investigation of the state of the bottom of a vertical steel tank, analysis of the method-diagnostics of diagnosing its condition and identifying the causes of its deformation. *Vestnik KuzGTU [Bulletin of the Kuzbass State Technical University]*, 4, 79–81 [in Russian].

25. Mogilny, S. G., Sholomitsky, A. A., & Frolov, I. S. (2013). Geodetic monitoring and reconciliation of metallurgical equipment. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2012: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. I. Geodeziya, kartografiya, geoinformatika i marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Cartography, Geoinformation and Mine Surviving]* (pp. 132–143). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

26. Nikonov, A. V. (2013). Features of the use of modern geodetic instruments for monitoring precipitation and deformation of buildings and structures of energy facilities. *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 4(24), 12–19 [in Russian].

27. Gulyaev, Yu. P. (2008). *Prognozirovanie deformatsii sooruzheniy na osnove rezul'tatov geodezicheskikh nablyudeniy [Forecasting the deformation of structures based on the results of geodetic observations]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 256 p. [in Russian].

Received 16.03.2020

© R. P. Gorbulin, A. I. Uvarov, 2020

УДК 528:681.5

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-27-36

ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И РЕМОНТОВ

Нурган Токанович Кемербаев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55, e-mail: n.kemerbayev@geo-id.kz

Два года назад на Павлодарском нефтехимическом заводе, в рамках модернизации производственного процесса, была внедрена автоматизированная система технического обслуживания и ремонта оборудования (ТОРО). Эта система, состоящая из нескольких подсистем, предоставила возможность вести мониторинг рабочего процесса, наблюдать за многими производственными циклами, составлять статистику выполнения тех или иных производственных задач, определять проблематичные зоны, а также предварительно прогнозировать выход из строя того или иного оборудования, просчитывать проблематичные зоны. Однако процесс по расширению системы функционала ТОРО не стоит на месте. В настоящее время в рамках цифровизации производственного процесса на заводе реализуют проект по созданию 3D генерального плана завода. В статье подробно описан процесс поэтапного создания цифровой пространственной модели и ее связь с автоматизированной системой управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования. Детально охарактеризован один из главных этапов создания трехмерной модели – процесс получения высокоточных геодезических измерений для создания геодезической основы, полевые работы, создание планово-высотного обоснования. Описывается методика работ по проведению лазерного сканирования, процесс обработки полученных данных, моделирование и наполнение цифровой модели атрибутивными данными. На сегодняшний день трудно оспорить значимость внедрения цифрового пространственного моделирования на производстве. Главную роль в успешности данных инновационных проектов играют правильно полученные, обработанные и внедренные в модель исходные данные. Таким образом, геодезическое обеспечение является ключевым этапом в сложном технологическом процессе по созданию цифрового пространственного двойника или 3D-модели завода и ее эксплуатации в системе ТОРО.

Ключевые слова: техническое обслуживание, ремонт оборудования, геодезическое обеспечение, планово-высотное обоснование, лазерное сканирование, 3D-модель, генеральный план

Введение

Сегодня цифровая трансформация стала частью стратегий развития всех крупнейших нефтяных компаний. Цифровые технологии становятся важной частью технологического развития компаний.

В условиях конкуренции и нестабильных цен на энергоносители главной задачей нефтяных компаний остается максимизация производительности за счет бесперебойной работы, повышение уровня промышленной и информационной безопасности и, конечно, сокращение издержек.

Это становится возможным благодаря переходу на управление всеми бизнес-процессами на основе данных и цифровых моделей, через получение аналитики о производственных и экономических процессах в режиме реального времени, позволяющих снизить затраты на сырье, логистику, обслуживание

и ремонт, увеличить качество и объемы выпускаемой продукции.

В наше время цифровая трансформация осуществляется по трем направлениям:

- продвинутая аналитика (использование больших данных (Big Data) для принятия решений, оптимизации технологических процессов и планирование технического обслуживания);

- цифровизация процессов (упрощение процессов с использованием приложений и мобильных устройств);

- индустрия 4.0 (внедрение новейших технологий – AR, VR, IoT, компьютерное зрение – в производственные процессы).

Огромную роль в достижении высоких производственных показателей играет техническое состояние оборудования, для обеспечения исправности и работоспособности которого необходимо развертывание комплексной системы технического обслуживания и ре-

монта технологического оборудования [1]. Стоит отметить, что в мире идет плавный переход от планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактическому состоянию оборудования. Таким образом, важной составляющей повышения эффективности работы ремонтных служб является внедрение современных технических средств, позволяющих перейти к обслуживанию оборудования по фактическому состоянию, которые нашли применение на передовых отечественных и большинстве зарубежных предприятий с 1990-х гг. Автомобильные, авиационные, ракетно-космические и машиностроительные, нефтеперерабатывающие заводы США, Японии, Англии и Франции проводят обслуживание станков только по их фактическому состоянию. Метод основан на том, что без разборки станка оценивается его техническое состояние, определяются отдельные узлы и детали, которые имеют дефекты, и поэтому ремонт производится целенаправленно, с устранением конкретных дефектов. Это обеспечивает стабильность работы производства, позволяет прогнозировать время безаварийной работы оборудования, заранее заказать необходимые комплектующие для проведения ремонта [2].

В рамках реализации Программы цифровой трансформации проекта «Переход на увеличенный межремонтный период на НПЗ» АО «НК «КазМунайГаз» внедрил в 2018 г. на Павлодарском нефтехимическом заводе автоматизированную систему управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования (далее – ТОРО) и обеспечения надежности и механической целостности.

Система ТОРО состоит из четырех автоматизированных подсистем – IBM Maximo (ПО для управления активами предприятия), APM Meridium (управление эффективностью производственных активов), Asset Sentinel (Мониторинг процессов и оборудования), а также Downtime Reporting (учет простоев).

IBM Maximo – это программный продукт, с помощью которого в автоматическом режиме ведется организация проведения ремонтов, учет технических характеристик каждой единицы оборудования, история, объемы и стоимость выполненных ремонтных работ.

Meridium APM – система управления инспекциями и обеспечения надежности, пред-

назначена для анализа эффективности производственных активов.

Asset Sentinel – система мониторинга оборудования в реальном времени, отслеживает состояние активов в режиме онлайн, заранее прогнозируя выход оборудования из строя, а также осуществляет сбор статистики работы оборудования.

Downtime Reporting – система учета простоев оборудования, предназначена для фиксации и отправки ответственным специалистам уведомлений о наличии простоев на установках, архивировании записей по простоям и потерям производства.

Все перечисленные системы нацелены на увеличение межремонтных интервалов, исключение внеплановых выходов оборудования из строя, а также снижение затрат на его ремонт и финансовых потерь производства от простоя технологических установок [3].

Результат внедрения ТОРО – увеличение межремонтного периода (остановка завода для ремонта не каждый год, а раз в три года), повышение надежности и механической целостности оборудования в условиях непрерывного технологического процесса, безопасность производства, сокращение внеплановых и плановых простоев оборудования, снижение риска возникновения внештатных и аварийных ситуаций, уменьшение затраты на техобслуживание и капитальный ремонт, увеличение производительности работ и общую эффективность оборудования [4].

В настоящее время идет выполнение Программы цифровой трансформации АО «НК «КазМунайГаз» путем реализации проекта «Создание цифрового Генерального плана и 3D-модели НПЗ РК» (далее – проект). Проект включает в себя развитие автоматизированных систем через работы по расширению интеграции систем и увеличению объема передаваемых между ними данных, исключению дублирования, подключению других структурных подразделений предприятия (техника безопасности, бухгалтерия, сервисные компании), настройке новых модулей.

Инициатором проекта является Павлодарский нефтехимический завод, который в мае 2019 г., заключил договор на реализацию проекта с консорциумом ТОО «Alora IT Solutions» и ТОО «GEOID». Срок реализации проекта 18 месяцев.

Согласно разделению объемов за ТОО «GEOID» закреплено создание информационной модели, а ТОО «Alora IT Solutions» выполняет поставку ПО, серверного оборудования, графических станций, занимается интеграцией AVEVA с системой ТОРО и обучением специалистов Заказчика.

Цель проекта – создание цифрового Генплана и 3D-модели нефтеперерабатывающего завода, с применением технологии лазерного сканирования объектов.

Задача проекта – создание информационной модели завода, содержащей в электронном виде пространственное описание объекта эксплуатации, включая архитектурные, функ-

ционально-технологические, конструктивные, инженерно-технические и иные решения, а также необходимые исходные данные для строительства, реконструкции и эксплуатации объекта (рис. 1).

Интеграция информационной модели (далее – ИМ) завода с системой ТОРО предусмотрена в подсистеме IBM Maximo [5] (рис. 2).

Просмотр, заполнение и извлечение данных ИМ завода будут осуществляться посредством использования подсистемы IBM Maximo.

Трехмерная визуализация модели с атрибутивными данными повысит эффективность процесса планирования и выполнения работ по техническому обслуживанию.

Срок реализации проекта: 18 месяцев

Рис. 1. Этапы выполнения работ в рамках договора консорциума ТОО «GEOID» и ТОО «Alora IT Solutions»

Рис. 2. Схема интеграции проекта в систему ТОРО

Таким образом, расширение возможностей системы ТОРО позволит более эффективно управлять активами и положениями, отслеживать заявки и задания, создавать системы из моделей, просматривать модель предприятия в 3D-формате. Работы по созданию цифрового Генплана выполнялись в несколько этапов (рис. 3).

1. Подготовительные работы:

- проведение анализа необходимых к выполнению объемов работ. Создание совместной рабочей группы по исполнению проекта;
- сбор исходных данных и знакомство с результатами геодезических изысканий прошлых периодов, существующими исполнительными схемами, картографическими материалами на различных носителях (цифровых, бумажных), паспортными данными, проектной документацией;

- рекогносцировка, составление поэтапного плана полевых работ;

- установка программного обеспечения на аппаратной платформе. Первичная установка и настройка;

- составление полного календарного плана с разбивкой на этапы реализации проекта.

2. Комплекс полевых работ:

- работы по созданию и уравниванию пунктов геодезической сети;

- поэтапное лазерное сканирование с использованием марок. Сферическая и панорамная фотосъемки;

- проведение топографической съемки подземных объектов, включая инженерные сети, резервуары и хранилища с применением специализированного оборудования (трубокабелеискателей и/или георадара).

Рис. 3. Архитектура реализуемого проекта

3. Комплекс камеральных работ по созданию модели в виде облака точек:

- взаимное уравнивание сканов (сшивка);
- контроль качества уравнивания;
- создание панорамных снимков;

- создание 3D-модели по облаку точек с созданием тематических слоев;

- обработка результатов топографической съемки подземных коммуникаций и включение данной информации в 3D-модель;

- контроль полноты и точности 3D-модели;
- поэтапная передача облака точек и 3D-модели Заказчику в электронном формате;
- подготовка специалистов завода к работе с векторной моделью;
- подготовка технического отчета;
- внедрение Системы и загрузка 3D-модели в Систему;
- совместно с прочими подрядными организациями Заказчика обеспечение информационного обмена с системой ТОРО;
- организация обучения персонала Заказчика работе с Системой (не менее 20 человек).

Реализация проекта. Полевые работы

Этап полевых работ включал в себя работы по созданию и уравниванию пунктов геодезической сети, который является одним из важных критериев при создании цифрового генерального плана.

Техническим заданием было предусмотрено создание геодезической сети заданного класса точности, служащей геодезической основой для выполнения наземного лазерного сканирования.

По точностным характеристикам геодезическая сеть должна быть определена с точностью 1-го разряда (в плане) и IV класса нивелирования (по высоте).

На этапе создания планово-высотного обоснования на местности произведена закладка 30 новых пунктов полигонометрии. Однородная высокая точность геодезических сетей достигнута применением оптимальных методов спутниковых наблюдений и соответствующих методов их обработки, а также за счет использования оптимальной геометрии расположения пунктов, их равномерной плотности и максимально возможного совмещения старой и новой геодезических сетей [6].

Заказчиком был согласован тип закладываемого пункта, который представляет собой толстостенную 3-метровую трубу диаметром 159 см, к верхней части приварена пластина, в центре которой приварен накерненный болт (10 мм) высотой 2 см. В нижней части трубы

приварен металлический швеллер (якорь). Высота верхней части центра, выступающей над землей около 40–50 см, а нижней части более 2,7 м. Нижняя часть центра полностью заполнена бетоном М250.

Закрепление долговременных знаков было произведено с применением механического оборудования ямобур БМ-205-Д на базе трактора МТЗ. Диаметр отверстия ямы составил 360 мм.

В качестве исходных пунктов для создания геодезической сети опознавательных знаков использовались только пункты заводской геодезической и нивелирной сети и вновь созданные пункты [7].

Для определения координат 30 новых и переопределения 54 существующих геодезических пунктов, а также создания параметров перехода из системы координат WGS-84 в местную (заводскую) систему координат разработана методика спутниковых наблюдений с использованием одновременно восьми ГНСС-приемников Leica GS14.

Координаты и высоты съемочных точек на объекте работ определены в статическом режиме, так как этот метод является наиболее точным в GPS наблюдениях и позволяет получить линии (направления) на определяемые пункты с точностью в плане 3 мм + 0,5 мм/км по высоте 5 мм + 0,5 мм/км [8].

Продолжительность сеансов при определении составила:

- на исходных пунктах более трех часов;
- на определяемых и переопределяемых пунктах не менее двух часов.

По результатам наблюдений и обработки данных спутниковых наблюдений был создан ключ с параметрами перехода из системы координат WGS-84 в местную (заводскую) систему координат.

Заказчиком в техническом задании, территория завода была разделена на три категории сложности:

- высокая сложность – 68 га;
- средняя сложность – 193 га;
- низкая сложность – 81 га.

Наземное лазерное сканирование выполнялось с использованием современных сканирующих систем Leica ScanStation P40, Leica

ScanStation P50 и Leica RTC360 [9]. Сканирование производилось в заводской системе координат путем определения координат марок от планово-высотного обоснования тахеометром Leica TS 06 plus.

Сканирование на каждой станции наземного лазерного сканирования выполнялось в пределах поля зрения сканера – 360° по горизонтали и 270° по вертикали, точность взаимного положения сканов между станциями не превышала 5 мм.

Сканирование производилось двумя способами.

1. В заводской системе координат, используя координированные марки от пунктов планово-высотного обоснования.

2. В условной системе координат, при этом в общем сканировании учитываются марки, которые были предварительно закоординированы. При таком способе обработке указываются координаты марок и производится автоматическая привязка облака точек к заводской системе координат [10].

Камеральные работы

Результатом сканирования является «облако точек» лазерных отражений от объектов с известными координатами – скан (рис. 4).

Рис. 4. Фрагмент облака точек

Предварительная обработка (импорт файлов, удаление шумов (транспорт, люди и т. д.), взаимное уравнивание сканов) производилось в программном обеспечении Leica Cyclone.

Состояние выполненного объема работ на февраль 2020 г. приведено в таблице.

Текущее состояние выполненного объема работ по НЛС на февраль 2020 г.

№ п/п	Категория сложности	Общая площадь, га	Выполненный объем НЛС, га	Уровень детализации	Количество станций, ед.
1	Высокая	68	68	LOD 400	7 200
2	Средняя	193	168	LOD 300	2 750
3	Низкая	81	72	LOD 200	1 480

Этап создания информационной модели выполнен с использованием программного продукта Aveva E3D.

Выбор данного программного продукта обусловлен рядом причин:

1) информационная модель, выполненная в Aveva E3D, интегрируется с IBM Maximo;

2) наличие инструментов обработки данных лазерного сканирования и их интеграция с 3D-моделью;

3) поддержка работы с «облачными» технологиями и мобильными устройствами;

4) удобные инструменты для быстрого создания и оформления чертежей согласно необходимым требованиям;

5) возможность совместной работы над одним проектом с ведущим решением для моделирования в трехмерном пространстве AVEVA PDMS;

6) полная интеграция с другими системами моделирования AVEVA, которые используются в работе, в том числе с технологиями для работы со схемами;

7) возможность повторного использования данных, что позволяет применять модульное моделирования;

8) интуитивно понятный пользовательский интерфейс для выполнения различных задач проектирования.

Процесс моделирования в программном продукте AVEVA E3D начался с обучения специалистов отдела 3D-моделирования. По программе обучения произведена подготовка специалистов по следующим направлениям: специалист по каталогам, специалист по разделам (ТХ, АС, КМ и др.) и администратор системы [11].

В результате обучения специалистами получен опыт, который был использован при создании модели.

Моделирование выполнялось в следующей последовательности.

1. Импорт облака точек через модуль PDMS программного обеспечения AVEVA.

2. Моделирование простыми примитивами фундаментов на участке.

3. Работы по наполнению каталогов в файл базы данных каталога (DATAL) AVEVA:

- трубы, фитинги, отводы, фильтры и т. д.;
- шаблоны электрооборудования, шаблоны инструментального оборудования, осветительные приборы.
- строительные элементы: арматура, соединения, лестницы и т. д.;
- механическое оборудование: резервуары, насосы и т. д.;

– вентиляция, кондиционирование и отопление.

4. Моделирование оборудования: насосы, резервуары, цистерны, КЖ, КМ и т. д.

5. Создание каталога трубопроводов.

6. Контроль пространственного несоответствия (взаимное расположения элементов).

7. Заполнение модели атрибутивными элементами по спецификации.

Сшитый, уравненный и ориентированный в системе координат файл облака точек, созданный в программном обеспечении Leica Cyclone в формате *.imr, не позволяет в дальнейшем проводить работы по экспорту облака точек в AVEVA. Для решения этой задачи использовался модуль Laser Model Interface.

Образец 3D-модели объекта, выполненный в заводской системе координат, показан на рис. 5, б).

Рис. 5. Пример полученной 3D-модели:

а) облако точек; б) модель

В результате моделирования достигнуты следующие показатели:

- актуальные формы 3D-модели объекта;
- получены планы, виды, разрезы для дальнейшей работы;
- заказчиком выявлены коллизии на этапе эксплуатации (отличия от проектных данных);
- значительно улучшено качество выходной документации.

В настоящее время проект «Создание цифрового Генерального плана и 3D-модели НПЗ РК» еще не завершен, выполняются работы по моделированию. По окончании процесса моделирования будет осуществлено интеграция 3D-модели завода в автоматизированную систему ТОРО.

После завершения работ, по результатам внедрения, на стадии промышленной эксплуатации будет доступна визуализированная информация о состоянии технологического оборудования в части оценки надежности, прочности деталей и узлов. Также появится возможность получения информации с модели в виде рабочих чертежей и технических паспортов. Использование информационной 3D-модели позволит воспроизвести динамические (характеристики материала, изменяющиеся во времени, при воздействии температуры и других факторов) изменения технологического оборудования, которые позволят предотвратить чрезвычайные ситуации, минимизировать простои технологического обо-

рудования и как следствие увеличить эффективность работы предприятия.

Геодезическое обеспечение системы ТОРО на стадии реализации проекта и последующей эксплуатации объекта системы управления ТОРО является важной частью многоступенчатого процесса – от планового обслуживания до необходимого обслуживания оборудования, основанного на диагностике и контроле его состояния.

Выводы

Несмотря на то, что проект еще не завершен, на основании вышеизложенного, уже сейчас можно прийти к выводу о значимости геодезического обеспечения при создании информационной 3D-модели завода и ее эксплуатации в системе ТОРО.

Объем геодезических работ по сбору исходных данных, созданию геодезической основы, топографической съемки подземных

коммуникаций, лазерному сканированию, сам процесс моделирования и наполнение его информацией составил основную и важную часть всего процесса реализации проекта.

Геодезические работы при реализации проекта явились фундаментом в производственно-технологической цепочке «съемка – облако – модель – анализ – технологический процесс». Их качество, полнота и своевременность реализации определили качество построения информационной 3D-модели завода, ее внедрение и эксплуатацию в системе ТОРО.

Становится очевидным, что геодезическое обеспечение системы ТОРО с использованием технологии наземного лазерного сканирования позволит решать практически весь спектр задач эксплуатации промышленных объектов и технологически сложного оборудования, откроет новые возможности по поддержанию информационной 3D-модели завода в актуальном состоянии [12, 13].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов В. А., Фещенко А. А. Особенности подходов к техническому обслуживанию и ремонту оборудования в непрерывном производстве // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 82–89. doi: 10.15593/2224-9877/2018.3.10.
2. Новый подход к эксплуатации и ремонту оборудования на машиностроительных предприятиях ОПК [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ufastanki.ru/sarticles/0/41>.
3. Система ТОРО с различных точек зрения // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2013. – № 3. – С. 10–14.
4. IBM Maximo Asset Management. Comprehensive enterprise asset management for lifecycle management and resource management [Electronic resource]. – Mode of access: <https://interprocom.ru/products/ibm/ibm-maximo-asset-management/>.
5. Maximo Asset Management Documentation V 7.6.0.7. [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/ru/SSLKT6_7.6.0.7/com.ibm.mam.doc/welcome.html.
6. Sholomitskii A., Lagutina E. Design and preliminary calculation of the accuracy of special geodetic and mine surveying networks // International science and technology conference "Earth science", IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 272. – P. 022010. doi:10.1088/1755-1315/272/2/022010.
7. СП 11-104-97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/871001219>.
8. Шульц Р. Расчет точности определения горизонтальных перемещений сооружений методом наземного лазерного сканирования // Инженерная геодезия. – 2008. – № 54. – С. 311–320.
9. Шульц Р. Преимущества и недостатки различных методов сшивки лазерных сканов // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия Горно-геологическая. – 2009. – Вып. 9 (143). – С. 140–145.
10. Шульц Р. Определение геометрических параметров цилиндрических резервуаров по данным наземного лазерного сканирования // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия Горно-геологическая. – 2010. – Вып. 12 (173). – С. 37–47.

11. Вальдовский А., Морозова Г. Высокоточная съемка промышленных объектов методом лазерного сканирования с последующим 3D-моделированием [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sapr.ru/article/21468/>.

12. Шишкин А., Кутлаев А. Реализация проектов с применением технологий 3D-моделирования на базе AVEVA PDMS в ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднинефтепроект» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sapr.ru/article/25001/>.

13. Шоломицкий А. А., Лагутина Е. К., Соболева Е. Л. Использование лазерного сканирования для мониторинга большепролетных сооружений // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 43–57.

Получено 29.05.2020

© Н. Т. Кемербаев, 2020

GEODETIC INFORMATION IN AUTOMATED SYSTEM OF TECHNICAL SUPPORT AND MAINTENANCE

Nurgan T. Kemberbayev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (383)343-29-55, e-mail: n.kemberbayev@geo-id.kz

Two years ago, at the Pavlodar oil chemistry refinery LLP, as part of the modernization of the production process, an automated system for maintenance and repair of equipment (PM) was introduced. This system, consisting of several subsystems, made it possible to monitor the workflow, monitor many production cycles, compile statistics on the performance of various production tasks, identify problematic zones, and also predict the failure of a particular equipment, calculate problematic zones. However, the process of expanding the system of functional maintenance does not stand still. Currently, as part of the digitalization of the production process, the plant is implementing a project to create a 3D master plan for the plant. The article describes in detail the process of phased creation of a digital spatial model and its relationship with the automated control system for maintenance and repair of equipment. One of the main stages of creating a three-dimensional model is described in detail – the process of obtaining high-precision geodetic measurements to create a geodetic base, field work, and the creation of a plan-height justification. The methodology of laser scanning, the process of processing the obtained data, modeling and filling the digital model with attributive data is described. Today it is difficult to dispute the importance of introducing digital spatial modeling in production and the main role in the success of these innovative projects is played by correctly received, processed and implemented initial data in the model. Thus, geodetic support is a key step in the complex technological process of creating a digital spatial double or 3D model of the plant and its operation in the maintenance system.

Keywords: maintenance, equipment repair, geodetic support, vertical-height justification, laser scanning, 3D model, master plan

REFERENCES

1. Ivanov, V. A., & Feshenko, A. A. (2018). Features of approaches to maintenance and repair of equipment in continuous production. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Engineering and Materials Science]*, 20(3), 82–89 [in Russian].

2. A new approach to the operation and repair of equipment at the defense industry engineering enterprises. (n. d.). Retrieved from <https://ufastanki.ru/sarticles/0/41>.

3. The system of maintenance and repair of equipment from various points of view. (2013). *Electricity Transmission and Distribution Magazine*, 3, 10–14 [in Russian].

4. IBM Maximo Asset Management. Comprehensive enterprise asset management for lifecycle management and resource management. (n. d.). Retrieved from <https://interprocom.ru/products/ibm/ibm-maximo-as-set-management>.

5. Maximo Asset Management Documentation V 7.6.0.7. (n. d.). Retrieved from https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/ru/SSLKT6_7.6.0.7/com.ibm.mam.doc/welcome.html.
6. Sholomitskii, A., & Lagutina, E. (2019). Design and preliminary calculation of the accuracy of special geodetic and mine surveying networks. *International Science and Technology Conference "Earth Science", IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 272, 022010. doi:10.1088/1755-1315/272/2/022010
7. Code of Practice. (1997). SP 11-104-97. Geodetic surveys for construction. Retrieved from <http://docs.cntd.ru/document/871001219>.
8. Shultz, R. (2008). Calculation of the accuracy of determining the horizontal movements of structures by ground laser scanning. *Inzhenernaya geodeziya [Engineering Geodesy]*, 54, 311–320 [in Russian].
9. Shultz, R. (2009). Advantages and disadvantages of various methods for stitching laser scans. *Nauchnye trudy Doneckogo nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya Gorno-geologicheskaya [Scientific works of Donetsk National Technical University. Series Mining and Geological]*, 9(143), 140–145 [in Russian].
10. Shultz, R. (2010). Determination of the geometric parameters of cylindrical tanks according to ground-based laser scanning. *Nauchnye trudy Doneckogo nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya Gorno-geologicheskaya [Scientific works of Donetsk National Technical University. Series Mining and Geological]*, 12(173), 37–47 [in Russian].
11. Valdovskij, A., & Morozova, G. (n. d.). High-precision shooting of industrial facilities by laser scanning followed by 3D modeling. Retrieved from <https://sapr.ru/article/21468>.
12. Shishkin, A., & Kutlaev, A. (n. d.). Implementation of projects using 3D-modeling technologies based on AVEVA PDMS in LLC "LUKOIL-Nizhegorodniinefteproekt". Retrieved from <https://sapr.ru/article/25001>.
13. Sholomitsky, A. A., Lagutina, E. K., & Soboleva, E. L. (2018). Use of laser scanning to monitor large-span structures. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(2), 43–57 [in Russian].

Received 29.05.2020

© N. T. Kemberbayev, 2020

УДК 550.831.015:535.33

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-37-44

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ ОГРАНИЧЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОКОН

Иван Юрьевич Лакеев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (999)466-00-46, e-mail: ivanlakeev@yandex.ru

В статье показано, как путем последовательного объединения гармоник $C_{nm}P_{nm}(\sin \varphi)\cos m\lambda$ и $S_{nm}P_{nm}(\sin \varphi)\sin m\lambda$ в отдельную группу образованы окна, действующие в качестве полосового фильтра пропускания высоких или низких гармоник. Сведения о характере пространственного распределения гравитационного поля в определенных диапазонах частот могут быть получены посредством управления шириной спектрального окна. Диапазон степени окна гармоник подбирался таким образом, чтобы результат был ориентирован на фактический источник гравитационного возмущения. Вычисления спектральнональных моделей поля высот квазигеоида на территории Западной Сибири, Фенноскандии и Центральной России при ограничении степенного ряда значениями N_{1-2} от $N_1 = 2$ до $N_2 = 200$, от $N_1 = 9$ до $N_2 = 22$ и $N_1 = 30$ до $N_2 = 200$ выполнялись в программе GeoUnd 1.0. Данная программа предназначена для вычисления высоты квазигеоида, основанного на применении коэффициентов разложения гравитационного поля по сферическим функциям. Данные спектральнональные модели для наглядности и проведения анализа представлены в графическом исполнении. Результаты показали, что использование спектральнональных моделей глобального квазигеоида, полученного из комбинированных моделей потенциала силы тяжести Земли, является современным и перспективным методом выявления текущих и будущих вертикальных движений земной коры как на локальных, так и на региональных участках поверхности.

Ключевые слова: мониторинг, гравитационное поле Земли, гармонический анализ, полосовые частотные окна, строение земной коры, геоид

Введение

С течением времени наша планета неизбежно сталкивается с изменениями, в первую очередь, обусловленными различными геодинамическими процессами (приливное влияние Луны и Солнца, магматизм, тектонические движения и др.). Детальное определение аномалий гравитационного поля позволяет изучать и моделировать силы, являющиеся причиной подобных процессов.

По мере того как перераспределяются массы внутри Земли, изменяется и гравитационное поле. Современная геодезия достигла такой точности и технических возможностей, что эти изменения регулярно уточняются в результате наземных и спутниковых измерений [1].

Проведение высокоточных измерений по всей территории земного шара необходимо, когда речь идет об изучении определенной области в глобальном масштабе. В этом слу-

чае использование одних наземных измерений недостаточно, поскольку они сопровождаются очень трудоемкими и экономически дорогостоящими видами работ. Часто невозможность выполнения таких работ объясняется недоступностью района их выполнения, поскольку большая часть поверхности Земли занята морями и океанами.

Определение внешнего гравитационного поля Земли необходимо для решения одной из задач физической геодезии – определения глобального квазигеоида. Развитие технологий спутниковых наблюдений позволило определять гармоники геопотенциала дифференциальным методом и получать более детальную структуру гравитационного поля с разрешением менее 100 км. В качестве реализации данного метода выступают глобальные модели гравитационного поля в виде системы коэффициентов в разложении потенциала силы тяжести в ряд по сферическим функциям [2–11].

В данной статье предлагается использование метода, основанного на корреляции высот геоида, используя глобальные модели гравитационного поля Земли. За высоту геоида принимается высота поверхности геоида над поверхностью земного эллипсоида по нормали к нему в данной точке. Согласно ГОСТ Р 52572–2006 геоид – уровенная поверхность, наилучшим образом аппроксимирующая уровень моря как в локальном, так и в глобальном случаях. В данном случае уровенная поверхность является эквипотенциальной поверхностью земного гравитационного поля, которая везде перпендикулярна к направлению отвесной линии. Также, согласно ГОСТ Р 52334–2005 – это фигура Земли, образованная уровенной поверхностью, совпадающей с поверхностью Мирового океана в состоянии полного покоя и равновесия и продолженной под материками. Как фигура, геоид отражает распределение плотности в объеме планеты

и, имея при этом волнообразную поверхность, отличается от формы эллипсоида вращения [12–14].

Методы и материалы

Глобальные модели гравитационного поля, построенные по принципу разложения возмущающего потенциала или аномалий в ряд по сферическим функциям и ограниченные степенью и порядком $n = m > 200$, применяются для решения современных задач геофизики, геодезии, геодинамики, океанографии и других наук. К ним относятся глобальные модели GOCO05c, GGM05C, EIGEN-6S4 [15–17]. Имея пространственное разрешение менее 100 км, они обеспечивают точность определения аномалий силы тяжести в пределах 2–3 мГал, а высоты геоида определяются с погрешностью 2–3 см [18–20]. Для получения значений коэффициентов разложения геопотенциала в моделях используется формула

$$V = \frac{fM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a_e}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \varphi) \right]. \quad (1)$$

В связи с тем, что гравитационное поле представляется в виде бесконечной суммы сферических гармоник (1), путем суммирования гармоник определенного диапазона можно рассчитать и построить ограниченную данным диапазоном математическую модель в заданных зонах волнового диапазона. В этом случае формула (1) приобретает конечный вид

$$V_N(\varphi, \lambda, r) = \frac{fM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^N \left(\frac{a_e}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) \right]. \quad (2)$$

Известно, что любой конечный отрезок (2) ряда (1) на поверхности сферы радиуса $r = 1$ обеспечивает наилучшую среднеквадратическую аппроксимацию функции [21], т. е.

$$\varepsilon_n = \|V(\varphi, \lambda, r) - V_N(\varphi, \lambda, r)\| = \left\{ \frac{1}{4\pi} \iint [V(\varphi, \lambda, r) - V_N(\varphi, \lambda, r)]^2 d\omega \right\}^{\frac{1}{2}} = \min. \quad (3)$$

В связи с равномерностью сходимости ряда (1)

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \varepsilon_N = 0. \quad (4)$$

Скорость убывания ε_N зависит от дифференциальных свойств функции $V(\varphi, \lambda, r)$.

Последовательное объединение гармоник $C_{nm}P_{nm}(\sin \varphi)\cos m\lambda$ и $S_{nm}P_{nm}(\sin \varphi)\sin m\lambda$ в отдельную группу образует полосовой

фильтр пропускания гармоник (сумма высоких или низких гармоник). В таком случае спектрозональная модель гравитационного поля представляется в виде результата влияния данного фильтра на реальное поле в заданном частотном диапазоне (спектральном окне). Управление шириной спектрального окна позволило получить данные о характере пространственного распределения гравитационного поля. Выбор диапазона степеней спектрального окна осуществлялся исходя из

того, чтобы результат был ориентирован на фактический источник гравитационного возмущения.

В связи с отсутствием общепринятого метода определения ширины спектрального окна руководствуются требованиями к точности как конечного результата решаемых задач, так и детализации входных параметров. Основным условием выбора диапазона частот спектрального окна является превышение энергии гармонического окна над уровнем шума гравитационного поля. При соблюдении данного условия возможно использование данных об энергетической структуре гравитационного поля, характеризующих степенные дисперсии геопотенциала (3). В результате расчетов можно выделить составляющие поля тяжести с разнородным тектоническим происхождением. Для этого производится извлечение координат и волновой информации исследуемых областей при спектрально-аналитическом моделировании.

Данные наблюдения были использованы в работах [22–24] в качестве возможных предварительных вычислений аномалий силы тяжести в малоизученных районах по разнородной геофизической информации.

Так, например, Бьерхаммер, при изучении геоида в Фенноскандии, применил спектральное окно, ограниченное степенями $N = 9–22$. Это позволило выявить область опускания геоида, которая по текущим данным многолетних наблюдений соответствует послеледниковой отдаче/поднятию земной коры. Место, где выявлено максимальное опускание геоида, с высокой точностью совпадает с местом максимального современного поднятия земной коры.

Далее будут представлены иллюстрации спектрально-аналитических моделей поля высот Фенноскандии, Западной Сибири и Центральной России, рассчитанных по предельной формуле

$$\zeta(\varphi, \lambda) = R \sum_{N_1}^{N_2} \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi), \quad (5)$$

где $\Delta \bar{C}_{nm} = \bar{C}_{nm} - \bar{C}_{nm}^0$;

ζ – нормальное значение силы тяжести;

$\bar{C}_{nm}^0$ – гармонические коэффициенты нормального потенциала притяжения.

Результаты

Для того чтобы определить поверхность геоида заданной точки, требуется провести комплекс измерений непосредственно на поверхности геоида или на физической поверхности Земли с учетом распределения масс в этом месте. Оба варианта определения поверхности геоида являются практически неисполнимыми, поэтому вместо поверхности геоида используется поверхность, близкая к таковой, – поверхность квазигеоида.

Для определения поверхности квазигеоида используются только результаты измерений на физической поверхности Земли (значения потенциала силы тяжести на земной поверхности) без учета показателей распределения масс и редуцирования таких результатов внутрь притягивающей массы.

Выполнены расчеты спектрально-аналитических моделей поля высот глобального квазигеоида по формуле (5) при ограничении степенного ряда значениями N_{1-2} от $N_1 = 2$ до $N_2 = 200$, от $N_1 = 9$ до $N_2 = 22$ и $N_1 = 30$ до $N_2 = 200$. Вычисления производились в программе GeoUnd 1.0. Программа предназначена для вычисления высот квазигеоида по коэффициентам разложения гравитационного поля по сферическим функциям. Входными данными являются нормированные коэффициенты разложения потенциала притяжения, константа притяжения, большая полуось, геодезические координаты: широта, долгота результирующей точки. Кроме этого, задаются средний радиус Земли и первые гармоники нормального гравитационного поля. Программа выполняет синтез высот квазигеоида в точке по коэффициентам модели гравитационного

поля, вычисляя нормированное значение присоединенного полинома Лежандра [25].

В качестве иллюстрации вышесказанного на рис. 1 приводится фрагмент полученной спектрозональной модели Фенноскандии при ограничении степенного ряда значениями N_{1-2} от $N_1 = 30$ до $N_2 = 200$.

Рис. 1. Фрагмент спектрозональной модели глобального квазигеоида Фенноскандии при $N = 30-200$

На рис. 2, 3 приведены фрагменты моделей глобального квазигеоида для территории Западной Сибири и территории Центральной России в диапазонах спектральных окон $N = 30-200$ соответственно.

Рис. 2. Фрагмент спектрозональной модели глобального квазигеоида Западной Сибири при $N = 30-200$

Рис. 3. Фрагмент спектрозональной модели глобального квазигеоида для части территории Центральной России при $N = 30-200$

Обсуждение

Спектрональные модели глобального квазигеоида Фенноскандии показывают, что при изменении ширины спектрального окна существенно изменяется и пространственное распределение поля высот квазигеоида.

Спектрональная модель глобального квазигеоида на территории Западной Сибири, построенная в спектральном окне при $N = 9-30$, имеет на западе область резкого подъема с центром в точке с координатами $\varphi = 59^\circ$, $\lambda = 58^\circ$, приуроченной к Уралу. Остальная часть положительных отметок спектрональной модели глобального квазигеоида приходится на центральную полосу Западной Сибири, что может быть обусловлено опусканием земной коры в этом районе.

Фрагмент спектрональной модели глобального квазигеоида Западной Сибири при $N = 30-200$, представленный на рис. 2, имеет более мозаичную картину положительных и отрицательных отметок высот. На западе и на юге наблюдаются положительные отметки по высоте, а в районе Западносибирской низменности – отрицательные отметки. Отдельные участки положительных отметок высот спектрональной модели глобального квазигеоида в северо-западной части Западной Сибири, приуроченные к месторождениям углеводородов, можно объяснить опусканием земной коры, связанной с добычей нефти и газа.

Фрагменты спектрональных моделей глобального квазигеоида для части территории Центральной России при $N = 30-200$ имеют

сложную картину пространственного распределения по сравнению с моделями, ограниченными степенями $N = 2-200$ и $N = 9-200$, имеющего больший диапазон спектрального окна. Следует отметить значительный подъем высот спектрально-аналитической модели глобального квазигеоида в центральной части Урала при $N = 30-200$, что можно объяснить корреляцией с рельефом горного массива. Такая же корреляция с горным рельефом Урала наблюдается и в диапазоне спектрального окна $N = 30-200$. Однако, на рис. 3, в трапеции, ограниченной по широте $50^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$ и долготе $45^\circ \leq \lambda \leq 55^\circ$, значительный подъем высот спектрально-аналитической модели глобального квазигеоида совпадает с зоной опускания земной коры в Прикамье.

Заключение

В результатах исследования приведены фрагменты моделей глобального квазигеоида для территории Центральной, Западной Сибири и Фенноскандии в различных диапазонах спектральных окон.

Данные результаты показали, что использование спектрально-аналитических моделей глобального квазигеоида, полученного из комбинированных моделей потенциала силы тяжести Земли, является современным и перспективным методом выявления текущих и будущих вертикальных движений земной коры как на локальных, так и на региональных участках поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Канушин В. Ф., Лакеев И. Ю. Разработка методики использования глобальных моделей геопотенциала для изучения сейсмической активности // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке» : сб. материалов (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – С. 73–78.
2. Голдобин Д. Н., Мазурова Е. М., Канушин В. Ф. Одномерное сферическое преобразование Фурье и его реализация для расчета глобальной модели квазигеоида в нулевом приближении теории Молоденского // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 3 (31). – С. 45–52.
3. Голдобин Д. Н. Определение геометрической структуры гравитационного поля на территории Западной Сибири по данным современных глобальных моделей геопотенциала // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 19–34.
4. Яшкин С. Н. Некоторые аспекты спутниковой градиентометрии // Геопрофи. – 2007. – № 4. – С. 43–45.
5. Colombo O. L. Ephemeris errors of GPS satellites // Bull. Geod. – 1986. – Vol. 60 (1). – P. 64–86.
6. Канушин В. Ф., Ганагина И. Г., Голдобин Д. Н. и др. Сравнение спутниковых моделей проекта GOCE с различными наборами независимых наземных гравиметрических данных // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 3 (27). – С. 21–35.
7. Karpik A. P., Kanushin V. F., Ganagina I. G. et al. Evaluation of recent Earth's global gravity field models with terrestrial gravity data // Contributions to Geophysics and Geodesy. – 2016. – Vol. 46, No. 1. – P. 1–11.
8. Mayer-Guerr T. ITG-Grace03s: the latest GRACE gravity field solution [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.massentransporte.de/fileadmin/20071015-17-Potsdam/mo_1050_06_mayer.pdf.
9. Kvas A. ITSG-Grace 2014 [Electronic resource]. – Mode of access: http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/TU_Graz/Einrichtungen/Institute/Homepages/i5210/research/ITSG-Grace2014.
10. Biancale R. An improved 10-day time series of the geoid from GRACE and LAGEOS data [Electronic resource]. – Mode of access: ftp://ftp.csr.utexas.edu/pub/grace/Proceedings/Presentations_GSTM2008.pdf.
11. Елагин А. В., Дорогова И. Е. Оценка влияния релятивистских эффектов на траекторию движения искусственных спутников Земли // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 3 (31). – С. 32–39.
12. Геодезия, картография, топография, фотограмметрия, геоинформационные системы, пространственные данные. Справочник стандартных (нормативных) терминов / Под общ. ред. В. Г. Плешкова, Г. Г. Побединского / Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : ООО «Издательство «Проспект», 2015. – 672 с.
13. ГОСТ Р 52572–2006. Географические информационные системы. Координатная основа. Общие требования. – Введ. 01.01.2007. – М. : Стандартинформ, 2018.
14. ГОСТ Р 52334–2005. Гравиразведка. Термины и определения. – Введ. 01.01.2006. – М. : Стандартинформ, 2005.
15. ICGEM – International Center for Global Gravity Field Models [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://icgem.gfzpotdam.de/ICGEM/ICGEM.html> (дата обращения: 22.03.2019).

16. Fecher T., Pail R., Gruber T. GOCO05c: A New Combined Gravity Field Model Based on Full Normal Equations and Regionally Varying Weighting // *Surveys in Geophysics*. – 2016. – Vol. 38, Issue 3. – P. 571–590.
17. Bettadpur S., Ries J., Eanes R., Nagel P., Pie N., Poole S., Richter T., Save H. Evaluation of the GGM05 Mean Earth Gravity models // *Geophysical Research Abstracts*. – Vienna, Austria, 2015. – Vol. 17.
18. Канушин В. Ф., Ганагина И. Г., Голдобин Д. Н. и др. Современные глобальные модели квазигеоида: точностные характеристики и разрешающая способность // *Вестник СГУГиТ*. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 30–49.
19. Канушин В. Ф., Карпик А. П., Ганагина И. Г., Голдобин Д. Н., Косарева А. М., Косарев Н. С. Исследование современных глобальных моделей гравитационного поля Земли : монография. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 270 с.
20. Koneshov V. N., Nepoklonov V. B., Sermyagin R. A., Lidovskaya E. A. Modern global Earth's gravity field models and their errors // *Gyroscopy and Navigation*. – 2013. – Vol. 4, No. 3. – P. 147–155.
21. Лобкова Н. И. О точности аппроксимации стоковых постоянных по наблюдениям спутника, движущегося по круговой полярной орбите // *Кинематика и физика небесных тел*. – 1990. – Т. 6, № 5. – С. 86–94.
22. Карпик А. П., Канушин В. Ф., Ганагина И. Г., Голдобин Д. Н., Мазурова Е. М. Исследование спектральных характеристик глобальных моделей гравитационного поля Земли, полученных по космическим миссиям CHAMP, GRACE и GOCE // *Гироскопия и навигация*. – 2014. – № 4 (87). – С. 34–44.
23. Канушин В. Ф. Дифференцированный подход к определению зависимости аномалий силы тяжести от высоты // *Вопросы математического моделирования в прикладных задачах; Межвузовский сборник научных трудов*. – Новосибирск : НИИГАиК, 1990. – С. 62–65.
24. Канушин В. Ф. Основные принципы прогнозирования аномалий силы тяжести с учетом дополнительной информации // *Деп. ОНТИ ЦНИИГАиК 28. 08. 82, № 90 ГД-Д 82. РЖ. Геодезия и аэрофотосъемка, отд. вып.* – 1983. – 33 с.
25. Голдобин Д. Н., Канушин В. Ф., Ганагина И. Г., Косарев Н. С. GeoUnd : свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015661197 от 20.10.2015 в реестре программ для ЭВМ.

Получено 09.06.2020

© И. Ю. Лакеев, 2020

STUDY OF SPATIAL DISTRIBUTION OF EARTH GRAVITATIONAL FIELD BY SPECTRAL WINDOW LIMITING METHOD

Ivan Y. Lakeev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk 630108, Russia, Ph. D. Student, Department of Space and Physical Geodesy, phone: (999)466-00-46, e-mail: ivanlakeev@yandex.ru

The article shows how windows are formed by successively combining harmonics $C_{nm}P_{nm}(\sin \varphi) \cos m\lambda$ и $S_{nm}P_{nm}(\sin \varphi) \sin m\lambda$ into a separate group, which act as a lowpass or high harmonic bandpass filter. Manipulation of spectral window width allows to get information about the nature of gravity field spatial distribution in certain frequency ranges. The degree range of the harmonic window was selected so that the result was oriented towards the actual source of the gravity disturbance. Calculations of spectrozonal models of quasi-geoid field height of Western Siberia, Fennoscandia, and Central Russia territories with degree series limiting by values N_{1-2} from $N_1 = 2$ to $N_2 = 200$, from $N_1 = 9$ to $N_2 = 22$ and $N_1 = 30$ to $N_2 = 200$, were carried out in GeoUnd 1.0 software. This software is used to calculate quasi-geoid height by expansion of gravity field coefficients in spherical functions row. These spectrozonal models are presented in graphical version for illustration and analysis. Results show that using of global quasi-geoid spectrozonal models obtained from Earth's gravity potential combined models is a modern and productive method for detecting current and future vertical Earth crust movements in local and regional areas.

Keywords: monitoring, Earth gravitational field, harmonic analysis, frequency band window, structure of the earth's crust, geoid

REFERENCES

1. Kanushin, V. F., & Lakeev, I. Yu. (2016). Developing of the method using global models of geopotential for research in seismic activity. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2016: XII Magisterskaya nauchnaya sessiya "Pervye shagi v nauke" [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: XII Master Student Scientific Session "First Steps in Science"]* (pp. 73–78). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
2. Goldobin, D. N., Mazurova, E. M., & Kanushin, V. F. (2015). One-dimensional spherical Fourier transformation and its implementation for the calculation of the global model quasigeoid with accuracy of the zero approach of Molodensky's theory. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(31), 45–52 [in Russian].
3. Goldobin, D. N. (2019). Determination of geometric structure of gravitaion field on the territory of Western Siberia on the data of modern global geopotential models *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 19–34 [in Russian].
4. Yashkin, S. N. (2007). Some aspects gravity satellite. *Geoprofi [Geoprofi]*, 4, 43–45 [in Russian].
5. Colombo, O. L. (1986). Ephemeris errors of GPS satellites. *Bull. Geod.*, 60(1), 64–86.
6. Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., Mazurova, E. M., Kosareva, A. M., & Kosarev, N. S. (2014). Comparison of the GOCE project satellite models with different sets of independent terrestrial gravimetry data. *Vestnik SGGA [Vestnik SSGA]*, 3(27), 21–34 [in Russian].
7. Karpik, A. P., Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., Kosarev, N. S., & Kosareva, A. M. (2016). Evaluation of recent Earth's global gravity field models with terrestrial gravity data. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 46(1), 1–11.
8. Mayer-Guerr, T. (n. d.). ITG-Grace03s: the latest GRACE gravity field solution. Retrieved from http://www.massentransporte.de/fileadmin/20071015-17-Potsdam/mo_1050_06_mayer.pdf.
9. Kvas, A. (n. d.). ITSG-Grace 2014. Retrieved from http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/TU_Graz/Einrichtungen/Institute/Homepages/i5210/research/ITSG-Grace2014.
10. Biancale, R. (n. d.). An improved 10-day time series of the geoid from GRACE and LAGEOS data. Retrieved from ftp://ftp.csr.utexas.edu/pub/grace/Proceedings/Presentations_GSTM2008.pdf.
11. Elagin, A. V., & Dorogova, I. E. (2015). Influence of the relativistic effects on the trajectory of artificial earth satellites. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(31), 32–39 [in Russian].
12. Pleshkova, V. G., & Pobedinskiy G. G. (2016). *Geodezija, kartografija, topografija, fotogrammetrija, geoinformacionnye sistemy, prostranstvennye dannye. Spravochnik standartnyh (normativnyh) terminov [Geodesy, cartography, topography, photogrammetry, geographic information systems, spatial data. Directory of standard (normative) terms]*. Moscow: OOO "Prospekt" Publ., 672 p. [in Russian].
13. Standarts Russian Federation. (2007). GOST R 52572-2006. Geographical information systems. Coordinate frame. General requirements. Moscow: Standartinform Publ., p. 4 [in Russian].
14. Standarts Russian Federation. (2006). GOST R 52334-2005. Gravity prospection. Terms and definitions. Moscow: Standartinform Publ., p. 4 [in Russian].
15. ICGEM – International Center for Global Gravity Field Models. (n. d.). Retrieved from <http://icgem.gfzpotdam.de/ICGEM/ICGEM.html>.
16. Fecher, T., Pail, R., & Gruber, T. (2016). GOCO05c: A New Combined Gravity Field Model Based on Full Normal Equations and Regionally Varying Weighting. *Surveys in Geophysics*, 38(3), 571–590.
17. Bettadpur, S., Ries, J., Eanes, R., Nagel, P., Pie, N., Poole, S., Richter, T., & Save, H. (2015). Evaluation of the GGM05 Mean Earth Gravity models. *Geophysical Research Abstracts*, 17. Vienna, Austria.
18. Kanusin, V. F., Ganagina, I. G., & Goldobin, D. N. (2017) Quasigeoid modern global models: accuracy characteristics and resolution. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(1), 30–49 [in Russian].
19. Kanusin, V. F., Karpik, A. P., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., Kosareva, A. M., & Kosarev, N. S. (2015). *Issledovanie sovremennyh global'nyh modelej gravitacionnogo polya Zemli [The study of modern global models of the gravitational field of the Earth]*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 270 p. [in Russian].
20. Koneshov, V. N., Nepoklonov, V. B., Sermyagin, R. A., & Lidovskaya, E. A. (2013). Modern global Earth's gravity field models and their errors. *Gyroscopy and Navigation*, 4(3), 147–155.
21. Lobkova, N. I. (1990). On the accuracy of approximation of sock constants from observations of a satellite moving in a circular polar orbit. *Kinematika i fizika nebes, tel [Kinematics and Physics of Celestial Bodies]*, 6(5), 86–94 [in Russian].
22. Karpik, A. P., Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., & Mazurova, E. M. (2014). Studies of spectral characteristics of CHAMP, GRACE, and GOCE global gravity field models. *Gyroscopy and Navigation*, 4(87), 34–44 [in Russian].

23. Kanushin, V. F. (1990). Differentiated approach to determining the dependence of gravity anomalies on height. In *Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov: Voprosy matematicheskogo modelirovaniya v prikladnyh zadachah* [Proceedings of Interuniversity Collection of Scientific Proceedings: Issues of Mathematical Modeling in Applied Problems] (pp 62–65). Novosibirsk: NIIGAiK Publ. [in Russian].

24. Kanushin, V. F. (1983). Basic principles for predicting anomalies of gravity with additional information. *Dep. ONTI CNIIGAiK 28. 08. 82. No 90 GD-D 82. RZh. Geodeziya i aerofotos"emka* [Geodesy and Aerophotography], 33 p. [in Russian].

25. Goldobin, D. N., Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., & Kosarev, N. S. (2015). "GeoUnd". Certificate of state registration of computer programs No. 2015661197 of October 10, 2015 in the register of computer programs [in Russian].

Received 09.06.2020

© I. Yu. Lakeev, 2020

УДК 528.482:625.42

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-45-57

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДЕФОРМАЦИЯМИ ОБНАЖЕНИЙ ВЫЕМКИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ СТАНЦИИ МЕТРОПОЛИТЕНА

Хабиб Мазен Хатум

Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2, аспирант кафедры инженерной геодезии, тел. (952)234-69-86, e-mail: habib.hatoum@gmail.com

Мурат Газизович Мустафин

Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной геодезии, тел. (812)328-86-84, e-mail: mustafinm@mail.ru

В геодезической практике применение при мониторинге деформационных процессов роботизированных тахеометров становится нормой. При этом используются различные программные комплексы по обработке измеренных величин и их визуализации. Вместе с тем, вопросы оптимизации деформационной сети и интерпретации результатов наблюдений остаются и сегодня весьма актуальными. Кроме того, обеспечение стабильности контрольных (исходных) точек все еще остается проблемой при решении различных задач, и прежде всего при мониторинговых наблюдениях. Ранее априори принималось, что исходные пункты, размещенные за пределами зоны влияния наблюдаемого объекта, считаются стабильными. Однако для достижения надежных результатов при различных измерениях стабильность исходных пунктов должна проверяться, и это следует рассматривать как дополнительный параметр мониторинга. Разработки в этом направлении имеются, и они связаны с рассмотрением смещений и деформационных марок и исходных пунктов в единой системе (сети). Результаты исследований, представленные в настоящей статье, обладают новизной в части методологии и алгоритма расчета координат станций наблюдения, деформационных марок и исходных пунктов без построения единой сети. Вместе с тем, каждый цикл наблюдений предусматривает оценку стабильности всех пунктов. Методика наблюдений разработана применительно к строительству инженерного сооружения: грунтовой выемке для вестибюля метрополитена. Последовательно рассмотрены вопросы оптимизации места местоположения станций наблюдения, деформационных марок и оценки точности их смещений. При анализе относительных смещений деформационных марок сравниваются эллипсы ошибок их положений, что позволяет определить вектора направления смещений и ожидаемую деформацию. Если полученное перемещение между циклами измерений выходит за пределы этого эллипса, то тогда можно говорить о значимости перемещения и его направлении. Рассмотрен также упрощенный способ обнаружения смещений исходных пунктов путем сравнения элементов остаточных матриц, определяемых в разных циклах наблюдений.

Ключевые слова: мониторинг, инженерные сооружения, геодезические наблюдения, метод наименьших квадратов, исходные пункты, деформационная сеть, смещения, деформации

Введение

При строительстве и эксплуатации различных сооружений последние испытывают нагрузки и соответственно деформации. Задача инженерных служб – обеспечение допустимого уровня этих деформаций. Существует довольно много способов их контроля [1–3]. При инженерных изысканиях выполняются специальные инженерно-геодезические изыскания, в результате которых проектируется

комплекс работ по наблюдениям за деформациями [4–6]. Традиционные методики наблюдений предусматривают создание исходных пунктов, которые закладываются в местах, где исключается деформационный процесс, и деформационных марок (сети), которые непосредственно отражают изучаемые возможные подвижки [4, 7, 8]. В последние время в геодезической практике находит применение модельный принцип оценки деформаций [2, 5], заключающийся в рассмот-

рении исходных пунктов и деформационных марок в единой системе. При этом по смещениям элементов этой системы (например, линий, треугольников, тетраэдров) проводится оценка смещений деформационных марок (в единой сети выделяются смещенные и не смещенные элементы, по координатам последних определяются смещения и координаты смещенных точек). Преимущества такого подхода состоят в том, что проверка устойчивости исходных реперов выполняется таким же способом, как и стабильность всех элементов системы [5, 7, 9, 10].

Методика исследований и результаты

Сначала рассмотрим традиционную методику, при использовании которой результаты наблюдений жестко привязаны к исходным пунктам. При этом специфика состоит в применении роботизированных станций наблюдений и исследовании оптимальных условий их работы. Речь идет о расчете (моделировании) схемы опорных (исходных) пунктов, при которых обеспечивается максимальная точность определения координат роботизированной станции и соответственно наблюдений деформационных марок.

Второй этап – обеспечение оптимизации расположения деформационных марок, которое выполняется с привлечением геотехников или геомехаников ввиду необходимости предварительной оценки деформационного процесса. В настоящей работе показано моделирование деформированного состояния исследуемого объекта (обнажение котлована под вестибюль станции метро), результаты которого позволили определить местоположение деформационных марок. Вопрос весьма актуален, так как без такого анализа можно либо использовать завышенное количество деформационных марок, либо их может быть недостаточно.

Объектом исследования является будущий вестибюль станции метро (Эр-Рияд, Саудовская Аравия). Выемка прямоугольной формы, размерами (L, S1S2 – S3S4): длина 134 м и ширина (l, S2S3 – S1S4) 25 м (рис. 1). Рядом с контуром выемки (AB) находится действующая дорога, а с другой располагается парковка торгового центра. В этой связи наблюдения направлены на оценку деформаций этих элементов выемки. В торцевых обнажениях заложены туннели метрополитена и в окрестностях этих участков процесс деформирования завершен.

Рис. 1. План участка выемки под вестибюль метро с указанием расположения исходных пунктов (Ref) станций наблюдений (ATS) и деформационных марок (A-F)

Для наблюдения за деформациями необходимо было запроектировать расположение станций наблюдений. Принято расположение станций наблюдения вблизи сторон выемки S2S3 и S1S4 (см. рис. 1), при которых обеспечиваются наиболее устойчивое положение станций наблюдения и обзор деформационных марок.

Выше было отмечено, что от точности места расположения тахеометрической станции зависит точность определения абсолютных координат деформационных марок. В этой связи выполнены расчеты погрешности местоположения станции наблюдения (ATS) при различных положениях исходных пунктов. Рассмотрен упрощенный (одноформульный) и строгий способ с привлечением метода наименьших квадратов.

Выполнены расчеты по схеме обратной засечки. Точность обратной засечки по упрощенному способу рассчитывается по следующей формуле [1]:

$$m_{\text{оз}} = \frac{m_{\beta} \cdot S_{PB}}{\rho \cdot \sin(\beta_1 + \beta_2 + \gamma)} \cdot \sqrt{\left(\frac{S_{PA}}{b_{AB}}\right)^2 + \left(\frac{S_{PC}}{b_{BC}}\right)^2}, \quad (1)$$

где $m_{\text{оз}}$ – среднеквадратическая погрешность определения координат определяемой точки (P); m_{β} – погрешность угловых измерений; S – горизонтальное расстояние; b_{AB} , b_{BC} – исходные стороны; $\rho = 206265''$.

Средняя квадратическая погрешность $m_{\text{оз}}$ рассчитывается на основе измеренных углов β_1 и β_2 (координаты точек А, В и С известны, рис. 2). Угол γ и расстояние РВ вычисляются (расстояние РВ вычислено для контроля). По формуле (1) вычислены $m_{\text{оз}}$ и отображены в табл. 1 (при $m_{\beta} = 0,5''$ и $m_s = 0,6$ мм).

Рис. 2. Схема обратной засечки (без избыточных измерений)

Полученные результаты расчетные и при этом учтено лишь влияние геометрии построения обратной угловой засечки на точность вычисления координат.

Таблица 1

Погрешность ($m_{\text{оз}}$) по упрощенному способу (углы принято приводить в градусах, минутах и секундах, но это не принципиально)

	от	до	ГР	β_1	β_2	γ	$m_{\text{оз}}$, мм
ATS1	ATS1	Ref 5	89,877	55,465	58,577	182,187	0,193
	ATS1	Ref 6	42,502				
	ATS1	Ref 8	72,384				
	Ref 6	Ref 5	74,525				
	Ref 6	Ref 8	61,947				
ATS2	ATS2	Ref 3	60,691	36,189	85,518	82,2395	0,716
	ATS2	Ref 4	96,167				
	ATS2	Ref 19	89,622				
	Ref 4	Ref 3	59,250				
	Ref 4	Ref 19	126,242				

Как видно из полученных результатов, погрешности точки Р сильно отличаются при разных соотношениях углов и расстояний. Этот способ ограничен количеством исходных пунктов (3) и очень зависит от углов и геометрии схемы. Следует отметить, что в реальных строительных проектах соблюдение углов, обеспечивающих требуемую точность, может оказаться трудновыполнимой задачей. Кроме того, результаты этого способа показывают, что достигнутая весьма высокая точность (здесь снова следует подчеркнуть, что достигнутая точность модельная, не учитывающая погрешности фактических измерений) может быть недостаточной при наблюдениях за деформациями и следует изыскать возможность ее повышения.

Так, результаты расчетов показали (см. табл. 1), что погрешность (m_{03}) при хорошей

геометрии схемы составила 0,193 мм, эту величину можно считать весьма высокой. Путем использования большего количества исходных пунктов и обработки измерений методом наименьших квадратов (МНК) можно повысить точность. При моделировании измерений с использованием МНК количество исходных пунктов принято равным 8, а количество наблюдений равно 16 (8 горизонтальных расстояний и 8 направлений). При этом мы переходим к схеме линейно-угловой засечки. Неизвестными являются две координаты (X_{ATSI} и Y_{ATSI} , см. рис. 1) поэтому избыточные измерения: $(16 - 2) = 14$. При использовании МНК в качестве ориентировочных координат для первого приближения взяты координаты, полученные из решения по первому способу. Измеренные значения (8 расстояний и 8 направлений) представлены в табл. 2.

$$B = \begin{pmatrix} 0,9228343 & -0,3851971 \\ -0,0620021 & -0,9980760 \\ -0,8573553 & -0,5147251 \\ -0,9989837 & 0,0450727 \\ -0,8862261 & 0,4632529 \\ 0,2450712 & 0,9695051 \\ 0,7244442 & 0,6893335 \\ 0,9732097 & -0,2299193 \\ -0,1788631 & -0,4285106 \\ -0,6362721 & 0,0395263 \\ -0,6947393 & 1,1571971 \\ 0,0544941 & 1,2077965 \\ 0,3666904 & 0,7014971 \\ 0,5260934 & -0,1329857 \\ 0,5833693 & -0,6130828 \\ -0,0919552 & -0,3892309 \end{pmatrix}; \quad W = \begin{pmatrix} -0,0003509 \\ 0,0000859 \\ 0,0001644 \\ -0,0010348 \\ -0,0007975 \\ -0,0019152 \\ -0,0010515 \\ 0,0000237 \\ -0,0000500 \\ -0,0005949 \\ -0,0017533 \\ -0,0016566 \\ -0,0011865 \\ -0,0001955 \\ -0,0006713 \\ -0,0000851 \end{pmatrix};$$

$$\left\{ \begin{array}{l} m_S = 0,0006 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot \Gamma P \quad (\text{м}); \\ m_\beta = \frac{0,5''}{3600}; \\ i = 1 \rightarrow \left(\frac{n}{2}\right); \quad j = \left(\frac{n}{2} + 1\right) \rightarrow n; \\ P_{i,i} = \frac{\mu_0^2}{(m_{Si})^2}; \quad P_{j,j} = \frac{\mu_0^2}{(m_\beta)^2}; \end{array} \right. \quad (2)$$

$$P = \begin{pmatrix} 1910969,54 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 51840000 \end{pmatrix};$$

$$N = B^T \cdot P \cdot B \quad (\text{нормальная матрица}); \quad (3)$$

$$Q = N^{-1} \quad (\text{обратная матрица}); \quad (4)$$

$$U = B^T \cdot P \cdot W \quad (\text{матрица нормированных коэффициентов параметрических уравнений}); \quad (5)$$

$$\hat{\beta} = N^{-1} \cdot U \text{ (матрица коррекции для приближенных координат);} \quad (6)$$

$$\hat{V} = B \cdot \hat{\beta} - W \text{ (остаточная матрица);} \quad (7)$$

$$\text{уравненные координаты} = \begin{pmatrix} X_{Appx} \\ Y_{Appx} \end{pmatrix} + \hat{\beta} = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 167918,298 \\ 2437627,4879 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Таблица 2

Измеренные величины, координаты исходных пунктов
и примерные координаты наблюдательной станции

Необработанные измерения				№ точки	$X(m)$	$Y(m)$
от	до	Направление	ГР (m)			
ATS1	REF 17	0,0000	123,3910	REF 17	167805,0602	2437675,0190
ATS1	REF 5	70,8982	89,8760	REF 5	167924,5025	2437717,1920
ATS1	REF 6	126,3632	42,4500	REF 6	167955,3246	2437649,3390
ATS1	REF 7	159,9258	47,3890	REF 7	167966,2719	2437625,3530
ATS1	REF 8	184,9401	72,3830	REF 8	167983,0784	2437593,9570
ATS1	REF 12	261,5299	105,5849	REF 12	167893,0537	2437525,1220
ATS1	REF 15	293,7660	67,7020	REF 15	167869,8829	2437580,8190
ATS1	REF 16	350,6363	143,2590	REF 16	167779,5090	2437660,4270
				$\approx ATS 1$	167918,9300	2437627,4890

Априорные СКП положения точки

$$a \text{ priori} = \left\{ \begin{matrix} \mu_0^2 = 1 \\ m_x = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{1,1}} \\ m_y = \mu_0 \cdot \sqrt{Q_{2,2}} \\ m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} m_x = 1,056 \cdot 10^{-4} \\ m_y = 7,124 \cdot 10^{-5} \\ m_{xy} = 1,008 \cdot 10^{-4} \end{matrix} \right\}; \quad (9)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{V^T \cdot P \cdot V}{r}}; \quad r = n - t. \quad (10)$$

Апостериорные (с учетом поправок) СКП положения точки

$$a \text{ posteriori} = \left\{ \begin{matrix} \mu = 0,787 \\ m_x = \mu \cdot \sqrt{Q_{1,1}} \\ m_y = \mu \cdot \sqrt{Q_{2,2}} \\ m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} m_x = 8,317 \cdot 10^{-5} \\ m_y = 5,609 \cdot 10^{-5} \\ m_{xy} = 7,932 \cdot 10^{-5} \end{matrix} \right\}. \quad (11)$$

Расчет был выполнен с использованием программного обеспечения MathCAD, и результаты показали, что даже априорные СКП положения определяемой точки (ATS1) $m_x, m_y = 0,101$, что меньше 0,193 мм (результат по первому способу). При вычислении же апостериорной СКП (с учетом поправки) был получен результат: $m_{xy} = 0,07932 \lll 0,193$ мм.

Та же процедура была сделана для вычисления точности ATS2, и результаты суммированы.

ATS 1. *Априорные СКП:* $m_x = 0,1056$ мм; $m_y = 0,07124$ мм; $m_{xy} = 0,1008$ мм.

Апостериорные СКП: $m_x = 0,08317$ мм; $m_y = 0,05609$ мм; $m_{xy} = 0,07932$ мм.

ATS 2. *Априорные СКП:* $m_x = 0,1492$ мм; $m_y = 0,1074$ мм; $m_{xy} = 0,1519$ мм.

Апостериорные СКП: $m_x = 0,03841$ мм; $m_y = 0,02766$ мм; $m_{xy} = 0,03911$ мм.

Таким образом, из приведенных результатов расчетов вытекает, что при определении координат станций наблюдений следует использовать модельный принцип на основе МНК. Речь идет главным образом о модельном определении координат и о предрасчете точности измерений, на базе которого наглядно возможен выбор места расположения тахеометрической станции.

Проектирование деформационной сети. Для оценки деформационного процесса обнажений выемки (S1 – S2 и S3 – S4, см. рис. 1) проведены тестовые расчеты ее напряженно-деформированного состояния (НДС), которые позволили определить количество и порядок размещения деформационных марок.

Моделирование выполнялось с использованием метода конечных элементов [11, 12]. Применялся программный комплекс «Недра» [13]. Расчетная модель представляет собой вертикальный срез грунтовой выемки (рис. 3, а). Размеры выемки соответствуют схеме (см. рис. 1) (цифрами обозначены расстояния в метрах). Выемка образована в крепких породах типа песчаника или гранита. В этой связи грунтовой массив моделировался с модулем упругости 10 ГПа. Породы основания сооружения имеют еще большую упругость 20 ГПа. Рассматривалась упругая задача о напряжениях. Размеры модели подобраны таким образом, чтобы обеспечивалось корректное решение задачи, и не было влияния краевых условий на возмущения в массиве от выемки. На границах модели приняты следующие условия: левая и правая границы неподвижны в горизонтальном направлении и разрешены вертикальные перемещения; нижняя граница закреплена в вертикальном направлении и свободна для горизонтальных смещений; верхняя граница не закреплена.

Результаты расчета смещений в горизонтальном направлении представлены на рис. 3, б.

Как видно, наибольшие смещения стенок ожидаются в средней части поверхности выемки, несколько больше в сторону ее подошвы.

Определено также, что разрушения в приконтурных областях выемки возможны, но когда прочность на одноосное сжатие превысит 1 МПа. С учетом того обстоятельства, что прочность песчаника и гранита пород существенно больше (>10 МПа), анализ смещений лишь по упругому расчету вполне корректен. Вместе с тем, нельзя исключать дефектность пород в приконтурной к выемке зоне, представленной трещиноватостью пород. Собственно по причине невозможности досконального предвидения процесса деформирования и выполняются геодезические наблюдения. В итоге на основе приведенных выкладок деформационные марки были размещены в средней части выемки (см. рис. 1), где по геометрическим условиям ожидаются наибольшие деформации. По вертикали заложены четыре ряда марок через шесть метров с отступом от земной поверхности на 4 м. Таким образом, деформационные марки охватывали всю зону максимальных смещений пород в боковых обнажениях выемки (рис. 3, б).

Оценка стабильности геодезической сети, алгоритм обнаружения смещений деформационных марок и возможных смещений исходных пунктов

Согласно теории ошибок и результатам анализа с использованием МНК, случайную ошибку можно отличить от систематической или грубой, проверив невязки и определив, соответствует ошибка нормальному распределению или нет. Такая же процедура может быть применена и для обнаружения деформации геодезической сети. Следовательно, использование МНК необходимо для мониторинга деформации, поскольку смещение может быть быстро обнаружено путем анализа и сравнения остаточной матрицы между двумя разными циклами наблюдений. На примере покажем, как определить, сместился ли исходный пункт, произошла ли деформация пород у марок или смещение тахеометрической станции.

Рис. 3. Результаты моделирования смещений боковых обнажений выемки:

а) модель выемки; б) распределение горизонтальных смещений в приконтурном к выемке массиве

Эллипс ошибок определяется с определенной доверительной вероятностью его большой полуосью (a) и малой осью (b), а также углом поворота (φ). Эллипс представляет собой ожидаемую величину ошибки (значение и направление), его возможно описать кругом радиуса (R) и тогда измеренные величины должны располагаться внутри этого круга, в противном случае либо измерения выполнены некорректно, либо имеет место деформация измеряемого объекта.

Формулы для элементов пересчитанного эллипса ожидаемого смещения и соответствующего круга смещения приведены ниже:

$$\lambda_1 = \frac{q_{\hat{x}\hat{x}_i} + q_{\hat{y}\hat{y}_i} + k}{2}; \quad (12)$$

$$\lambda_2 = \frac{q_{\hat{x}\hat{x}_i} + q_{\hat{y}\hat{y}_i} - k}{2}; \quad (13)$$

$$k = \sqrt{(q_{\hat{x}\hat{x}_i} - q_{\hat{y}\hat{y}_i})^2 + 4q_{\hat{x}\hat{y}_i}^2}; \quad (14)$$

$$a = \mu_0 \cdot \sqrt{\lambda_1 \cdot \chi_{2,1-\alpha}^2}; \quad (15)$$

$$b = \mu_0 \cdot \sqrt{\lambda_2 \cdot \chi_{2,1-\alpha}^2}; \quad (16)$$

$$R = \sqrt{a \cdot b}; \quad (17)$$

$$\operatorname{tg}(2\varphi) = \frac{2q_{\hat{x}\hat{y}_i}}{q_{\hat{x}\hat{x}_i} - q_{\hat{y}\hat{y}_i}}, \quad (18)$$

где $\chi_{2,1-\alpha}^2$ – распределение хи-квадрат для двух степеней свободы; α – вероятность события; $\alpha = 0,05$ для 95-процентной степени достоверности; φ – угол поворота эллипса; λ_1 и λ_2 – значения матрицы кофактора (Q); $q_{i,i}$ – элементы матрицы кофактора (Q).

В табл. 3 приведены соответствующие параметры эллипса и круга для 95-процентной степени достоверности с целью иллюстрации обнаружения смещений.

Таблица 3

Эллипс и круг для 95-процентной степени достоверности

	95-процентная степень достоверности эллипса и круга							
	априорные				апостериорные			
Точка	a (мм)	b (мм)	r (мм)	φ (градус)	a (мм)	b (мм)	r (мм)	φ (градус)
ATS 1	0,6524	0,39646	0,50858	17,77696	0,51364	0,31214	0,40041	17,77696
ATS 2	0,90446	0,62829	0,75383	12,34863	0,23292	0,1618	0,19413	12,34863

По начальным измерениям остаточная матрица V вычислена согласно уравнению (7). Для удобства рассмотрения деформаций назовем ее остаточной матрицей, которая сохраняется для сравнения с остаточными матрицами для различных случаев моделирования: вариант 1, точка 12 была смещена (изменение только горизонтального расстояния); вариант 2, точка 12 была смещена (изменение горизонтального направления и расстояния); вариант 3, все расстояния и направления были изменены.

В табл. 4 приведены вычисленные данные для определения вида ошибки (деформации).

Сравнивались остаточные матрицы в разных циклах наблюдений. Остаточная матрица начального наблюдения ($V_{\text{нач}}$) рассматривается как базовая.

В рассматриваемых случаях, когда изменяли горизонтальное расстояние между контрольной точкой Ref 12 и ATS1 на 5 мм (V_1), в результате сравнения матриц ($V_1 - V_{\text{нач}}$) определено значение 4,935 мм. Затем мы также изменили горизонтальное направление для Ref12 и, используя остаточную матрицу и сравнив ее с исходной матрицей ($V_2 - V_{\text{нач}}$), смогли найти деформацию, а также определить дополнительные смещения.

Обнаружение любого изменения в горизонтальном направлении может быть выполнено сравнением матриц ($V_2 - V_1$), где смещение определяется по максимальным значениям. При сравнении $V_3 - V_{\text{нач}}$ (третий случай) предполагается возможность смещения самой тахеометрической станции.

Немаловажно отметить, что задача оценки деформационных процессов напрямую зависит от точности измерений. Здесь возникает вопрос: использовать приборы высокой точ-

ности или менее точные, но по более усложненной схеме наблюдений. Последние и определяют целесообразность модельного определения этой схемы.

Следующие испытания выполнены для проверки способности вышеобозначенной модели обнаруживать смещения пунктов и их направления, включая исходные пункты.

Расстояния и направления до деформационных марок измерялись с помощью тахеометра Leica TM50 с точностью $\pm 0,6$ мм при измерении расстояний и 0,5 секунды для горизонтальных углов. Координаты тахеометрической станции (TS) определялись на основе традиционной обратной угловой засечки. При этом точность позиционирования рассчитывается по нижеследующим известным [1] формулам и показана в табл. 1

$$m_{xy}^2 = m_{\text{оз}}^2 + m_{\text{изм}i}^2; \quad (19)$$

$$m_{xy} = \sqrt{m_{\text{оз}}^2 + m_{\text{изм}i}^2}; \quad (20)$$

$$m_{\text{изм}i} = \sqrt{m_S^2 + \left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2 \cdot S^2}, \quad (21)$$

где S – измеренное горизонтальное расстояние; $m_{\text{оз}}$ – точность обратной засечки; m_S – паспортная точность прибора для измерения расстояния; m_β – паспортная точность прибора для измерения горизонтального угла.

Погрешность определения координат марок, полученная с одной станции (со станции ATS 1, см. табл.4), составила около 0,7 мм. В соответствии с нормативами при расчетных значениях осадок до 50 мм СКП измерений деформации не должна быть более 1 мм, а в эксплуатационный период – не более 0,5 мм (для песчаных грунтов).

Таблица 4

Данные для обнаружения деформаций с использованием остаточной матрицы

							Выявленные деформации (смещения)			
	Наименование исходной точки	$V_{\text{нач}}$	V_1	V_2	V_3	Единицы измерений	$V_1 - V_{\text{нач}}$	$V_2 - V_{\text{нач}}$	$V_2 - V_1$	$V_3 - V_{\text{нач}}$
Горизонтальные смещения	REF 17	0,634	0,658	1,016	-4,770	мм	0,024	0,382	0,358	-5,404
	REF 5	1,043	0,985	0,926	3,667	мм	-0,058	-0,116	-0,059	2,624
	REF 6	0,550	0,480	0,118	4,749	мм	-0,070	-0,432	-0,362	4,199
	REF 7	1,145	1,099	0,699	6,076	мм	-0,046	-0,446	-0,400	4,931
	REF 8	0,421	0,403	0,063	5,958	мм	-0,018	-0,358	-0,341	5,537
	REF 12	0,789	-4,146	-4,014	-2,575	мм	-4,935	-4,804	0,131	-3,364
	REF 15	0,163	0,236	0,550	-3,850	мм	0,073	0,387	0,314	-4,012
	REF 16	0,078	0,112	0,496	-5,064	мм	0,035	0,418	0,383	-5,142
Направления	REF 17	2,012	1,897	1,586	4,398	секунды	-0,116	-0,427	-0,311	2,386
	REF 5	2,350	2,247	1,331	-2,513	секунды	-0,104	-1,019	-0,916	-4,864
	REF 6	2,045	2,151	1,287	3,915	секунды	0,107	-0,758	-0,865	1,870
	REF 7	1,059	1,307	1,532	3,356	секунды	0,248	0,473	0,226	2,296
	REF 8	1,229	1,432	2,047	0,521	секунды	0,203	0,818	0,616	-0,708
	REF 12	0,936	1,002	-3,253	5,218	секунды	0,066	-4,189	-4,255	4,282
	REF 15	4,553	4,534	5,304	5,947	секунды	-0,019	0,751	0,770	1,395
	REF 16	1,930	1,837	1,657	4,567	секунды	-0,093	-0,273	-0,180	2,637

Таблица 5

Результаты оценки точности наблюдений с одной станции наблюдения

		A	B	C	D	E	F
$m_{\text{изм}}$ (станция ATS1)	ГР (м)	68,1814	82,4553	96,7345	98,0312	84,0006	70,0012
	$m_{1\text{изм}}$ (мм)	0,6883	0,7111	0,7351	0,7374	0,7137	0,6912
	$m_1 = \sqrt{m_{\text{оз}}^2 + m_{\text{изм}1}^2}$ (мм)	0,7148	0,7368	0,76	0,7622	0,7393	0,7176
$m_{\text{изм}}$ (станция ATS2)	ГР (м)	95,6685	81,7117	67,997	64,7207	78,9916	93,3628
	$m_{2\text{изм}}$ (мм)	0,7333	0,7099	0,688	0,683	0,7055	0,7294
	$m_2 = \sqrt{m_{\text{оз}}^2 + m_{\text{изм}2}^2}$ (мм)	1,0247	1,0081	0,9928	0,9894	1,005	1,0219

Для повышения точности использованы дополнительные измерения и их обработка по МНК. Начальное приближение координат деформационных марок получили путем усреднения координат, полученных путем вычисления координат контрольных точек (ATS1 и ATS2, приближенные координаты необхо-

димы для улучшения процесса сходимости итерационного процесса).

В соответствии с уравнениями (2)–(11) вычисляем матрицы В, Р и W. В табл. 7 показаны Априорные СКП и Апостериорные СКП. Видно, что точность наблюдений повысилась относительно паспортной точности.

Таблица 6

Результаты измерений и приближенные координаты

Значения						
от	до	Направления (градусы)	Расстояния (м)	Наименования пунктов	Координаты	
					X (м)	Y (м)
ATSI	A	48,1948	68,1814	ATSI	167918,9298	2437627,4879
	B	47,0275	82,4553	ATS2	167837,1959	2437766,9154
	C	46,2948	96,7345	≈ A	167896,565	2437691,897
	D	31,4719	98,0312	≈ B	167890,302	2437704,814
	E	29,7458	84,0006	≈ C	167884,187	2437717,768
	F	27,2720	70,0012	≈ D	167861,487	2437706,926
ATS2	A	22,6880	95,6685	≈ E	167867,680	2437694,043
	B	20,5106	81,7117	≈ F	167873,867	2437681,056
	C	17,3309	67,9970			
	D	39,0020	64,7207			
	E	38,3452	78,9916			
	F	37,9181	93,3628			

Таблица 7

Погрешности определения координат марок после обработки измерений с двух станций

		Априорный (мм)	Апостериорный (мм)	Априорный (мм)		Апостериорный (мм)	
A	m_x	0,2	0,04	$m_{xy(m)}$	0,4	$m_{xy(m)}$	0,09
	m_y	0,4	0,08				
B	m_x	0,2	0,05	$m_{xy(m)}$	0,4	$m_{xy(m)}$	0,09
	m_y	0,4	0,07				
C	m_x	0,3	0,05	$m_{xy(m)}$	0,4	$m_{xy(m)}$	0,09
	m_y	0,3	0,07				
D	m_x	0,2	0,05	$m_{xy(m)}$	0,5	$m_{xy(m)}$	0,09
	m_y	0,4	0,08				
E	m_x	0,3	0,05	$m_{xy(m)}$	0,5	$m_{xy(m)}$	0,09
	m_y	0,4	0,08				
F	m_x	0,3	0,05	$m_{xy(m)}$	0,5	$m_{xy(m)}$	0,09
	m_y	0,4	0,07				

На рис. 4 представлена диаграмма, демонстрирующая значительное различие и увеличение точности определения координат при избыточных измерениях и использовании МНК, которая обосновывает необходимость его использования в работах по мониторингу.

Однако для обоснования и обеспечения достоверности и достаточности результатов необходимо сравнить предварительно рассчитанную точность с допустимой ошибкой

и допустимой точностью наблюдения, а затем может быть принято решение.

Достоверность и надежность результатов измерений и оценки деформации определяется по эллипсу ошибок, по которому также можно отличить ошибку измерений от деформаций (смещений марки). Рассчитав радиус (R) 95 % доверительного круга (по эллипсу ошибок), сравнивают его с вычисленными деформациями и если значение деформации превышает радиус R ($\Delta > R$), то она достоверна.

Рис. 4. Погрешности определения координат деформационных марок (упрощенный способ и МНК)

Таким образом, полученная точность определения координат деформационных марок отвечает требованиям, указанным в нормативном документе «Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений. Грунты» (ГОСТ 24846–2012, Межгосударственный стандарт). Согласно этому ГОСТ допустимая погрешность измерения перемещений составляет 1 мм при расчетном значении вертикальных или горизонтальных перемещений до 50 мм.

Заключение

В статье представлен пример оценки точности геодезической сети специального назначения. Приведена предварительная оценка точно-

сти наблюдений при строительстве метро в Эр-Рияде (Саудовская Аравия) и выбраны схемы расположения пунктов геодезической сети для получения требуемой точности. При этом рассмотрен вопрос о выборе места расположения станций наблюдения, их количестве. Выполнен предрасчет деформированного состояния грунтовой выемки, что позволило обоснованно разместить деформационные марки.

Продемонстрировано использование при определении координат тахеометрической станции и деформационных марок традиционного (одноформульного) расчета и по МНК. Показана эффективность разработанной схемы мониторинга. Приведен алгоритм оценки деформаций по остаточным матрицам, а также по доверительному кругу ошибок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Большаков В. Д., Ключин Е. Б., Васютинский И. Ю. Геодезия: Изыскания и проектирование инженерных сооружений : справ. пособие. – М. : Недра, 1991. – 238 с.
2. Ключин Е. Б., Заки М. З. Э.-Ш., Власенко Е. П. Оценка точности обратной угловой засечки // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2008. – № 3. – С. 31–39.
3. Падве В. А., Мазуров Б. Т. Метод наименьших квадратов (статика, динамика, модели с уточняемой структурой) // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 22–35.
4. Caspary W. F., Haen W., Borutta H. Deformation analysis by statistical methods // Technometrics. – 1990. – Vol. 32, No. 1. – P. 49–57.
5. Even-Tzur G. Datum definition and its influence on the reliability of geodetic networks. Zeitschrift für Vermessungswes. – 2006. – Vol. 131, No. 2. – P. 87–95.

6. Grafarend E. W., Sansò F. Optimization and design of geodetic networks. – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo : Springer Science & Business Media, 2012. – 698 p.
7. Horizontal deformation rate analysis based on multiepoch GPS measurements in Shanghai / J. Cai, J. Wang, J. Wu, C. Hu, E. Grafarend, J. Chen // J. Surv. Eng. – 2008. – Vol. 134, No. 4. – P. 132–137.
8. Hekimoglu S., Erdogan B., Butterworth S. Increasing the efficacy of the conventional deformation analysis methods: alternative strategy // J. Surv. Eng. – 2010. – Vol. 136, No. 2. – P. 53–62.
9. Aydin C., Demirel H. Computation of Baarda's lower bound of the non-centrality parameter // J. Geod. – 2004. – Vol. 78, No. 7–8. – P. 437–441.
10. Schaffrin B., Bock Y. Geodetic deformation analysis based on robust inverse theory // Manuscripta Geod. – 1994. – Vol. 19, No. 1. – 31 p.
11. Солопчук М. С. Харитонов А. О. Моделирование по методу конечных элементов движения грани на криволинейной деке // Успехи в химии и химической технологии. – 2015. – Том. 29, № 2 (161). – С. 46–47.
12. Schaffrin B. New estimation/prediction techniques for the determination of crustal deformations in the presence of prior geophysical information // Tectonophysics. – 1986. – Vol. 130, No. 1–4. – P. 361–367.
13. Шек В. М., Е. А. Конкин, Литвинов А. Г. Программный комплекс «Недра» подсистемы геолого-маркшейдерского обеспечения АСУ горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 9. – С. 230–235.

Получено 15.04.2020

© Х. М. Хатум, М. Г. Мустафин, 2020

METHODOLOGY FOR DESIGNING AND EVALUATING RESULTS OF GEODESIC OBSERVATIONS OF ENGINEERING STRUCTURES USING THE LEAST SQUARE METHOD

Habib Mazen Hatoum

St. Petersburg Mining University, 2, Vasilievsky Island, 21 line, St. Petersburg, 199106, Russia, Ph. D. Student, Department of Engineering Geodesy, phone: (952)234-69-86, e-mail: habib.hatoum@gmail.com

Murat G. Mustafin

St. Petersburg Mining University, 2, Vasilievsky Island, 21 line, St. Petersburg, 199106, Russia, D. Sc., Professor, Head of the Department of Engineering Geodesy, phone: (812)328-86-84, e-mail: mustafinm@mail.ru

In geodetic practice, the use of robotic total stations in monitoring the deformation processes becomes the norm. In this case, various software systems for processing the measured values and their visualization are used. At the same time, issues of optimizing the deformation network and interpreting the results of observations remain very relevant today. In addition, ensuring the stability of control (initial) points still remains a problem in solving various tasks, and above all in monitoring observations. Previously, it was apriori assumed that the starting points located outside the zone of influence of the observed object are considered stable. However, to achieve reliable results with various measurements, the stability of the starting points should be checked and this should be considered as an additional monitoring parameter. There are developments in this direction, and they are related to the consideration of displacements and deformation marks and starting points in a single system (network). The research results presented in this article are novel in terms of the methodology and algorithm for calculating the coordinates of observation stations, deformation marks, and starting points without building a single network. At the same time, each observation cycle provides an assessment of the stability of all points. The observation technique was developed in relation to the construction of an engineering structure: an excavation for the subway lobby. The issues of optimizing the location of observation stations, deformation marks (points), and assessing the accuracy of their displacements are successively considered. When analyzing the relative displacements of the deformation marks, the ellipses of the error of the position of the points are compared. If the resulting displacement between the measurement cycles goes beyond this ellipse, then speaking about the significance of the displacement and its direction is allowed. A simplified method for detecting the displacements of the starting points by comparing the elements of the residual matrices determined in different observation cycles is also considered.

Keywords: monitoring, engineering structures, geodetic observations, least squares method, reference points, deformation network, displacements, deformations

REFERENCES

1. Bolshakov, V. D., Klyushin, E. B., & Vasyutinsky, I. Yu. (1991). *Geodeziya: Izyskaniya i proektirovanie inzhenernykh sooruzheniy* [Geodesy: Surveys and design of engineering structures: a reference guide]. Moscow: Nedra Publ., 238 p. [in Russian].
2. Klyushin, E. B., Zaki, M. Z. E.-Sh., & Vlasenko, E. P. (2008). Evaluation of the accuracy of the reverse angular notch. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka* [Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotography], 3, 31–39 [in Russian].
3. Padve, V. A., & Mazurov, B. T. (2017). Least squares method (static, dynamic, refined structure models). *Vestnik SGUGiT* [Vestnik SSUGT], 22(2), 22–35 [in Russian].
4. Caspary, W. F., Haen, W., & Borutta, H. (1990). Deformation analysis by statistical methods. *Technometrics*, 32(1), 49–57.
5. Even-Tzur, G. (2006). Datum definition and its influence on the reliability of geodetic networks. *Zeitschrift für Vermessungswes*, 131(2), 87–95.
6. Grafarend, E. W., & Sansò, F. (2012). *Optimization and design of geodetic networks*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer Science & Business Media, 698 p.
7. Cai, J., Wang, J., Wu, J., Hu, C., Grafarend, E., & Chen, J. (2008). Horizontal deformation rate analysis based on multipoint GPS measurements in Shanghai. *J. Surv. Eng.*, 134(4), 132–137.
8. Hekimoglu, S., Erdogan, B., & Butterworth, S. (2010). Increasing the efficacy of the conventional deformation analysis methods: alternative strategy. *J. Surv. Eng.*, 136(2), 53–62.
9. Aydin, C., & Demirel, H. (2004). Computation of Baarda's lower bound of the non-centrality parameter. *J. Geod.*, 78(7–8), 437–441.
10. Schaffrin, B., & Bock, Y. (1994). Geodetic deformation analysis based on robust inverse theory. *Manuscripta Geod.*, 19(1), 31 p.
11. Solopchuk, M. S., & Kharitonov, A. O. (2015). Modeling by the method of finite elements of the movement of granules on a curved deck. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in Chemistry and Chemical Technology], Vol. 29, No. 2 (161), 46–47 [in Russian].
12. Schaffrin, B. (1986). New estimation/prediction techniques for the determination of crustal deformations in the presence of prior geophysical information. *Tectonophysics*, 130(1–4), 361–367.
13. Shek, V. M., Konkin, E. A., & Litvinov, A. (2007). The "Nedra" software package of the subsystem for geological and mine surveying support of a utomated control systems for mining enterprises. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mountain Information and Analytical Bulletin], 9, 230–235 [in Russian].

Received 15.04.2020

© Habib Mazen Hatoum, M. G. Mustafin, 2020

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ

УДК 528.8:004.9

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-58-67

СОЗДАНИЕ МЕТРИЧЕСКОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ «ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА» АКТИВНЫМ МЕТОДОМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Максим Александрович Алтынцев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (952)915-29-80, e-mail: mnbcv@mail.ru

Павел Александрович Карпик

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, магистрант, тел. (983)319-08-09, e-mail: karpikpavel@yandex.ru

В последнее время активно развивается направление, посвященное созданию трехмерных метрических имитационных моделей цифровых двойников. Цель создания цифровых двойников заключается в возможности переноса сложных технологических производственных процессов, которые выполняются во время наблюдений за состоянием реальных объектов, в компьютерную среду, где сначала формируется информационная трехмерная модель. В условиях проектирования, строительства и эксплуатации реальных объектов при внесении в них изменений ключевыми являются требования точности и оперативности. Данным требованиям удовлетворяет такой активный метод дистанционного зондирования Земли, как лазерное сканирование. Для моделирования объектов на сравнительно небольшой площади с целью достижения максимальной точности применяют наземное лазерное сканирование. Задача создания моделей цифровых двойников предъявляет повышенные требования к выбору методики полевого этапа лазерного сканирования и имеет множество особенностей при выполнении трехмерного моделирования по полевым данным. В статье предложена методика трехмерного моделирования с целью создания информационных моделей сооружений. Выполнен анализ точности результатов наземного лазерного сканирования. В качестве объекта исследования было выбрано подлежащее реконструкции складское помещение. На примере данных лазерного сканирования этого объекта было показано, что рассматриваемый метод позволяет обеспечить точность построения трехмерной информационной модели до 1 см.

Ключевые слова: активные методы дистанционного зондирования Земли, наземное лазерное сканирование, трехмерное моделирование, информационная модель здания, цифровой двойник, имитационная модель

Введение

Методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) широко распространены во многих сферах производственной деятельности человека. ДЗЗ является процессом,

в ходе которого выполняется сбор данных об объекте и окружающей его территории без непосредственного контакта с ними. К ДЗЗ относятся съемки, выполняемые с воздушных и космических летательных аппаратов, подводных лодок и судов, наземных стан-

ций. В зависимости от источника энергии методы ДЗЗ разделяют на пассивные и активные. Пассивные методы основаны на регистрации отраженной от объекта съемки солнечной энергии или собственного электромагнитного излучения его поверхности. Выделяют фотографические, оптико-механические и оптико-электронные пассивные съемочные системы. В результате съемки с применением пассивных методов получают снимки в различных диапазонах электромагнитного спектра от 0,25 мкм до 1 м. Активные методы основаны на том, что съемочная система посылает сигнал собственного источника энергии до объекта, а затем регистрирует отражение сигнала с помощью приемника излучения. Выделяют радиолокационные и лазерные активные съемочные системы. Преимуществом активных методов является большая чувствительность и точность измерений, возможность фиксации множественных отражений по пути следования излучения [1, 2].

Среди описанных методов ДЗЗ наивысшей точности измерений достигают посредством применения лазерных съемочных систем, установленных на наземных станциях. В этом случае процесс съемки называют наземным лазерным сканированием (НЛС). НЛС позволяет получать точечные модели территорий с высокой плотностью до нескольких точек на квадратный сантиметр и миллиметровой точностью, которые используются для решения различных топографических и инженерных задач.

Метод НЛС является наиболее оптимальным источником данных для решения задач трехмерного моделирования, в процессе которого выполняется построение координатно-метрических каркасных, поверхностных и твердотельных моделей реальных объектов с высокой степенью детализации. Преимуществом данного метода является также высокая скорость сбора информации на большой по площади территории с любой степенью застройки. Это позволяет, например, оперативно выполнять надежный контроль в процессе строительства и эксплуатации сооружений гражданской и производственной сферы. Трехмерные модели, создаваемые по данным НЛС, также являются основой для

построения более технологически сложных видов моделей – информационных и моделей цифровых двойников [3].

Создание информационных моделей и моделей «цифровых двойников»

Концепция информационной модели была предложена еще в 1974 г. [4]. Тогда она получила название BDS (building description system), что означает «система описания зданий». Суть этой концепции заключалась в создании чертежей зданий и их хранении в компьютерных базах данных. Дополнительно к геометрическим данным хранилась атрибутивная информация, описывающая составные элементы зданий, такие как крыша, стены, окна, двери, колонны и др., включая порядок следования материалов, из которых создаются эти элементы. Полное описание здания должно было производиться на определенный момент времени с возможностью обновления в будущем [4, 5]. Современное представление данной концепции отражено в виде термина «информационная модель здания» BIM (building information model). Данный термин был введен Г. А. ван Недервином и Ф. П. Толманом в 1992 г. [6].

Процесс информационного моделирования затрагивает все этапы жизненного цикла объекта от планирования и составления технического задания до его строительства, эксплуатации, ремонта и даже демонтажа. Современная BIM модель представляется в трехмерном виде, работа с ней производится в единой информационной среде с возможностью внесения изменений на различных этапах всеми участниками моделирования [5]. BIM модель отражает данные об объекте на определенный момент времени.

Дальнейшим развитием концепции цифрового моделирования стало появление понятия «цифровой двойник». Концепция «цифрового двойника» впервые была представлена в 2003 г. профессором Мичиганского университета Майклом Гривзом [7]. «Цифровой двойник» существенно расширяет понятие BIM.

Под цифровым двойником понимают компьютерную модель, которая копирует

поведение реального физического объекта. Модель цифрового двойника в течение всего цикла существования физического объекта симулирует режимы его работы, учитывая все внешние факторы и процессы управления, а также позволяет выполнить прогноз состояния развития данного объекта. Процесс создания цифрового двойника основан на имитационном моделировании, при котором в компьютерной среде возможно проводить испытания физических объектов, выполнять оптимизацию сложного производственного оборудования, предсказывать аварийные ситуации. Имитационная модель является универсальным средством исследования физических объектов и отдельных элементов сложных систем, описывает способы их взаимодействия, которые отражают последовательность действий, выполняемых в моделируемой системе [8–10].

Создание модели цифрового двойника сопровождается сложными технологическими процессами, и чтобы модель наиболее полно отражала сущность реального объекта, должны применяться исходные данные, полученные с максимально возможной точностью и детальностью. Данные НЛС среди всех методов ДЗЗ наилучшим образом соответствуют этим критериям. Каждый объект моделирования или группа объектов чаще всего представляют собой уникальные сооружения. При лазерном сканировании таких сооружений требуется учитывать их особенности. В зависимости от имеющегося геодезического оборудования, особенностей объекта моделирования и его

назначения применяют определенные методики лазерного сканирования, включающие создание технического проекта, рекогносцировку местности, создание съемочного обоснования, непосредственно лазерное сканирование, камеральную обработку его результатов [3, 11–20].

Наземное лазерное сканирование складского помещения

Весной 2020 г. Сибирским государственным университетом геосистем и технологий было выполнено лазерное сканирование подвещающегося реконструкции складского помещения, находящегося в г. Новосибирске. Целью сканирования являлось получение трехмерной информационной модели сооружения с точностью взаимного отображения несущих конструкций до 1 см и с возможностью дальнейшего обновления полученной модели в ходе реконструкции. Площадь сооружения составила 9 000 м². Съемка была выполнена с помощью наземного лазерного сканера Leica ScanStation 2, позволяющего измерять координаты точек объекта с точностью до 6 мм. На рис. 1 приведены фрагменты сканируемого помещения внутри и снаружи.

Лазерное сканирование было выполнено с 18 станций. Для взаимного ориентирования сканов применялись черно-белые марки, размещенные на стенах и колоннах по периметру помещения, а также марка Leica HDS (рис. 2). Всего было применено 33 марки.

Рис. 1. Фотографии складского помещения

Рис. 2. Сканерные марки:

а) черно-белая марка; б) марка Leica HDS

На рис. 3 приведена схема размещения марок, сканерных станций и результат уравнивания данных НЛС. Цвет отображения отдельных точек массива ТЛО определяется значениями их отметок.

Рис. 3. Схема размещения марок и сканерных станций:

S1–S18 – станции сканирования; B1–B31 – черно-белые марки; HDS1 – марка Leica HDS; TOPO1–TOPO4 – точки с топографического плана для внешнего ориентирования результатов лазерного сканирования

С каждой станции выполнялся скан с линейным разрешением 10 см по горизонтали и 3 см по вертикали на расстоянии 50 м от сканера, а также детальное с максимальным разрешением сканирование 5–6 марок, размещенных на противоположных стенах и близлежащих колоннах. Среди данных марок в зонах взаимного перекрытия соседних сканов оказывалось 3–4. Разрешение панорамного скана выбиралось исходя из обеспечения необходимой плотности данных и приемлемого времени сканирования. Угол сканирования по вертикали задавался в диапазоне от минус 30 до 45°. Детально отсканированные марки применялись для автоматического взаимного ориентирования сканов. Оценка точности взаимного ориентирования сканов приведена в табл. 1.

Таблица 1

Оценка точности результатов взаимного ориентирования сканов

Вид ошибки	По маркам		
	X, м	Y, м	Z, м
Средняя ошибка	0,002	0,001	0,001
Средняя квадратическая ошибка	0,002	0,001	0,001
Максимальная ошибка	0,012	0,005	0,004

Для создания трехмерной информационной модели складского помещения требовалось получение точечной модели только с максимальной точностью взаимного положения объектов. Поэтому определение координат марок и сканерных станций во внешней системе координат не выполнялось. Ориентирование точечной модели во внешнюю систему осуществлялось с помощью координат четырех характерных точек, измеренных по топографическому плану. Фрагмент топографического плана приведен на рис. 4. Положение характерных точек показано на рис. 3. В табл. 2 приведена оценка точности внешнего ориентирования точечной модели.

Рис. 4. Фрагмент топографического плана масштаба 1 : 500 для внешнего ориентирования сканов

Таблица 2

Оценка точности результатов внешнего ориентирования точечной модели

Вид ошибки	По точкам ТОР01–ТОР04		
	X, м	Y, м	Z, м
Средняя ошибка	0,075	0,068	0,037
Средняя квадратическая ошибка	0,081	0,073	0,040
Максимальная ошибка	0,123	0,082	0,075

Полученная точечная модель далее была классифицирована на точки класса «земля» и все остальные. По точкам класса «земля» выполнялось построение цифровой модели рельефа (ЦМР), которая в дальнейшем использовалась как часть информационной модели здания.

Создание трехмерной информационной модели складского помещения

Для создания трехмерных информационных моделей и моделей цифровых двойников

применяется специализированное программное обеспечение (ПО). Такое ПО содержит большую библиотеку элементов, соответствующих определенным строительным нормам и правилам, включает возможности по созданию собственных элементов и назначению им соответствующих свойств. В отличие от многих других программ трехмерного моделирования и систем автоматизированного проектирования (САПР), в программах, поддерживающих BIM технологии, можно, например, не просто создавать твердотельный элемент, соответствующий элементу здания, но и назначать ему определенный класс (стена, балка, крыша и т. д.) и выбирать его материал.

Как правило, специализированное ПО информационного моделирования не содержит определенных инструментов, позволяющих в автоматизированном режиме вписывать трехмерные элементы в точечную модель. Моделирование выполняется интерактивным методом. Наличие автоматизированных инструментов трехмерного моделирования в большей степени присуще программам, нацеленным на обработку данных лазерного сканирования. ПО Leica Cyclone, используемое лазерным сканером ScanStation 2, включает наиболее мощные автоматизированные инструменты, но не поддерживает BIM технологии. Поэтому компанией Leica для различных программ информационного моделирования и систем автоматизированного проектирования был разработан специальный плагин CloudWorx, позволяющий загружать базу данных, созданную в ПО Cyclone. Одной из таких программ информационного моделирования является Autodesk Revit. В данном случае плагин CloudWorx позволяет использовать многие автоматизированные инструменты из ПО Leica Cyclone в системе Revit [21].

В случае отсутствия плагина CloudWorx возможно выполнить трехмерное моделирование в Cyclone, а затем результаты импортировать в Revit. Недостатком данного способа является необходимость осуществления большого количества операций по редактированию трехмерной модели после импорта для того, чтобы она стала информационной. По этой причине часто проще выполнить импорт исходной точечной модели в систему BIM, где с самого начала осуществить процесс информа-

ционного моделирования. Данным способом было выполнено создание информационной модели складского помещения.

Методика моделирования помещения в Revit осуществлялась в следующем порядке:

- импорт точечной модели;
- импорт ЦМР в виде триангуляционной поверхности;
- задание временной системы координат с ориентированием оси Y вдоль длинной стороны помещения;
- трехмерное моделирование посредством вписывания элементов из библиотеки в массив ТЛО и редактирования их размеров и свойств в следующей последовательности: колонны; крепящиеся к колоннам балки; стены; балки крыши;
- создание поверхности крыши из металлопрофиля по формообразующим;
- назначение текстур трехмерным элементам;

– ввод атрибутивной информации.

На рис. 5 показано сечение результата трехмерного моделирования участка помещения, соответствующего колонне, балке и крыше. В процессе вписывания трехмерных элементов в точечную модель измерялись расстояния между гранями трехмерных элементов и соответствующими гранями в точечной модели. Если вписываемый элемент отклонялся в некоторых сечениях от точечной модели более чем на 1 см, элемент разбивался на составные части.

На рис. 6 приведен итоговый результат трехмерного информационного моделирования. Созданная в Revit информационная модель складского помещения в процессе его реконструкции и повторного лазерного сканирования может быть оперативно обновлена. Данная информационная модель может служить в качестве исходного материала для создания модели цифрового двойника.

Рис. 5. Результаты трехмерного моделирования фрагмента помещения:

а) точечная модель; б) точечная и трехмерная модель; в) трехмерная модель

Рис. 6. Результаты трехмерного моделирования складского помещения:

а) точечная модель; б) трехмерная модель

Заключение

Среди всех активных методов ДЗЗ для создания цифровых трехмерных информационных моделей и моделей цифровых двойников отдельных сооружений за счет своей высокой точности и детальности наиболее оптимальным является метод НЛС. Созданная информационная модель складского помещения описывает состояние реального объекта, включая его тип, материал. Ошибка вписывания трехмерных элементов несущих конструкций, стен и крыши в массив ТЛО не превысила 1 см.

Данная информационная модель может являться основой для формирования имитационной модели «цифрового двойника». Создание трехмерных имитационных моделей позволяет значительно упростить производственные процессы при решении широкого круга задач в различных отраслях, одной из которых является нефтегазовая.

Например, в нефтегазовой отрасли трехмерное имитационное моделирование позволяет осуществлять контроль состояния различных сооружений, в частности защитных.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Разработка теории и технологических решений контроля состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов методами активного дистанционного зондирования», № 0807-2020-0002).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сутырина Е. Н. Дистанционное зондирование Земли : учеб. пособие. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2013. – 165 с.
2. Назаров А. С. Фотограмметрия : учеб. пособие для студентов. – Минск : ТетраСистемс, 2006. – 368 с.
3. Алтынцев М. А., Карпик П. А. Методика создания цифровых трехмерных моделей объектов инфраструктуры нефтегазодобывающих комплексов с применением наземного лазерного сканирования // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 121–139.
4. Eastman C., Fisher D., Lafue G., Lividini J., Stoker D., Yessios C. An Outline of the Building Description System / Institute of Physical Planning, Carnegie-Mellon University, 1974. – № 50.
5. Рыбин Е. Н., Амбарян С. К., Аносов В. В., Гальцев Д. В., Фахратов М. А. BIM-технологии // Изв. вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2019. – Т. 1, № 1 (28). – С. 98–105.
6. Van Nederveen G. A., Tolman F. P. Modelling multiple views on buildings // Automation in Construction. – 1992. – Vol. 1 (3). – С. 215–224.
7. Grieves M. W. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. – LLC, 2014. – 7 p.
8. Кокорев Д. С., Юрин А. А. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса // Colloquium-journal. – 2019. – № 10 (34). – С. 31–35.
9. Васильев А. Н., Тархов Д. А., Малыхина Г. Ф. Методы создания цифровых двойников на основе нейросетевого моделирования // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2018. – Т. 14, № 3. – С. 521–532.
10. Петров А. В. Имитация как основа технологии цифровых двойников. // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 10. – С. 56–66.
11. Середович В. А., Комиссаров А. В., Комиссаров Д. В., Широкова Т. А. Наземное лазерное сканирование : монография. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с.
12. Середович В. А., Алтынцев М. А., Попов Р. А. Особенности применения данных различных видов лазерного сканирования при мониторинге природных и промышленных объектов // Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 18.1. – С. 141–144.
13. Комиссаров Д. В., Миллер Е. В., Аверков М. А., Загородний В. В. Построение трехмерных моделей спортивных сооружений средствами лазерного сканирования (на примере Новосибирского биатлонного комплекса) // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск : СГГА, 2005. Т. 1, ч. 1. – С. 216–220.
14. Ткачева А. А., Фаворская М. Н. Моделирование трехмерных сцен лесных участков по данным лазерного сканирования и аэрофотоснимкам // Информационно-управляющие системы. – 2015. – № 6. – С. 40–49.

15. Середович В. А., Середович А. В., Комиссаров А. В., Радченко А. В., Дементьева О. А., Радченко Л. К., Усиков А. В. Особенности создания цифровых моделей городских территорий средствами наземного лазерного сканирования // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск : СГГА, 2009. Т. 1, ч. 1. – С. 136–140.
16. Herban I., Vilceanu C. B. Terrestrial laser scanning used for 3D modeling // 12th International Multi-disciplinary Scientific GeoConference, 2012.
17. Катрич А. Е., Барина Т. А. Обработка данных наземного лазерного сканирования для получения 3D-моделей объектов / «Научные достижения и открытия современной молодежи» : сб. статей победителей международной научно-практической конференции: в 2-х частях. – Пенза : Наука и просвещение, 2017. – С. 1213–1215.
18. Иванов А. В., Горохова Е. И., Горохова Л. И., Мурашев К. В. Создание 3D-модели планетария СГГА по данным наземного лазерного сканирования для модернизации звездного зала // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 150–155.
19. Комиссаров А. В., Аманова А. К., Широкова Т. А. Разработка методики трехмерного моделирования объектов ситуации и рельефа городской территории по данным наземного лазерного сканирования г. Томска // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 1, ч. 3. – С. 79–83.
20. Алтынцев М. А., Чернов А. В. Применение технологии лазерного сканирования для моделирования объектов недвижимости в 3D-кадастре // Геодезия и картография. – 2018. – Т. 79. – № 9. – С. 52–63.
21. Программное обеспечение Leica CloudWorx Revit [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.geooptic.ru/product/leica-cloudworx-revit>.

Получено 20.08.2020

© М. А. Алтынцев, П. А. Карпик, 2020

CREATING METRIC SIMULATED MODEL OF A "DIGITAL TWIN" BY THE ACTIVE EARTH REMOTE SENSING METHOD

Maxim A. Altyntsev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D, Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (952)915-29-80, e-mail: mnbcv@mail.ru

Pavel A. Karpik

Novosibirsk State University, 1, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia, Graduate, phone: (983)319-08-09, e-mail: karpikpavel@yandex.ru

Recently, a line of research devoted to the creation of three-dimensional metric simulated models of digital twins has been actively developing. The goal of creating digital twins is to transfer the complicated manufacturing processes, that are performed while monitoring the state of real objects, to a computer environment where a three-dimensional information model was first created. The key requirements are accuracy and efficiency within the conditions of design, construction and operation of real objects when making changes to them. These requirements are met by an active method of the Earth remote sensing, such as laser scanning. Terrestrial laser scanning is used to model objects over a relatively small area and to achieve maximum accuracy. The task of creating digital twin models poses higher requirements for choosing a field stage laser scanning technique and has many features when performing three-dimensional modeling using field data. The article proposes technique of three-dimensional modeling for creating building information models. It analyses the accuracy of the terrestrial laser scanning results. A warehouse space to be reconstructed was selected as the subject of the study. Using the example of laser scanning data for this object, it was indicated that the method under consideration allows ensuring the accuracy of creating a three-dimensional information model

up to 1 cm. The laser scanning data of the object show that the considered method ensures 3D information model accuracy up to 1 cm.

Keywords: active Earth remote sensing methods, terrestrial laser scanning, 3D modelling, building information model, digital twin, simulated model

REFERENCES

1. Sutyryna, A. A. (2013). *Distantstionnoe zondirovanie Zemli [Earth remote sensing]*. Irkutsk: ISU Publ., 165 p. [in Russian].
2. Nazarov, A. S. (2006). *Fotogrammetriya [Photogrammetry]*. Minsk: Tetrasistems Publ., 368 p. [in Russian].
3. Altyntsev, M. A., & Karpik, P. A. (2020). The technique for creating digital three-dimensional models of oil and gas manufacturing facility object infrastructure using terrestrial laser scanning. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(2), 121–139 [in Russian].
4. Eastman, C., Fisher, D., Lafue, G., Lividini, J., Stoker, D., & Yessios, C. (1974). *An Outline of the Building Description System: No. 50*. Institute of Physical Planning, Carnegie-Mellon University.
5. Rybin, E. N., Ambaryan, S. K., Anosov, V. V., Galcev, D. V., & Fakhratov, M. A. (2019). BIM technology. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real Estate, I*, 1(28), 98–105 [in Russian].
6. Van Nederveen, G. A., & Tolman, F. P. (1992). Modelling multiple views on buildings. *Automation in Construction*, 1(3), 215–224.
7. Grieves, M. W. (2014). *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. LLC Publ., 7 p.
8. Kokorev, D. S., & Yurin, A. A. (2019). Digital twins: concept, types and benefits for business. *Colloquium-Journal*, 10(34), 31–35 [in Russian].
9. Vasiliev, G. G., Salnikov, A. P., Katanov, A. A., Lezhnev, M. A., Leonovich I. A., & Likhovtsev, M. V. (2014). About application of surface laser scanning in the oil and gas industry. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie [Science & Technologies: Oil and Gas Products Pipeline Transportation]*, 4(16), 47–51 [in Russian].
10. Petrov, A. V. (2018). Simulation as the basis of digital twin technology. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 22(10), 56–66 [in Russian].
11. Seredovich, V. A., Komissarov, A. V., Komissarov, D. V., & Shirokova, T. A. (2009). *Nazemnoe lazernoe skanirovanie [Terrestrial laser scanning]*. Novosibirsk: SSGA Publ, 261 p. [in Russian].
12. Seredovich, V. A., Altyntsev M. A., & Popov, R. A. (2013). Features of different laser scanning data type application in monitoring of natural and industrial objects. *Vychislitel'nye tekhnologii [Computational Technologies]*, 18.1, 141–144 [in Russian].
13. Komissarov, D. V., Miller, E. V., Averkov, M. A., & Zagorodniy, V. V. (2005). Generating three-dimensional models of sports facilities by means of laser scanning (on the example of Novosibirsk biathlon complex). In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2005: T. 1, ch. 1 [Proceedings of GEO-Siberia-2005: Vol. 5]* (pp. 216–220). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
14. Tkacheva, A. A., & Favorskaya, M. N. (2015). Modeling of 3D Forest Scenes by Laser Scanning and Air Photo Data. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy [Information and Control Systems]*, 6, 40–49 [in Russian].
15. Seredovich, V. A., Seredovich, A. V., Komissarov, A. V., Radchenko, A. V., Dementyeva, O. A., Radchenko, L. K., & Usikov, A. V. (2009). Features of city territories digital model development by terrestrial laser scanning. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2009: T. 1, ch. 1 [Proceedings of GEO-Siberia-2009: Vol. 1, Part 1]* (pp. 136–140). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
16. Herban, I., & Vilceanu, C. B. (2012). Terrestrial laser scanning used for 3D modeling. *12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*.
17. Katrich, A. Y., & Barinova, T. A. (2017). Data processing of terrestrial laser scanning to produce 3d models of objects. In *Sbornik statey pobediteley mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Nauchnye dostizheniya i otkrytiya sovremennoy molodezhi [Proceedings of International Scientific Conference Champions: Scientific Achievements and Discoveries of Modern Youth]* (pp. 1213–1215). Penza: Nauka i prosveshchenie Publ. [in Russian].

18. Ivanov, A. V., Gorokhova, E. I., Gorokhova, L. I., & Murashov, K. V. (2014). Creating a 3D model of the planetarium SSGA according to terrestrial laser scanning for modernization of the star hall. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2014: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2 Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2014: International Scientific Conference: Vol. 2. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 150–155). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
19. Komissarov, A. V., Amanova, A. K., & Shirokova, T. A. (2010). Development of 3D modeling techniques for the objects of urban lands situation and relief using the data of terrestrial laser scanning in Tomsk. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2010: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 3. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya [Proceedings of GEO-Siberia-2010: International Scientific Conference: Vol. 3. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 79–83). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
20. Altyntsev, M. A., & Chernov, A. V. Application of laser scanning technology for modelling of real estate objects in 3D cadaster. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 79(9), 52–63 [in Russian].
21. Software Leica CloudWorx Revit. (n. d.). Retrieved from <https://www.geooptic.ru/product/leica-cloudworx-revit> (accessed date 16.08.2020) [in Russian].

Received 20.08.2020

© M. A. Altyntsev, P. A. Karpik, 2020

УДК 528.71:630

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-68-76

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОДНОГО СОСТАВА ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ЦИФРОВОЙ МНОГОЗОНАЛЬНОЙ АЭРОСЪЕМКИ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ

Станислав Андреевич Арбузов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-08-66, e-mail: s.a.arbuzov@sgugit.ru

Елена Павловна Хлебникова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-08-66, e-mail: e.p.hlebnikova@sgugit.ru

Вячеслав Николаевич Никитин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (913)712-37-50, e-mail: v.n.nikitin@sgugit.ru

В настоящее время актуальной задачей является автоматизация определения характеристик лесных массивов по данным дистанционного зондирования Земли. При этом существует большое количество алгоритмов автоматизированного дешифрирования, которые активно применяются и обеспечивают приемлемый результат при дешифрировании многозональных снимков среднего и низкого пространственного разрешения. При обработке данных высокого и сверхвысокого пространственного разрешения возникают как новые возможности по определению таксационных характеристик, так и определенные сложности, связанные со снижением эффективности работы алгоритмов, использующих яркостные признаки. Целью исследования является проверка эффективности методики автоматизированной идентификации деревьев и определения их породной принадлежности по снимкам, полученным цифровой аэросъемочной камерой ADS40. В основу предлагаемой методики положено комплексное использование методов управляемой классификации и идентификации объектов на изображении по площадным образам. Результат проделанной работы показал, по мнению авторов, значительную эффективность использования рассмотренной методики на тестовых данных и перспективность ее дальнейшего развития.

Ключевые слова: автоматизированное дешифрирование, данные дистанционного зондирования, лесная таксация, распознавание образов, площадной эталон, ADS40

Введение

Учет лесных ресурсов, рациональная эксплуатация, охрана и восстановление лесов, сохранение полезных свойств леса – основные задачи лесного хозяйства. Для решения этих задач необходимо получать полную и актуальную информацию о состоянии лесных массивов.

В настоящее время, как в нашей стране, так и за рубежом, в практике лесного хозяйства широко применяются различные виды дистанционной таксации лесов аэро- и космическими средствами, при этом все активнее

применяются методы автоматизации дешифрирования данных дистанционного зондирования (ДДЗ) [1–4].

При таксационных измерениях получают информацию о занимаемой площади лесных массивов, их качестве и ходе роста, отдельных древостоях, имеющихся в них древесных запасах.

Разработано большое количество алгоритмов автоматизированного дешифрирования, активно применяющихся при работе со снимками лесных массивов [1–3, 5–7]. Выбор метода дешифрирования в значительной мере зависит от пространственного разрешения ДДЗ

[8–10]. При обработке снимков низкого или среднего разрешения используются преимущественно методы, основанные на анализе яркостных особенностей объектов. При обработке снимков высокого и сверхвысокого разрешения для определения характеристик древесной растительности становится возможным использовать методы распознавания текстуры или даже отдельных деревьев.

Известно достаточно много способов идентификации деревьев – это и сегментация по яркости, и применение цифровых моделей поверхности, построенных по результатам обработки материалов аэрофотосъемок, и распознавание по площадным образам [8, 9, 11–20]. Подобный подход был реализован специалистами кафедры ФиДЗ при выполнении НИР «Определение характеристик лесных массивов по материалам съемок ADS40 и воздушного лазерного сканирования (ВЛС)», в результате был разработан программный продукт (ПП) TreeDetection, позволяющий идентифицировать деревья на аэроснимках по площадному образу.

Целью исследования является проверка эффективности методики автоматизированной идентификации деревьев и определения их породной принадлежности.

Задачи исследования:

- выполнить автоматизированную идентификацию деревьев с определенным размером кроны по эталонному площадному образу при помощи коррелятора ПП TreeDetection [21];
- выполнить автоматизированное распознавание породного состава древесной растительности при помощи контролируемой классификации;
- сопоставить результаты классификации с результатами работы коррелятора.

Методы и материалы

В качестве исходных данных были использованы снимки, полученные цифровой аэросъемочной камерой ADS40 (рис. 1) на территорию залесенных окрестностей аэропорта Шереметьево (г. Москва) в четырех спектральных диапазонах с пространственным разрешением 30 см. Для обработки использовалась полоса шириной, равной половине межмаршрутного расстояния в обе стороны от осевой линии снимка.

Рис. 1. Снимок ADS40

Для проведения экспериментальных работ использовались ПП TreeDetection и ENVI.

Результаты

Для выполнения исследований на снимке было выбрано пять занятых лесом типовых участков размером 125 x 125 м, отличающихся друг от друга породным и возрастным составами, плотностью произрастания деревьев и, как следствие, – условиями освещенности крон (рис. 2, 3).

На первом этапе работы при помощи программы TreeDetection (рис. 4) на тестовых участках производился поиск деревьев с определенным размером (2 и 4 м) кроны в целях формирования эталонного площадного образа. Для выбора эталона оператор при помощи соответствующего инструмента программы выделяет на снимке прямоугольную область с кроной дерева необходимого размера.

Рис. 2. Схема расположения тестовых участков

Рис. 3. Тестовые участки

Рис. 4. Работа в программе TreeDetection:

а) интерфейс; б) тестовый участок; в) площадные образы крон деревьев

На следующем этапе программой рассчитываются коэффициенты корреляции между эталоном и множеством образов на изображении (образы берутся с шагом в один пиксель) и формируется матрица коэффициентов корреляции (рис. 5), по которой в дальнейшем с заданным порогом вычисляются локальные максимумы.

Рис. 5. Визуальное отображение матрицы коэффициентов корреляции:
а) в двухмерном; б) трехмерном виде

Эксперименты показали, что наилучший результат достигается при использовании порога корреляции от 0,6 до 0,8. При этом, если предварительно выполнять сглаживание изображения фильтром Гаусса, тем самым нивелируя локальные яркостные особенности деревьев и уменьшая различия образов, можно значительно увеличить количество распознаваемых деревьев.

Результатом работы программы является файл в формате MIF/MID, в который записываются координаты деревьев и диаметр кроны, соответствующий размеру площадного образа, используемого для поиска.

На рис. 6 показан результат работы программы TreeDetection, полученный по двум площадным эталонам, представляющим кроны деревьев радиусов 2 и 4 м.

Рис. 6. Результат работы программы TreeDetection по двум площадным эталонам:
 – диаметр кроны 2 м; – диаметр кроны 4 м

На втором этапе выполнялась контролируемая классификация многозонального снимка. Сложность классификации снимков сверхвысокого разрешения, получаемых на залесенную местность, заключается в том, что из-за изменений яркости, связанных с освещенностью/затененностью, фактически крона дерева может состоять из нескольких классов, например, на снимках среднего пространственного разрешения лиственный и хвойный лес хорошо делимы, а на снимках высокого разрешения эти классы пересекаются в тенях. На снимках сверхвысокого

разрешения уверенно распознается по яркостным признакам наиболее освещенная часть кроны.

Для создания эталонов в программном комплексе ENVI на изображении были выбраны однозначно визуально распознаваемые шесть классов объектов: хвойные деревья, кустарники, сухостои, тени и два вида лиственных деревьев. Обучающая выборка собиралась по отдельным деревьям по освещенной части кроны (рис. 7).

Рис. 7. Получение эталона для дешифрирования породного состава

На следующем этапе с использованием обучающей выборки производилась классификация. Экспериментально установлено, что наилучшие результаты показывает метод «Расстояние Махаланобиса».

Далее выполнялась постклассификационная обработка с помощью инструмента Clump Classes. Этот инструмент при помощи дилатации «наращивает» классифицированные области, поглощая другие классы. Результат представлен на рис. 8.

Рис. 8. Результат классификации:
 – класс 1; – класс 2; – класс 3;
 – класс 4; – класс 5; – класс 6

Далее выполнялась проверка достоверности классификации по пяти различным участкам снимка. Сверялся результат визуального дешифрирования с автоматизированным распознаванием по наиболее освещенной верхней части кроны. Средний процент ошибочно классифицированных деревьев по пяти участкам составил 4 %.

На первом участке визуально можно распознать около 217 деревьев, из которых неправильно классифицированы 7. На втором участке ошибочно классифицированы 5 деревьев из 215. На третьем – 27 из 376 деревьев, на четвертом – 23 из 518, а на пятом – 14 из 308.

На последнем этапе работы совмещались результаты классификации методом Махаланобиса с результатами поиска деревьев при помощи коррелятора (рис. 9). Совмещение слоев и атрибутов выполнялось в QGIS.

Рис. 9. Совмещение результатов классификации и TreeDetection

По полученному изображению каждое найденное дерево, в зависимости от классификации, можно отнести к определенному типу (породе дерева). Если в окружность попадет два или несколько разных классов, то его относят к тому классу, который преобладает над

другими по величине площади в этой области. По результатам оценки достоверности, количество неправильно классифицированных деревьев оказалось невелико – менее 5 %.

Стоит заметить, что на качество распознавания деревьев могут влиять различные факторы, например, разнообразие породного состава и, следовательно, форм крон деревьев, густота древостоя, возрастной состав и т. д. В пользу этого говорят, в том числе, различия в эффективности распознавания деревьев и их породного состава по пяти тестовым участкам.

Заключение

Проведенные эксперименты показали, что задача исследования лесных территорий благодаря появлению аэрофотоснимков высокого разрешения вышла на новый качественный уровень: появилась возможность поштучного учета не только отдельностей деревьев, но и деревьев в древостоях с высокой полнотой. Таким образом, появляется возможность определения таксационных характеристик древостоев с необходимой точностью и высокой степенью автоматизации.

Предложенная методика определения качественных (породный состав) и количественных (диаметры крон) характеристик древостоя состоит из двух отдельных этапов: идентификации крон деревьев методом площадной корреляции по набору эталонов крон деревьев заданного радиуса и формы, а также определение породы деревьев по освещенной части кроны методом классификации с обучением.

Полученные результаты комплексного использования методов автоматизированного дешифрирования могут говорить о значительной эффективности предлагаемого подхода при работе со снимками лесных массивов, полученных камерой ADS40.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гордиенко А. С., Алтынцев М. А., Арбузов С. А. Разработка методики многоступенчатого дешифрирования космических снимков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 2. – С. 29–32.
2. Oduori S. M., Vargas R. R., Osman A., Rembold F. Detection of tree cutting in the rangelands of North Eastern Somalia using remote sensing [Electronic resource] / Technical Project Report L-15. – FAO-SWALIM, Nairobi, Kenya, 2009. – Mode of access: <http://www.faoswalim.org> (дата обращения: 15.05.2019).

3. Хамедов В. А., Мазуров Б. Т. Оценка точности определения площадей лесных рубок с использованием снимков с российского космического аппарата «Ресурс-П» № 1 // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 4 (32). – С. 42–50.
4. Chakravarty S., Ghosh S., Suresh C., Dey A., Shukla G. Deforestation: Causes, Effects and Control Strategies // Global Perspectives on Sustainable Forest Management. Edited by Dr. Clement A. Okia, 2012. doi: 10.5772/33342.
5. Хлебникова Е. П., Симонов Д. П. Использование методов статистического анализа при дешифрировании многозональных космических снимков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 1. – С. 19–23.
6. Хлебникова Е. П., Симонов Д. П. Исследование возможности использования цифровых снимков высокого разрешения для определения отражательных характеристик растительности // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 64–69.
7. Алтынцев М. А., Шляхова М. М. Исследование статистических свойств спектральных характеристик растительности. Непараметрический подход // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 58–65.
8. Nduji Nwannebuike Nixon. Super Resolution Mapping Of Trees From Satellite Images At Different Scales. – Enschede, The Netherlands, 2017. doi: 10.13140/RG.2.2.12004.37766.
9. Mustafa Y. T., Habeeb H. N., Stein A., Sulaiman F. Y. Identification and mapping of tree species in urban areas using worldview-2 imagery // Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2015. – Vol. II-2/W2. – P. 175–181. doi: 10.5194/isprsannals-II-2-W2-175-2015.
10. San-Miguel-Ayanz J., McInerney D., Sedano F., Strobl P., Kempeneers P., Pekkarinen A., Seebach (Reithmaier) L. Use of Wall-to-Wall Moderate and High-Resolution Satellite Imagery to Monitor Forest Cover Across Europe // Global Forest Monitoring from Earth Observation. – CRC Press, 2012. – P. 195–210.
11. Lin Yang Xiaqing Wu, Emil Praun, Xiaoxu Ma. Tree detection from aerial imagery [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.cis.uab.edu/kddm/seminar_home/Lin_Sept25_tree-camera-ready.pdf (дата обращения: 22.09.2018).
12. Daliakopoulos I. N., Grillakis E. G., Koutroulis A. G., Tsanis I. K. Tree Crown Detection on Multi-spectral VHR Satellite Imagery // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 2009. – Vol. 75(10). – P. 1201–1211. doi: 10.14358/PERS.75.10.1201.
13. Арбузов С. А. Автоматизированное определение координат деревьев по материалам аэро- и космических съемок // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 43–47.
14. Гук А. П., Арбузов С. А. Распознавание отдельных деревьев по многоспектральным аэрокосмическим снимкам леса // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы V Междунар. науч. конф., Красноярск, 11–14 сентября 2018 г. / науч. ред. Е. А. Ваганов ; отв. ред. Г. М. Цибульский. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2018. – С. 101–104.
15. Гук А. П., Алтынцев М. А. Автоматическая идентификация соответственных точек на аэро-снимках лесных массивов // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 68–77.
16. Ok A. O., Ozdarici-Ok A. Detection of citrus trees from UAV DSMS // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2017. – Vol. IV-1/W1; ISPRS Hannover Workshop: HRIGI 17. – CMRT 17. – ISA 17. – EuroCOW 17, 6–9 June 2017, Hannover, Germany.
17. DEM Generation based on UAV Photogrammetry Data in Critical Areas Giulia Sammartano and Antonia Spanò GISTAM 2016 // 2nd International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (26–27 April, 2016). – Rome, Italy.
18. Determining stand parameters from UAS-based point clouds. The International Archives of the Photogrammetry // XXIII ISPRS Congress. Remote Sensing and Spatial Information Sciences (12–19 July 2016). – Prague, Czech Republic, 2016. Vol. XLI-B1.
19. Kattenborn T., Sperlich M., Bataua K., Koch B. Automatic Single Palm Tree Detection in Plantations using UAV-based Photogrammetric Point Clouds // International Archives of the Photogrammetry,

Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2014. – Vol. XL-3. – P. 139–144. doi: 10.5194/isprs-archives-XL-3-139-2014.

20. Yilmaz V., Serifoglu C., Gungor O. Determining Stand Parameters From UAS-Based Point Clouds // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2016. – Vol. XLI-B1. – P. 413–416. doi: 10.5194/isprs-archives-XLI-B1-413-2016.

21. Арбузов С. А. TREE DETECTION. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2015612844 30.12.2014.

Получено 21.01.2020

© С. А. Арбузов, Е. П. Хлебникова, В. Н. Никитин, 2020

AUTOMATED IDENTIFICATION AND DETERMINATION OF THE BREED COMPOSITION OF WOOD BY MATERIALS OF DIGITAL MULTISPECTRAL AERIAL SURVEY OF FORESTS

Stanislav A. Arbuzov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (383)361-08-66, e-mail: s.a.arbuzov@sgugit.ru

Elena P. Khlebnikova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (383)361-08-66, e-mail: e.p.khlebnikova@sgugit.ru

Vyacheslav N. Nikitin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (913)712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com.

Presently, the current task is to automate the determination of the characteristics of forest areas according to remote sensing data. At the same time there is a large number of automated decryption algorithms that are actively used and provide an acceptable result in photointerpretation of medium and low spatial resolution multi-zone images. In processing of high and ultra-high resolution data, both new possibilities for determination of tax characteristics and certain difficulties related to efficiency reduction of algorithms using luminance characteristics arise. The aim of the study is to check the efficiency of the trees automated identification method and to determine their breed affiliation from the images ADS40 of the digital aerial camera. Proposed technique is based on a complex use of methods for controlled classification and identification of objects in the image by areal images. The result of the work done has shown, in the opinion of the authors, a significant efficiency of using the considered methodology on test data and the prospects for its further development.

Keywords: automated decryption, remote sensing data, forest taxation, pattern recognition, area reference, ADS40

REFERENCES

1. Gordienko, A. S., Altyntsev, M. A., & Arbuzov, S. A. (2011). Development of a method for multi-stage decoding of satellite images. *Izvestiya Vuzov. Geodeziya i aerofotos"yemka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 2, 29–32 [in Russian].

2. Oduori, S. M., Vargas, R. R., Osman, A., & Rembold, F. (2009). Detection of tree cutting in the rangelands of North Eastern Somalia using remote sensing. Technical Project Report L-15. FAO-SWALIM, Nairobi, Kenya. Retrieved from <http://www.faoswalim.org> (accessed data 15.05.2019).

3. Khamedov, V. A., & Mazurov, B. T. (2015). Evaluation of the accuracy of determining the area of forest arms using images from the Russian spacecraft Resurs-P № 1. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, (4)32, 42–50 [in Russian].
4. Chakravarty, S., Ghosh, S., Suresh, C., Dey, A., & Shukla G. (2012). Deforestation: Causes, Effects and Control Strategies. *Global Perspectives on Sustainable Forest Managemen*. Dr. Clement A. Okia (Ed.). doi: 10.5772/33342.
5. Lin Yang Xiaqing Wu, Emil Praun, & Xiaoxu Ma. (n. d.). Tree detection from aerial imagery. Retrieved from http://www.cis.uab.edu/kddm/seminar_home/Lin_Sept25_tree-camera-ready.pdf.
6. Khlebnikova, E. P., & Simonov, D. P. (2014). Use of statistical analysis methods for decoding multi-zone satellite images. In *Sbornik materialov Interexpo Geo-Sibir'-2014: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Distantionnyye metody zondirovaniya zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchey sredy, geoekologiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia 2014: International Scientific Conference: Vol. 1. Earth Remote Sensing and Photogrammetry, Environmental Monitoring and Geoenvironmental Ecology]* (pp. 19–23). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
7. Altyntsev, M. A., & Shlahova, M. M. (2019). Investigation of the statistical properties of the spectral characteristics of vegetation. Nonparametric Approach. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(4), 58–65 [in Russian].
8. Nwannebuike Nixon, Nduji. (2017). *Super Resolution Mapping Of Trees From Satellite Images At Different Scales*. Enschede, The Netherlands. doi: 10.13140/RG.2.2.12004.37766.
9. Mustafa, Y. T., Habeeb, H. N., Stein, A., & Sulaiman, F. Y. (2015). Identification and mapping of tree species in urban areas using worldview-2 imagery. *Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-2/W2*, 175–181. doi: 10.5194/isprsannals-II-2-W2-175-2015.
10. San-Miguel-Ayanz, J., McInerney, D., Sedano, F., Strobl, P., Kempeneers, P., Pekkarinen, A., & Seebach (Reithmaier), L. (2012). Use of Wall-to-Wall Moderate and High-Resolution Satellite Imagery to Monitor Forest Cover Across Europe. *Global Forest Monitoring from Earth Observation* (pp. 195–210). CRC Press.
11. Khlebnikova, E. P., & Simonov, D. P. (2013). Study of the possibility of using high-resolution digital images to determine the reflective characteristics of vegetation. In *Sbornik materialov Interexpo Geo-Sibir'-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Distantionnyye metody zondirovaniya zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchey sredy, geoekologiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia 2013: International Scientific Conference: Vol. 1. Earth Remote Sensing and Photogrammetry, Environmental Monitoring and Geoenvironmental Ecology]* (pp. 64–69). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
12. Daliakopoulos, I. N., Grillakis, E. G., Koutroulis, A. G., & Tsanis, I. K. (2009). Tree Crown Detection on Multispectral VHR Satellite Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75(10), 1201–1211. doi: 10.14358/PERS.75.10.1201.
13. Arbuzov, S. A. (2013). Automated determination of tree coordinates from the materials of aerial and space surveys. In *Sbornik materialov Interexpo Geo-Sibir'-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Distantionnyye metody zondirovaniya zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchey sredy, geoekologiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia 2013: International Scientific Conference: Vol. 1. Earth Remote Sensing and Photogrammetry, Environmental Monitoring and Geoenvironmental Ecology]* (pp. 43–47). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
14. Guk, A. P., & Arbuzov, S. A. (2018). Recognition of individual trees from multispectral aerospace images of the forest. In *Sbornik materialov V Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii Regional'nyye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli [Proceedings of the V International Scientific Conference: Regional Problems of Remote Sensing of the Earth]* (pp. 43–47). Krasnoyarsk: SFU Publ. [in Russian].
15. Guk, A. P., & Altyntsev, M. A. (2017). Automatic identification of the corresponding points on aerial photographs of forests. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(4), 68–77 [in Russian].
16. Ok, A. O., & Ozdarici-Ok, A. (2017). Detection of citrus trees from UAV DSMS. *Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, IV-1/W1*; ISPRS Hannover Workshop: HRIGI 17. – CMRT 17. – ISA 17. – EuroCOW 17. Hannover, Germany.
17. DEM Generation based on UAV Photogrammetry Data in Critical Areas Giulia Sammartano and Antonia Spanò GISTAM. (2016). *2nd International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*. Rome, Italy.

18. Determining stand parameters from UAS-based point clouds. The International Archives of the Photogrammetry (2016). *XXIII ISPRS Congress. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI(B1)*. Prague, Czech Republic.
19. Kattenborn, T., Sperlich, M., Bataua, K., & Koch B. (2014). Automatic Single Palm Tree Detection in Plantations using UAV-based Photogrammetric Point Clouds. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-3*, 139–144. doi: 10.5194/isprs-archives-XL-3-139-2014.
20. Yilmaz, V., Serifoglu, C., & Gungor, O. (2016). Determining Stand Parameters From UAS-Based Point Clouds // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B1*, 413–416. doi: 10.5194/isprs-archives-XLI-B1-413-2016.
21. Arbuzov, S. A. (2014). TREE DETECTION. Certificate of registration of the computer program RUS 2015612844 December 30, 2014 [in Russian].

Received 21.01.2020

© S. A. Arbuzov, E. P. Khlebnikova, V. N. Nikitin, 2020

УДК 528.48:621.24

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-77-84

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Валерия Вячеславовна Дедкова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-08-66, e-mail: v.v.dedkova@sgugit.ru

Александр Владимирович Комиссаров

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-08-66, e-mail: a.v.komissarov@sgugit.ru

Целью работы является анализ методов и средств дистанционного зондирования для мониторинга состояния различного вида защитных сооружений магистральных нефтепроводов. Произведен анализ причин возникновения аварий на магистральных трубопроводах по данным Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, а также Министерства энергетики Российской Федерации. В ходе анализа установлено, что все защитные сооружения можно разделить на два вида – инженерные и земляные. Дано обоснование необходимости выполнения мониторинга защитных сооружений. Изложена сущность основных методов активного дистанционного зондирования: радиолокационная съемка, радарная интерферометрия, воздушное, мобильное и наземное лазерное сканирование. Даны характеристики их точности. Выполнено обоснование областей применения методов для мониторинга различных типов инженерных сооружений.

Ключевые слова: защитные сооружения, методы активного дистанционного зондирования, контроль, мониторинг, магистральные трубопроводы, аварии, лазерное сканирование, радиолокационная интерферометрия

Введение

Трубопроводная транспортировка является основным способом транспортировки углеводородного сырья и нефтепродуктов на территории России. Большая протяженность трубопроводов – фактор риска возникновения аварий и утечек, что, в свою очередь, может негативно сказаться на состоянии окружающей среды как в зонах размещения трубопроводов, так и на прилегающих территориях и объектах, а загрязненные почвы и воды представляют угрозу для жизни и здоровья человека. Для обеспечения сохранности и целостности трубопроводных конструкций, а также предупреждения чрезвычайных ситуаций, связанных с прорывом трубопровода, предусматривается возведение защитных сооружений.

Анализ источников показал, что на сегодняшний день вопрос контроля состояния защитных сооружений магистральных трубо-

проводов является малоизученным. Авторами выдвинута гипотеза о том, что методы и средства дистанционного зондирования могут быть весьма полезными для контроля состояния защитных сооружений. Целью данной работы является анализ методов и средств дистанционного зондирования, пригодных для проведения планового и оперативного мониторинга защитных сооружений.

Основные задачи, решаемые в данном исследовании:

- анализ использования магистральных трубопроводов как распространенного средства транспортировки нефти и нефтепродуктов на территории России;
- анализ аварий на магистральных трубопроводах и их причин;
- анализ видов защитных сооружений;
- анализ методов и средств дистанционного зондирования, отвечающих требованиям контроля состояния защитных сооружений.

Методы и материалы

Анализ проводился по российским и зарубежным литературным источникам, посвященным вопросу применения методов и средств дистанционного зондирования для мониторинга технического состояния магистральных трубопроводов и защитных сооружений, причинам возникновения аварийных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса, а также современному состоянию транспортировки нефти на территории России.

Результаты и обсуждение

Нефть вместе с продуктами нефтепереработки является лидирующим товаром российского экспорта. За период с января по август 2020 г. на территории России суммарно добыто более 346 млн тонн нефти (с учетом газового конденсата), из них на экспорт отправлено свыше 158 млн тонн. Более 90 % добываемой нефти транспортируется по магистральным трубопроводам, что подтверждает преимущество данного средства транспортировки как менее затратного (в сравнении с железнодорожным и водным) и более безопасного (небольшие локальные потери нефти, возможность автоматизации технологических процессов, бесперебойность транспортировки вне зависимости от климатических условий). Еще одним неоспоримым преимуществом трубопроводной транспортировки является возможность строительства трубопроводов на территориях с любой степенью сложности геоморфологического строения [1].

В зависимости от назначения трубопроводы подразделяются на группы:

- промысловые – трубопроводы, соединяющие скважины с другими инженерными объектами внутри одного промысла;
- технологические – предназначены для транспортировки нефти, нефтепродуктов и/или иных веществ в границах одного предприятия (группы предприятий), использующихся при эксплуатации оборудования или для обеспечения функционирования технологических процессов;
- магистральные – трубопроводы, по которым нефть и нефтепродукты перекачива-

ются на большие расстояния из районов добычи, переработки и хранения до конечного потребителя.

В зависимости от вида перекачиваемого вещества магистральные трубопроводы делятся на нефтепроводы, газопроводы и нефтепродуктопроводы (мазутопровод, бензинопровод, керосинопровод и др.) [2, 3].

Общая протяженность линейной части магистральных трубопроводов на территории России составляет 264,224 тыс. км (табл. 1) [4].

Таблица 1

Протяженность линейной части магистральных трубопроводов на территории России

Вид	Протяженность, тыс. км
Магистральные газопроводы	173,439
Магистральные продуктопроводы	18,724
Магистральные нефтепроводы	48,309
Трубопроводы широкой фракции легких углеводородов	23,752
Всего	264,224

В период с января по июнь 2020 г. на объектах нефтегазового комплекса произошло 4 аварии, предварительный экономический ущерб от которых составляет 39,712 млн руб. Как показывает анализ данных [4] за 2019 г., в России более 50 % аварий в топливно-энергетическом комплексе произошли на объектах нефтегазовой инфраструктуры. Основные причины аварий – неисправность и износ оборудования [4].

Другими распространенными причинами аварий на трубопроводах являются:

- повреждения при проведении работ в охранной зоне;
- повреждения в результате природных явлений;
- брак при строительстве;
- конструктивные недостатки;
- разлив (несанкционированная врезка);
- ошибки персонала [5–14].

Магистральный трубопровод представляет собой сложный инженерно-технический

комплекс, в состав которого, кроме самого трубопровода, входят:

- установки электрохимической защиты трубопроводов от коррозии, линии и сооружения технологической связи, средства автоматики и телемеханики;

- линии электропередачи, предназначенные для обслуживания трубопроводов и устройства электроснабжения и дистанционного управления запорной арматурой и установками электрохимической защиты трубопроводов, сети связи;

- противопожарные средства, противоэрозионные и защитные сооружения трубопроводов;

- емкости для хранения и разгазирования конденсата, земляные амбары для аварийного выпуска нефти, нефтепродуктов, конденсата и сжиженных углеводородов;

- здания и сооружения линейной службы эксплуатации трубопроводов;

- вдольтрассовые проезды и вертолетные площадки, расположенные вдоль трассы трубопровода, и подъезды к ним, опознавательные и сигнальные знаки местонахождения трубопроводов;

- головные и промежуточные нефтеперекачивающие станции, перекачивающие станции нефтепродуктов и наливные станции, резервуарные парки, КС и ГРС (газораспределительная станция);

- станция подземного хранения газа;

- пункты подогрева нефти и нефтепродуктов;

- указатели и предупредительные знаки [15].

Как видно из перечисленного выше, защитные сооружения являются частью инженерно-технического комплекса магистральных трубопроводов. В случае размещения трубопроводов вблизи населенного пункта или промышленного предприятия с низовой стороны трубопровода проектируются защитные сооружения – защитные валы или канавы для отведения продукта, вышедшего при аварийной утечке, в специальный защитный амбар. Это необходимо для предотвращения попадания нефти или нефтепродукта в водотоки и на территорию населенного пункта. В местах проложения трубопроводов с селевой опасностью предусматриваются упо-

лаживание склонов, водозащитные устройства, дренирование подземных вод, сооружение подпорных стен, контрфорсов [15].

При размещении магистральных трубопроводов на землях сельскохозяйственного назначения для защиты конструктивных элементов трубопровода, выходящих на поверхность (камеры запуска и приема средств очистки и диагностики, задвижки, вантузы и т. д.), а также для защиты сельскохозяйственных угодий от пала используют противопожарные вспашки.

На трассе нефтепроводов, расположенных вблизи крупных рек и водоемов, должны быть возведены аварийные сбросные емкости, в которые возможен сброс нефти при авариях на трубопроводах.

Для аварийного сброса нефти и/или нефтепродуктов предусматривается устройство амбаров путем обвалований из грунтов с содержанием глинистых частиц или устройством глиняных замков, других противодреннирующих устройств, когда обвалование сооружается из дренирующих грунтов.

Защита грунтов от эрозии вдоль трассы магистрального трубопровода осуществляется путем закрепления грунтов посадками трав или кустарников либо иными способами. В табл. 2 приведена информация по основным типам защитных сооружений и мероприятий при перекачке нефти и нефтепродуктов трубопроводным способом.

Для всех вышеуказанных сооружений необходимо выполнять периодический контроль в целях обеспечения их стабильного функционирования. При этом крайне важным фактором является обеспечение геометрических характеристик данных объектов.

Для представленных сооружений характерны различные требования к точности и периодичности мониторинга. Так, например, для земляных сооружений в виде обвалований контроль следует выполнять раз в год, а для свайных фундаментов в первые 3–5 лет эксплуатации – 2 раза в год. При этом периодичность мониторинговых мероприятий зависит от выявляемых изменений в сооружениях. Если величина изменения находится в допуске, то используется стандартный режим наблюдений, при выявлении отклонений выше допуска – периодичность наблюдений сокращают в два раза.

Таблица 2

**Защитные сооружения и мероприятия при перекачке нефти
и нефтепродуктов с помощью трубопроводов**

Защитные сооружения и мероприятия	Назначение
Защитный амбар	Предназначен для аварийного сброса углеводородного сырья или продуктов переработки в случае возникновения аварийной ситуации на трубопроводе и при утечке опасных веществ
Защитные валы и канавы	Предназначены для отведения в защитный амбар нефти и нефтепродуктов, высвободившихся при возникновении утечки на трубопроводе
Противопожарные вспашки	Предназначены для защиты земель сельскохозяйственного назначения в зонах размещения магистральных трубопроводов
Защита грунтов от эрозии	Необходима для предупреждения ветровой и иной эрозии почвы в зонах размещения магистральных трубопроводов
Уполаживание склонов, водозащитные устройства, дренирование подземных вод, сооружение подпорных стен	Проектируются в зонах размещения трубопроводов с выраженной сейсмической активностью

Перспективными методами проведения мониторинговых наблюдений за состоянием защитных сооружений являются средства дистанционного зондирования, которые позволяют провести съемку значительных по протяженности объектов. Из многообразия активных методов дистанционного зондирования для решения подобных задач подходят:

- радиолокационная съемка;
- интерферометрия;
- лазерное сканирование (наземное, мобильное и воздушное).

Радиолокационное изображение создается с помощью приемно-передающего устройства, генерирующего излучаемый импульс и принимающего отраженный сигнал в микроволновой области. Точность создания цифровой модели рельефа и объектов составляет примерно 1,5–3 м.

Радиолокационная интерферометрия основана на совместной обработке двух фазовых полей, которые можно получить либо съемкой одного и того же участка местности одновременно двумя антенными системами, либо съемкой одного и того же участка местности спутниковой системой на разных витках. Построенное изображение на основе раз-

ности фаз называется интерферограммой. Данный метод сочетает в себе высокую точность фазового метода измерения дальности с высокой разрешающей способностью космических радиолокаторов с синтезированной апертурой [16–18]. Точность определения высоты во времени зависит от следующих факторов [19–20]:

- различие длин оптических путей за счет преломления в среде распространения сигнала;
- величина базиса и точность используемой при обработке снимков опорной ЦММ;
- пространственное разрешение радиолокационных снимков и размер угловых отражателей.

Согласно [19], результирующая погрешность определения смещения объектов при использовании угловых отражателей достигает 1–5 мм. При этом важным фактором является необходимость обеспечения когерентности между временными снимками, что достигается небольшими временными интервалами между снимками.

Для контроля состояния защитных сооружений наиболее предпочтительным является метод воздушного лазерного сканирования.

Сущность данного метода заключается в работе полупроводникового лазера, действующего, как правило, в импульсном режиме с рабочей длиной волны в ближнем инфракрасном диапазоне спектра. Лазер излучает коротковолновые импульсы, направление распространения которых регулируется оптической системой и сканирующим элементом. Поперечная развертка обеспечивается за счет использования качающегося зеркала, а продольная – за счет движения носителя вдоль маршрута съемки [21]. Точность определения пространственного положения объектов составляет 10–25 см в зависимости от модели сканера, ГНСС-аппаратуры и инерциальной навигационной системы, типа воздушного судна и параметров полета.

Наземный лазерный сканер (НЛС) подобен электронному тахеометру, выполняющему съемку с определенным шагом и высокой частотой. В основу работы лазерных дальнометров, используемых в наземных лазерных сканерах, положены импульсный и фазовый безотражательные методы измерения расстояний, а также метод прямой угловой засечки.

В качестве блока развертки в НЛС выступают сервопривод и полигональное зеркало или призма. Сервопривод отклоняет луч на заданную величину в горизонтальной плоскости, при этом поворачивается вся верхняя часть сканера, которая называется головкой. Развертка в вертикальной плоскости осуществляется за счет вращения или качания зеркала.

В процессе сканирования фиксируются направление распространения лазерного луча и расстояние до точек объекта. Результатом работы НЛС является растровое изображение – скан. Точность определения координат точек объекта составляет 5–50 мм в зависимости от модели сканера, методики обработки и параметров съемки [22].

При выполнении мониторинга с помощью наземного лазерного сканера выявлена осадка фундамента защитного сооружения на 3 см, в результате чего появились трещины (рисунок).

Мобильное лазерное сканирование подобно воздушному лазерному сканированию,

только вместо воздушного судна используется наземный или водный транспорт. Точность метода варьируется от 5 до 10 см.

Повреждение конструкции фундамента защитного сооружения

Выводы

Согласно проведенному анализу, можно сделать вывод, что в зависимости от требуемой точности и охвата наблюдаемой территории, для мониторинга земляных защитных сооружений, амбаров аварийного сброса, обвалований и др., расположенных в зонах размещения магистральных нефтепроводов, наиболее подходящим методом является воздушное лазерное сканирование.

Для мониторинга инженерных защитных сооружений, таких как подпорная стенка, защитное ограждение, опоры и т. п., где регламентирована миллиметровая точность, возможно использование радарной интерферометрии. При этом на точках, подлежащих контролю, необходимо устанавливать угловые отражатели.

Наземное лазерное сканирование возможно использовать для мониторинга защитных сооружений, расположенных внутри нефтеперекачивающих станций, нефтяных баз, нефтяных заводов и т. д.

Использование же пассивных методов дистанционного зондирования (например, аэрофотосъемка с пилотируемых и беспилотных носителей) требует значительных трудозатрат при обработке материалов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Разработка теории и технологических решений контроля состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов методами активного дистанционного зондирования», № 0807-2020-0002).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Статистика. Сайт Министерства энергетики Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/activity/statistic> (дата обращения: 08.09.2020).
2. Васильев Г. Г., Коробков Г. Е., Коршак А. А. и др. Трубопроводный транспорт нефти / под ред. С. М. Вайнштока : учеб. для вузов: в 2 т. – М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – Т. 1. – 407 с.
3. Кудинов В. И. Основы нефтегазопромыслового дела. – М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований : Удмуртский госуниверситет, 2004. – 720 с.
4. Надзор за объектами нефтегазового комплекса. Сайт Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору Ростехнадзор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/2019%20год/index.php> (дата обращения: 08.09.2020).
5. Комаров В. А., Семенова З. В., Бронников Д. А., Нигрей А. А. О структуре системы физической защиты магистральных трубопроводов от преднамеренных угроз // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 87–100.
6. Нестеренко М. Ю., Карпюк М. С., Влацкий В. В. Автоматизированная распределенная ГИС-система мониторинга и оценки риска функционирования природно-техногенных объектов нефтегазовой промышленности // Российскому научному обществу анализа риска 15 лет: основные итоги и перспективы деятельности : сб. – М., 2018. – С. 347–352.
7. Ушивцева Л. Ф., Соловьева А. В., Ермолина А. В. Воздействие геологических процессов на функционирование объектов инфраструктуры // Геология, география и глобальная энергия. – 2016. – № 3 (62). – С. 49–60.
8. Кузьмина Е. С., Варнаков В. В. Анализ причин возникновения чрезвычайных ситуаций на объектах хранения нефти и нефтепродуктов // Modern Science. – 2019. – № 4 (1). – С. 379–383.
9. Аскарлов Р. М., Китаев С. В., Исламов И. М. О технологии выявления участков трубопроводов с изгибными напряжениями при пересечении ими геодинамических зон // Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 5. – С. 18–25.
10. Adegbeye M. A. Recent advances in pipeline monitoring and oil leakage detection technologies: principles and approaches. – 2019 [Electronic resource]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/333602897_Recent_Advances_in_Pipeline_Monitoring_and_Oil_Leakage_Detection_Technologies_Principles_and_Approaches.
11. Froushani M. A. Remote sensing for physical protection of the pipeline network online monitoring of corridor based infrastructure. – 2010 [Electronic resource]. – Режим доступа: https://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/part7/b/pdf/16_XXXVIII-part7B.pdf.
12. Минкин Д. Ю., Терехин С. Н., Корольков А. П., Османов Ш. А. Космический тепловизионный мониторинг нефтегазопроводного транспорта // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26, № 12. – С. 45–51.
13. Manekiya M. Leakage detection and estimation using IR thermography. – 2016 [Electronic resource]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/311254439_Leakage_detection_and_estimation_using_IR_thermography.
14. Hausmann D. Monitoring of gas transmission pipelines – a customer driven civil UAV application. – 2010 [Electronic resource]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/224779029_Monitoring_of_gas_transmission_pipelines_-_a_customer_driven_civil_UAV_application.
15. Свод правил 36.13330.2012 «СНИП 2.05.06-85* Магистральные трубопроводы» (последняя редакция) [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
16. Hanssen R. F. Radar interferometry. Data interpretation and error analysis. – Kluwer academic publishers, 2002. – 380 p.
17. Goldstein R. M., Li F. K. et al. Synthetic aperture radar interferometry // Proceedings of the IEEE. – 2000. – Vol. 88, No. 3. – P. 333–381.
18. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – М. : Радиотехника, 2010. – 680 с.

19. Оньков И. В. Оценка точности построения ЦМР методом радарной интерферометрии по снимкам ALOS/PALSAR // Геоматика. – 2012. – № 3. – С. 35–44.
20. Добрынин И. И., Савин А. И., Севастьянов Н. Н. Исследование факторов, влияющих на точность измерения смещений методом радарной интерферометрии с использованием уголкового отражателя // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 3. – С. 29–36.
21. Данилин И. М., Медведев Е. М., Мельников С. Р. Лазерная локация земли и леса : учеб. пособие. – Красноярск : Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2005. – 182 с.
22. Комиссаров А. В., Середович В. А., Комиссаров Д. В., Широкова Т. А. Наземное лазерное сканирование : монография. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с.

Получено 02.10.2020

© В. В. Дедкова, А. В. Комиссаров, 2020

ANALYSIS OF METHODS AND MEANS OF CONTROL OF MAIN PIPELINES' PROTECTIVE STRUCTURES

Valeriya V. Dedkova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (383)361-08-66, e-mail: v.v.dedkova@sgugit.ru

Alexander V. Komissarov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Head of the Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (383)361-08-66, e-mail: a.v.komissarov@sgugit.ru

The purpose of research is to justify methods and means of remote sensing for monitoring of technical state of various types of main pipelines' protective structures. An analysis of accidents at main pipelines based on the data of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision, as well as the Ministry of Energy of the Russian Federation is given. The analysis revealed that all protective structures are divided into 2 types - engineering and earth structures. The essence of main methods of active remote sensing is described: radar imaging, radar interferometry, aerial, mobile and ground laser scanning. Accuracy characteristics are given. Justification of monitoring methods application for various types of engineering structures is performed.

Keywords: protective structures, active remote sensing methods, control, monitoring, main pipelines, accidents, laser scanning, radar interferometry

REFERENCES

1. Statistics. Site of Ministry of energy of Russian Federation. (n. d.). Retrieved from <https://minenergo.gov.ru/activity/statistic> (accessed date 08.09.2020) [in Russian].
2. Vasilyev, G. G., Korobkov, G. E., Korshak, A. A., & et al. (2002). *Truboprovodnyj transport nefti: T. 1 [Oil Pipeline Transport: Vol. 1.]*. S. M. Weinshtok (Ed.). Moscow: ООО "Nedra-Biznestsentr" Publ., 407 p. [in Russian].
3. Kudinov, V. I. (2004). *Osnovy neftegazopromyslovogo dela [Basics of oil and gas industry]*. Moscow-Izhevsk: Institute of Computer Science Publ., Udmurt State University Publ., 720 p. [in Russian].
4. Supervision of oil and gas facilities. Site of Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service (Rostekhnadzor). (n. d.). Retrieved from <http://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/2019%20год/index.php> [in Russian].
5. Komarov, V. A., Semenova, Z. V., Bronnikov, D. A., & Nigrej, A. A. (2019). On the structure of the system of physical protection of trunk pipelines against intentional threats. *Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo [Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering]*, 19(1), 87–100 [in Russian].

6. Nesterenko, M. Yu. Karpyuk, M. S., & Vlackij, V. V. (2018). Automated distributed gis-system of monitoring and risk assessment of the functioning of natural and technogenic objects of the oil and gas industry. In *Sbornik: Rossijskomu nauchnomu obshchestvu analiza riska 15 let: osnovnye itogi i perspektivy deyatel'nosti [Proceedings of Russian Scientific Society of Risk Analysis 15 years: Main Results and Prospects of Activity]* (pp. 347–352). Moscow [in Russian].
7. Ushivtseva, L. F., Solovyova, A. V., & Yermolina, A. V. (2016). Impact of geological processes on functioning of infrastructure. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya [Geology, Geography and Global Energy]*, 3(62), 49–60 [in Russian].
8. Kuzmina, E. S., & Varnakov, A. A. (2019). Analysis of causes of emergency situations at oil and oil products storage facilities. *Modern Science*, 4(1), 379–383 [in Russian].
9. Askarov, R. M., Kitaev, S. V., & Islamov, I. M. (2019). On technology of detecting pipeline sites with bending voltages in their crossing geodynamic zones. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]*, 330(5), 18–25 [in Russian].
10. Adegbeye, M. A. (2019). Recent advances in pipeline monitoring and oil leakage detection technologies: principles and approaches. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/333602897_Recent_Advances_in_Pipeline_Monitoring_and_Oil_Leakage_Detection_Technologies_Principles_and_Approaches.
11. Foroushani, M. A. (2010). Remote sensing for physical protection of the pipeline network online monitoring of corridor based infrastructure. Retrieved from https://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/part7/b/pdf/16_XXXVIII-part7B.pdf.
12. Minkin, D. Yu., Terekhin, S. N., Korol'kov, A. P., & Osmanov, Sh. A. (2017). Space thermovision monitoring of oil and gas transportation. *Pozharovzryvobezopasnost' [Fire and explosion safety]*, 26(12), 45–51 [in Russian].
13. Manekiya, M. (2016). Leakage detection and estimation using IR thermography. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/311254439_Leakage_detection_and_estimation_using_IR_thermography
14. Hausmann, D. (2010). Monitoring of gas transmission pipelines – a customer driven civil UAV application. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/224779029_Monitoring_of_gas_transmission_pipelines_-_a_customer_driven_civil_UAV_application.
15. Code of Practice 36.13330.2012 "SNIP 2.05.06-85* Trunk pipelines" (last edition). Retrieved from <http://docs.cntd.ru/document/1200103173> [in Russian].
16. Hanssen R. F. (2002). *Radar interferometry. Data interpretation and error analysis*. Kluwer Academic Publishers, 380 p.
17. Goldstein, R. M., Li, F. K., & et al. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3), 333–381.
18. Verba, V. S., Neronskij, L. B., Osipov, I. G., & Turuk, V. E. (2010). *Radiolokacionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya [Space-based ground survey radar systems]*. Moscow: Radiotekhnika Publ., 680 p. [in Russian].
19. Onkov, I. (2012). Evaluation of DEM creation accuracy via ALOS/PALSAR data using methods of radar interferometry. *Geomatika [Geomatics]*, 3, 35–44 [in Russian].
20. Dobrynin, I. I., Savin, A. I., Sevast'yanov, N. N. (2018). Study of factors affecting displacement measurement accuracy by radar interferometry method in various frequency bands using corner reflectors. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]*, 15(3), 29–36 [in Russian].
21. Medvedev, E. M., Danilin, I. M., & Mel'nikov, S. R. (2007). *Lazernaya lokatsiya zemli i lesa [LASER location of Earth and forest]*. Krasnoyarsk: V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, 230 p. [in Russian].
22. Komissarov, A. V., Seredovich, V. A., Komissarov, D. V., & Shirokova, T. A. (2009). *Nazemnoe lazernoe skanirovanie [Land laser scanning]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 261 p. [in Russian].

Received 02.10.2020

© V. V. Dedkova, A. V. Komissarov, 2020

УДК 629.783+[528.48:621.24]

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-85-95

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СООТВЕТСТВИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА ПЛОЩАДНЫХ ОБЪЕКТОВ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА ПРОЕКТНЫМ РЕШЕНИЯМ

Даниил Валентинович Долгополов

АО «СпейсИнфо Геоматикс», 127490, Россия, г. Москва, ул. Декабристов, владение 51, кандидат технических наук, технический директор, тел. (905)714-13-77, e-mail: daniil.dolgoplov@gmail.com

В статье представлены результаты экспериментальных исследований применения материалов аэрофотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для трехмерного моделирования объектов трубопроводного транспорта и построения информационной модели «Как построено». Выполнен эксперимент по трехмерному моделированию объекта строительства на основе данных, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа, определена точность полученной модели. Целью исследования является разработка методики использования беспилотных летательных аппаратов для контроля соответствия результатов строительства площадных объектов трубопроводного транспорта проектным решениям. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности использовании данных БПЛА для контроля отклонений от рабочей документации при выполнении строительно-монтажных работ (СМР) на объекте. Предложенное решение может быть применено в качестве методической основы для проведения контроля результатов строительства объектов трубопроводного транспорта проектным решениям в рамках проведения СМР.

Ключевые слова: 3D-модель, информационная модель, беспилотные авиационные системы, наземное лазерное сканирование, облако точек, объекты трубопроводного транспорта, пространственная точность, средняя квадратическая ошибка

Введение

В настоящее время в России ведется несколько масштабных проектов по строительству трубопроводных систем, а также в плановом порядке реализуются программы комплексной реконструкции объектов нефтегазового сектора. В рамках выполнения таких работ одной из ключевых задач является контроль отклонения от рабочей документации при выполнении строительно-монтажных работ.

Для анализа отклонений при СМР требуется построить цифровую модель объекта «Как построено», загрузить полученные данные в единое геоинформационное пространство с проектными данными и провести контроль соответствия цифровой модели проектным решениям. Для совместного анализа цифровых моделей, обнаружения отклонений и коллизий, полевые данные, полученные на этапе СМР должны соответствовать

точности рабочей документации. Например, при контроле результатов строительства с планом, выполненном в масштабе 1 : 500, средняя ошибка положения характерных точек объектов объекта строительства не должна превышать величину 0,2 м в соответствии с инструкцией по топографической съемке.

Как правило, для построения цифровых моделей «Как построено» используется технология наземного лазерного сканирования (НЛС) [1–3]. Разработка информационной модели «Как построено» производится на основании облака точек, полученного в процессе НЛС. В то же время процесс по созданию модели на основании облака точек достаточно трудоемкий, альтернативой может служить технология создания цифровых моделей с использованием беспилотных летательных аппаратов, при которой точность построенных 3D-моделей сопоставима с точностью моделей, построенных с использова-

нием технологии наземного лазерного сканирования [4, 5].

Вопросам использования технологий дистанционного зондирования и геоинформационного обеспечения строительства и эксплуатации объектов нефтегазового комплекса уделяется большое внимание. Методологические и технологические основы дистанционных методов исследования объектов трубопроводного транспорта и формирования геопространства отражены в работах ведущих ученых: В. П. Савиных, В. Г. Бондура, А. П. Карпика, Д. В. Лисицкого, В. А. Мелкого, А. В. Комиссарова, Н. Н. Хренова [6–16] и др.

Особенности формирования геопространства по материалам съемки с использованием беспилотных летательных аппаратов рассмотрены в работах: Е. И. Аврунева, А. П. Гука, С. А. Кандичанского, А. С. Костюк, А. П. Михайлова, В. Н. Никитина, О. А. Опритовой, Т. А. Хлебниковой, А. Г. Чибуничева, Х. К. Ямбаева [17–25] и др.

Вместе с тем, вопросы практики использования беспилотных летательных аппаратов для контроля соответствия результатов строительства объектов трубопроводного транспорта проектным решениям недостаточно рассмотрены в отечественной научной литературе и на сегодняшний день являются актуальной научно-технической задачей.

Цель исследования – провести анализ возможности использования беспилотных летательных аппаратов для контроля соответствия результатов строительства площадных объектов трубопроводного транспорта проектным решениям.

Объект исследования: площадка строительства объекта трубопроводного транспорта площадью 0,611 км², расположенная в Ленинградской области.

Предмет исследования: методика использования беспилотных летательных аппаратов при контроле соответствия результатов строительства площадных объектов трубопроводного транспорта проектным решениям.

Теоретическая значимость исследования: представленная методика может быть использована при оценке пространственной точности трехмерных моделей объектов тру-

бопроводного транспорта, построенных методом фотограмметрии с использованием материалов БПЛА.

Практическая значимость исследования: рассматриваемая в работе методика может применяться для контроля соответствия результатов строительства площадных объектов трубопроводного транспорта проектным решениям на разных стадиях строительства и реконструкции объектов трубопроводного транспорта.

Методы и материалы

В рамках исследования проведены работы по созданию трехмерной модели участка строительства площадного объекта трубопроводного транспорта, показаны возможности сравнения полученных результатов с материалами проектной документации, а также определены точностные характеристики полученной цифровой модели объекта строительства.

Аэрофотосъемка выполнялась с использованием БПЛА мультироторного типа DJI Phantom 4 Pro v2.0. Для определения координат опорных пунктов использовался двухчастотный, двухсистемный GNSS-приемник PrinCe i50.

Технические параметры используемого БПЛА:

- вес в сборе: 1 375 г;
- размер по диагонали без пропеллеров: 350 мм;
- максимальная высота полета над уровнем моря: 6 000 м;
- максимальное время полета: 30 мин;
- диапазон рабочих температур: от 0° до 40 °С;
- системы позиционирования: GPS/ГЛОНАСС;
- наличие модуля RTK.

БПЛА оснащен цифровой фотокамерой DJI FC 6310 с механическим затвором, фокусным расстоянием 8,8 мм и размером кадра 4 864 × 3 648 пикселей.

Управление БПЛА во время аэрофотосъемки выполнялось в автоматическом режиме с помощью автопилота Map Pilot for DJI. Параметры аэрофотосъемки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры аэрофотосъемки

Параметр	Значение
1. Высота съемки, м	59,1
2. Разрешение, см/пиксель	1,48
3. Площадь покрытия, км ²	0,611
4. Количество снимков, шт.	1 596

Для фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки использовалось программное обеспечение Agisoft Metashape pro (версия 1.5.3), далее – Agisoft Metashape [26].

Создание трехмерной модели эталонного полигона в Agisoft Metashape выполнялось в четыре этапа.

1. На первом этапе производится построение грубой модели объекта строительства. На этом этапе определяются общие точки на перекрывающихся снимках, а также производится расчет координат центров фотографирования и элементов взаимного ориентирования снимков. Схема позиций камеры и перекрытия снимков приводится на рис. 1.

Рис. 1. Схема позиции камеры и перекрытия изображений

2. На втором этапе была произведена привязка полученной модели к внешней системе координат и уравнивание всех параметров системы, в том числе координат центров фотографирования и наземных опорных точек, углов ориентирования снимков, параметров оптической системы с использованием параметрического метода уравнивания. При уравнивании в качестве весовых коэффициентов использовали погрешности определения координат точек съемки (рис. 2).

Рис. 2. Позиции съемки и оценка ошибок. Ошибка по Z отображается цветом эллипса. Ошибки в плане отображаются формой эллипса

3. На третьем этапе производилось построение полигональной модели объекта строительства на основе определенных на предыдущем этапе параметров (рис. 3). В программном обеспечении Agisoft Metashape реализован механизм, заключающийся в триангуляции только общих точек, полученных на первом этапе, и более точные способы обработки, заключающиеся в определении пространственного положения для каждого элемента изображения.

4. На заключительном этапе выполнены текстурирование полигональной модели, создание ортофотоплана и получена матрица высот (рис. 4–6).

Рис. 3. Полигональная модель объекта строительства, построенная по результатам съемки с использованием БПЛА

Рис. 4. Текстурированная полигональная модель объекта строительства

Рис. 5. Ортофотоплан площадки строительства площадочного объекта трубопроводного транспорта

Рис. 6. Фрагмент матрицы высот объекта строительства

Оценка точности цифровой модели

Оценка точности фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки выполнялась по пунктам планово-высотного обоснова-

ния на втором этапе при уравнивании параметров системы.

Схема расположения пунктов съемочного обоснования на территории площадки строительства приведена на рис. 7.

Рис. 7. Схема опорных знаков на территории площадки строительства

Определение координат пунктов планово-высотного обоснования выполнено в соответствии с требованиями инструкции по развитию съемочного обоснования с применением глобальных навигационных спутниковых систем [27].

Точность построенной 3D-модели объекта строительства трубопроводного транспорта приведена в табл. 2.

Анализ данных, представленных в табл. 2, позволил сделать вывод о соответствии СКО определения планового положения характерных точек границ (координат пунктов планово-высотного обоснования эталонного полигона) требованиям точности топографической съемки масштаба 1 : 500.

Таким образом, полученная модель полностью удовлетворяет требованиям, а представленная методика может быть использована для контроля соответствия результатов строительства площадных объектов трубопроводного транспорта проектным решениям.

Таблица 2

СКО цифровой модели местности

Кол-во	Ошибка, X, см	Ошибка, Y, см	Ошибка, Z, см	Ошибка, XY, см	Общая ошибка, см
42	1,50	1,66	2,06	2,23	3,04

Анализ соответствия результатов строительства проектным решениям

Контроль соответствия результатов строительства проектным решениям производился путем сравнения пространственных данных проектной документации и цифровой модели в едином геоинформационном пространстве в программном обеспечении ПО Autodesk AutoCAD Civil 3D 2018 (рис. 8).

Наиболее существенные отклонения были выявлены при контроле высоты отсыпки площадки строительства проектным решениям, отклонения превышали в ряде случаев 1,5 м. Контроль соответствия уровня отсыпки проектным решениям – одна из наиболее важных задач при мониторинге строительства объектов трубопроводного транспорта, особенно в условиях избыточного увлажнения.

Контроль положения подъездных дорог не выявил отклонений (рис. 9).

Контроль соответствия размещения элементов свайного фундамента проектным решениям показал отклонение от проектных решений до 40 см и необходимость внесения изменений в рабочую документацию. На рис. 10 синим цветом обозначено проектное положение свай на ортофотоплане, наглядно видно расхождение их планового и фактического положений.

На основании полученных результатов сделано заключение о целесообразности использования беспилотных летательных аппаратов для формирования информационных моделей «Как построено», отображающих фактическое расположение и габариты смонтированных конструкций на объекте и контроля соответствия результатов строительства проектным решениям.

Рис. 8. Объединение проектных данных и данных аэрофотосъемки в едином геоинформационном пространстве

Рис. 9. Контроль положения подъездных дорог

Рис. 10. Контроль соответствия размещения элементов свайного фундамента проектным решениям

По результатам сравнения цифровых моделей «Как спроектировано» и «Как построено» необходимо сформировать перечень выявленных отклонений, на основании которого в дальнейшем произвести актуализацию модели «Как построено».

Заключение

В результате проведенного исследования были получены следующие результаты.

1. На основании работ, проведенных на тестовой площадке строительства, разработана методика использования беспилотных авиационных систем для контроля соответствия результатов на разной стадии строительства площадных объектов трубопроводного транспорта проектным решениям.

2. Оценка точности полученной трехмерной цифровой модели показала, что точность

ее параметров составляет соответственно 2 см в плане и 2 см по высоте.

3. Формирование методики мониторинга объектов строительства при выполнении СМР на основании данных, полученных с использованием БПЛА, является актуальным для ускорения процесса получения цифровой модели «Как построено» и может стать хорошей альтернативой построению цифровых моделей по данным наземного лазерного сканирования и технической документации.

4. Для повышения эффективности методики требуется проведение дальнейших исследований с использованием БПЛА, оснащенных камерой более высокого разрешения, с использованием беспилотных авиационных систем разных типов, а также с комплексным использованием БПЛА и технологии НЛС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шевченко Г. Г., Гура Д. А., Акопян Г. Т. Применение наземного лазерного сканирования в строительстве и ВМ технологий // Научные труды КубГТУ. – 2018. – № 2. – С. 251–260.
2. Середович В. А., Комиссаров Д. В. Состояние, проблемы и перспективы применения технологии наземного лазерного сканирования // ГЕО-Сибирь-2005. Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск : СГГА, 2005. Т. 1, ч. 1. – С. 193–196.
3. Середович В. А., Комиссаров А. В., Комиссаров Д. В., Широкова Т. А. Наземное лазерное сканирование. – Новосибирск : СГГА, 2009.
4. Аврунев Е. И., Ямбаев Х. К., Опритова О. А., Чернов А. В., Гоголев Д. В. Оценка точности 3D-моделей, построенных с использованием беспилотных авиационных систем // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 211–228.
5. Вербная В. П., Хорошилов В. С., Комиссаров А. В. Оптимальный метод выбора лазерного сканера для различных видов инженерно-технических работ // Интерэкспо Гео-Сибирь-2015. Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (г. Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 204–208.
6. Аэрокосмический мониторинг нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса. Реальности и перспективы // Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / под ред. академика В. Г. Бондура. – М., 2012. – С. 15–37.
7. Бондур В. Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. – 2010. – № 6. – С. 3–17.
8. Бондур В. Г., Воробьев В. Е. Технологии обработки аэрокосмических изображений при мониторинге объектов нефтегазовой отрасли // Материалы Международной научно-технической конференции «Аэрокосмические технологии в нефтегазовом комплексе». – М. : ООО «Издательство "Нефть и газ"», 2009. – С. 59–60.
9. Аврунев Е. И., Карпик А. П., Мелкий В. А. Принципы формирования единого геопространства территорий // Проблемы геологии и освоения недр : сборник трудов XXIII Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня рождения академика К. И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К. В. Радугина : в 2 т. Т. 1. – 2019. – С. 428–429.
10. Лисицкий Д. В., Осипов А. Г., Савиных В. Н., Кичеев В. Г., Макаренко Н. Н. Геоинформационное пространство: реальный мир и дополненная реальность // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Между-

нар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геопространство в социогуманитарном дискурсе» : сб. материалов (г. Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – С. 31–37.

11. Комиссаров А. В., Радченко Л. К. Геоинформационная модель мониторинга технического состояния трубопроводов нефтегазового комплекса // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 44–48.

12. Корниенко С. Г., Хренов Н. Н., Василенко П. А. Развитие научных основ аэрокосмического мониторинга и обеспечения безопасности геотехнических объектов при освоении нефтегазовых месторождений Арктики и Субарктики // Георесурсы, геознергетика, геополитика. – 2013. – № 1 (7). – С. 15.

13. Хренов Н. Н. Оценка состояния газопровода на Ямале в период строительства // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 4. – С. 67–70.

14. Хренов Н. Н. Аэрокосмические методы в комплексе исследований по оценке технического состояния северных трубопроводов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2009. – № 3. – С. 55–59.

15. Хренов Н. Н. Диагностика состояния газопроводных геотехнических систем на основе сочетания дистанционного зондирования и наземных методов // Геодезия и картография. – 2009. – № 5. – С. 36–40.

16. Хренов Н. Н. Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Аэрокосмические методы и обработка материалов съемок : монография. – М. : Газоил пресс, 2003. – 352 с.

17. Горбачева А. А., Аврунев Е. И. Применение беспилотных летательных аппаратов при выполнении комплексных кадастровых работ // Проблемы геологии и освоения недр : сборник трудов XXIII Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию со дня рождения академика К. И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К. В. Радугина в 2-х томах. Т. 1. – 2019. – С. 436–437.

18. Гук А. П., Шляхова М. М. Некоторые проблемы построения реалистических измерительных 3D-моделей по данным дистанционного зондирования // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 4 (32). – С. 51–60.

19. Кадничанский С. А. Обоснование допустимой высоты фотографирования при стереотопографической съемке рельефа // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 3. – С. 31–35.

20. Костюк А. С. Особенности аэрофотосъемки со сверхлегких беспилотных летательных аппаратов // Омский научный вестник. – 2011. – № 1 (104). – С. 236–240.

21. Костюк А. С. Расчет параметров и оценка качества аэрофотосъемки с БПЛА // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 83–87.

22. Михайлов А. П., Чибуничев А. Г. Фотограмметрия / Под общ. ред. А. Г. Чибуничева. – М. : МИИГАиК, 2016. – 292 с.

23. Никитин В. Н., Семенцов А. В. Опыт построения ортофотоплана по данным крупномасштабной аэрофотосъемки, выполненной с использованием неметрической цифровой камеры // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 12–17.

24. Хлебникова Т. А., Опритова О. А. Экспериментальные исследования построения и использования плотной цифровой модели по материалам беспилотной авиационной системы // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019. XV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 9 т. (Новосибирск, 24–26 апреля 2019 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. Т. 4, № 2. – С. 213–220.

25. Хлебникова Т. А., Опритова О. А., Аубакирова С. М. Экспериментальные исследования точности построения фотограмметрической модели по материалам БПЛА // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 1. – С. 32–37.

26. Руководство пользователя Agisoft Metashape Professional Edition, версия 1.5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_ru.pdf.

27. Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемки ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. – М. : ЦНИИГАиК, 2002.

Получено 17.02.2020

© Д. В. Долгополов, 2020

POSSIBILITIES OF USING UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS TO CONTROL COMPLIANCE OF CONSTRUCTION RESULTS OF PIPELINE TRANSPORT FACILITIES WITH DESIGN SOLUTIONS

Daniil V. Dolgoplov

JSC SpaceInfo Geomatics, 51, Dekabristov St., Moscow, 127490, Russia, Ph. D., Technical Director, phone: (905)714-13-77, e-mail: daniil.dolgoplov@gmail.com

The article presents the results of experimental studies of the use of aerial photography materials using unmanned aviation systems for three-dimensional modeling of pipeline transport facilities and the construction of the information model "How Built." An experiment was performed on three-dimensional modeling of the construction object on the basis of data obtained with the help of unmanned aircraft systems, accuracy of the obtained model was determined. The aim of the study is to develop a methodology for using unmanned aviation systems to control compliance of the results of construction of pipeline transport facilities with design solutions. The results of the pilot studies show that it is possible to use these unmanned aircraft systems to monitor deviations from the working documentation during construction works on the site. The proposed solution can be used as a methodological basis for monitoring the results of construction of pipeline transport facilities by design solutions within the framework of construction works.

Keywords: 3D model, information model, unmanned aerial system, land laser scanning, point cloud, objects of a pipeline transport, accuracy spatial, mean square error

REFERENCES

1. Shevchenko, G. G., Gura, D. A., & Akopyan, G. T. (2018). Application of ground laser scanning in construction and bim technologies. *Nauchnye trudy KubGTU [Scientific Works of the Kuban State University]*, 2, 251–260 [in Russian].
2. Seredovich, V. A., & Komissarov, D. V. (2005). Status, problems and prospects of ground laser scanning technology. In *Sbornik materialov Geo-Sibir'-2005: T. 1, ch. 1 [Proceedings of GEO-Siberia-2005: Vol. 1, Part 1]* (pp. 193–196). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
3. Seredovich, V. A., Komissarov, A. V., Komissarov, D. V., & Shirokova, T. A. (2009). *Nazemnoe lazernoe skanirovanie [Terrestrial laser scanning]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 261 p. [in Russian].
4. Avrunev, E. I., Yambaev, Kh. K., Opritova, O. A., Chernov, A. V., & Gogolev, D. V. (2018). Accuracy evaluation of 3d models by using unmanned aerial system. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(3), 211–228 [in Russian].
5. Verbnaya, V. P., Khoroshilov, V. S., & Komissarov, A. V. (2015). Optimal method of selecting a laser scanner for different types of engineering work. In *Sbornik materialov Interexpo Geo-Sibir'-2015: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2015: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 204–208). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
6. Bondur, V. G. (Ed.). (2012). Aerospace monitoring of oil and gas-bearing territories and objects of the oil and gas complex. Realities and perspectives. In *Aerokosmicheskiy monitoring ob"ektov neftegazovogo kompleksa [Aerospace Monitoring of Oil and Gas Facilities]* (pp. 15–37). Moscow [in Russian].
7. Bondur, V. G. (2010). Aerospace methods and technologies for monitoring oil and gas-bearing territories and objects of the oil and gas complex. *Issledovaniye Zemli iz kosmosa [Earth Exploration from Space]*, 6, 3–17 [in Russian].
8. Bondur, V. G., & Vorobyev, V. E. (2009). Technologies for processing aerospace images for monitoring oil and gas facilities. In *Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii: Aerokosmicheskiye tekhnologii v neftegazovom komplekse [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference: Aerospace Technologies in the Oil and Gas Industry]* (pp. 59–60). Moscow: LLC "Oil and Gas" Publ. [in Russian].
9. Avrunev, E. I., Karpik, A. P., & Melkiy, V. A. (2019). Principles of formation of the united geospatial territories. In *Sbornik trudov XXIII Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M. A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 120-letiyu so dnya rozhdeniya akademika K. I. Satpaeva, 120-letiyu so dnya rozhdeniya professora K. V. Radugina: Problemy geologii i osvoeniya neдр [Proceedings of the 22th*

International Scientific Symposium of Students, Postgraduates and Young Scientists devoted to the 120th anniversary of Academician K. I. Satpaev and 120th anniversary of Professor K. V. Radugin: Problems of Geology and Subsurface Development] (pp. 428–429). Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ. [in Russian].

10. Lisitskiy, D. V., Osipov, A. G., Savinykh, V. N., Kicheyev, V. G., & Makarenko, N. N. (2018). Geoinformation space: real world and augmented reality. In *Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2018: T. 6. Geoinformatsionnoye prostranstvo: realnyy mir i dopolnennaya realnost' [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia 2018: Vol. 6. Geo-Information Space: Real World and Augmented Reality]* (pp. 31–37). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

11. Komissarov, A. V., & Radchenko, L. K. (2014). Geoinformation model for monitoring the technical condition of oil and gas pipelines. In *Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2014: T. 2. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2014: Vol. 2. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 44–48). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

12. Kornienko, S. G., Khrenov, N. N., & Vasilenko, P. A. (2013). Development of scientific bases of the aerospace geocological monitoring and security of geotechnical objects at exploitation of oil and gas deposits of the arctic and subarctic region. *Georesursy. Geoenergetika. Geopolitika [Georesources. Geoenergy. Geopolitics]*, 1, P. 15 [in Russian].

13. Khrenov, N. N. (2011). Assessment of Yamal pipeline during construction. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 4, 67–70 [in Russian].

14. Khrenov, N. N. (2009). Aerospace methods in the complex of studies to assess the technical condition of Northern pipelines. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 3, 55–59 [in Russian].

15. Khrenov, N. N. (2009). Diagnostics of gas pipeline geotechnical systems based on a combination of remote sensing and ground-based methods. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 5, 36–40 [in Russian].

16. Khrenov, N. N. (2003). *Osnovy kompleksnoy diagnostiki severnykh truboprovodov. Aerokosmicheskie metody i obrabotka materialov s"emok [Fundamentals of complex diagnostics of Northern pipelines. Aerospace methods and processing of survey materials]*. Moscow: Gazoil Press Publ., 352 p. [in Russian].

17. Gorbacheva, A. A., & Avrunov, E. I. (2019). The use of unmanned aerial vehicles when performing complex cadastral works. In *Sbornik trudov XXIII Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M. A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 120-letiyu so dnya rozhdeniya akademika K. I. Satpaeva, 120-letiyu so dnya rozhdeniya professora K. V. Radugina: Problemy geologii i osvoeniya nedr [Proceedings of the 22th International Scientific Symposium of Students, Postgraduates and Young Scientists devoted to the 120th anniversary of Academician K. I. Satpaev and 120th anniversary of Professor K. V. Radugin: Problems of Geology and Subsurface Development]* (pp. 436–437). Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ. [in Russian].

18. Guk, A. P., & Shlyakhova, M. M. (2015). Several aspects of metric realistic 3D models creation remote sensing data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(32), 51–60 [in Russian].

19. Kadnichansky, S. (2013). Substantiation of permissible photographing height for stereo topographic survey. *Izvestiya vuzov. geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 3, 31–35 [in Russian].

20. Kostyuk, A. S. (2011). Features aerial photographs by ultra-light unmanned aerial vehicles. *Omskiy Nauchnyy Vestnik. Seriya Obshchestvo. Istoriya. Sovremennost' [Omsk Scientific Bulletin. Series Society. History. Modernity]*, 1(104), 236–240 [in Russian].

21. Kostyuk, A. S. (2010). Calculation of the parameters and evaluation of quality with UAV aerial photography. In *Sbornik materialov Geo-Sibir'-2010: T. 4, ch. 1 [Proceedings of GEO-Siberia 2010: Vol. 1, Part I]* (pp. 83–87). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

22. Mikhaylov, A. P., & Chibunichev, A. G. (2016). *Fotogrammetriya [Remote sensing]*. Moscow: MIIGAiK Publ. [in Russian].

23. Nikitin, V. N., & Sementsov, A. V. (2013). Experience of orthophoto construction by large-scale aerial photographs taken with nonmetric digital camera. In *Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2013: T. 1. Distantionnyye metody zondirovaniya zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchey sredy, geokologiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia 2013: Vol. 1. Earth Remote Sensing and Photogrammetry, Environmental Monitoring and Geoenvironmental Ecology]* (pp. 12–17). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

24. Khlebnikova, T. A., & Opritova, O. A. (2019). Experimental studies of the dense digital model accuracy by using UAV. In *Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2019: T. 4, no. 2 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2019: Vol. 4, No. 2]* (pp. 213–220). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
25. Khlebnikova, T. A., Opritova, O. A., & Aubakirova, S. M. (2018). Experimental studies of photogrammetric model accuracy by UAV. In *Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2018: T. 1, no. 4 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia 2018: Vol. 1, No. 4]* (pp. 32–37). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
26. Agisoft Metashape Professional Edition. User Guide. (n. d.). Retrieved from https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_ru.pdf [in Russian].
27. *Instruksiya po razvitiyu s"emochnogo obosnovaniya i s"emki situatsii i rel'efa s primeneniem global'nykh navigatsionnykh sputnikovykh sistem GLONASS i GPS [Instructions for developing the survey justification and shooting the situation and terrain using global navigation satellite systems GLONASS and GPS]*. (2002). Moscow: CNIIGAiK Publ. [in Russian].

Received 17.02.2020

© D. V. Dolgoplov, 2020

УДК 528.48:621.24

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-96-103

КРИТЕРИИ КОНТРОЛЯ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Александр Владимирович Комиссаров

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-08-66, e-mail: a.v.komissarov@sgugit.ru

Мария Михайловна Шляхова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-08-66, e-mail: m.m.shlyakhova@sgugit.ru

Максим Александрович Алтынец

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)361-08-66, e-mail: m.a.altincev@sgugit.ru

Екатерина Николаевна Кулик

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383)361-08-66, e-mail: e.n.kulik@sgugit.ru

Целью данной статьи является выбор и обоснование критериев контроля защитных сооружений магистральных трубопроводов. Магистральные трубопроводы постоянно подвергаются воздействиям со стороны внешних и внутренних факторов. Для обеспечения непрерывной работы трубопроводов возводятся специальные защитные сооружения. Главная задача создания защитных сооружений – минимизация экономических потерь и сохранение экологических характеристик объекта. Все существующие защитные сооружения можно разделить на две большие группы: земляные и инженерные. Каждая из этих групп включает различные виды сооружений. Все они призваны обеспечить сохранность магистральных трубопроводов от определенного природного явления. Вне зависимости от вида защитного сооружения также необходимо обеспечивать постоянный мониторинг их геометрического состояния. Для мониторинга могут применяться различные данные, среди которых особую роль играют данные дистанционного зондирования Земли. Один из основных вопросов при мониторинге сооружений – обоснование возникающих погрешностей измерений. Это требует знаний положений теории комплексных точностных расчетов. Также следует принимать во внимание, что при любых расчетах обязательно необходим визуальный осмотр дефектов сооружения. В результате анализа в статье дана классификация защитных сооружений, приводятся положения теории точностных расчетов, необходимых для обоснования погрешностей контроля защитных сооружений. На основании данных положений выделены основные нормы точности. Результатами выполненного анализа являются численные значения критериев точности различных видов защитных сооружений.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, дистанционное зондирование Земли, нормы точности, контроль, точность, активные методы зондирования, земляные защитные сооружения, инженерные защитные сооружения

Введение

Главной задачей защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов является за-

щита нефтепровода от природных условий и явлений и влияния человеческого фактора.

Природные явления представляют собой геологические, гидрогеологические и гид-

рологические процессы, которые представляют собой основную причину разрушения нефтепровода, а ключевой вред человеческого фактора заключается в хищении нефтепродуктов и порче имущества нефтепровода, что впоследствии приводит к значительным экологическим и экономическим потерям [1–3].

В целях поддержания работоспособности защитных сооружений необходим их периодический мониторинг.

Для любого мониторинга следует установить предельные допустимые смещения (перемещения) объекта в целом или его отдельных частей. При выделении критериев контроля защитных сооружений был проведен анализ нормативных документов и литературных источников, но в результате он не позволил выявить необходимые параметры для мониторинга магистральных трубопроводов. Вследствие этого было принято решение о необходимости обоснования предельных смещений на основе результатов моделирования и экспериментальных исследований.

Материалы и методы

Существуют стандарты и требования к проектированию и эксплуатации линейной части трубопровода, мониторинг которой на основе данных дистанционного зондирования [4–9] позволяет решать следующие задачи:

- обнаружение утечек;
- выявление участков трубопроводов, потерявших устойчивое положение;
- поиск и обнаружение повреждений обваловки, засыпки на трубопроводах;
- обеспечение оперативной локализации аварий на трубопроводах, эвакуация пострадавших с места аварии [10];
- визуальное определение отклонений от требований и выявление нарушений, возникших на сооружениях сторонних организаций и реально угрожающих целостности трубопровода [11];
- несанкционированные проникновения и действия на поднадзорной территории.

Классификация защитных сооружений представлена в таблице.

Классификация защитных сооружений в зависимости от воздействия природных и техногенных явлений

Природные и техногенные явления	Защитные сооружения
Эрозия	<ul style="list-style-type: none"> – обратная отсыпка поверхности грунтов (укладка биомата); – грунтовые валы; – укрепление откосов; – водоотводные лотки (используется каменный материал); – укрепление берегов щебнем; – укрепление склона железобетонными плитами; – протекторная защита; – дренажные установки; – песчаный слой и обвалование (болотистая местность); – скрепление грунта растительностью
Затопление	– дамба из камня (система водопонижения, состоящая из канав)
Оползни	<ul style="list-style-type: none"> – ряды свай; – бетонные барьеры; – геоматы; – отсыпка склона щебнем; – геоматы
Разливы нефти	<ul style="list-style-type: none"> – обвалование; – шламовый амбар из грунта
Опасные геологические процессы (вечномерзлые грунты, просадочные грунты и т. д.)	<ul style="list-style-type: none"> – отсыпка из песчаного грунта и обвалование; – устройство трубопровода на свайном фундаменте

Все представленные в таблице защитные сооружения можно подразделить на два основных вида [12–17]:

- земляные;
- инженерные.

К земляным сооружениям следует отнести все сооружения, возводимые из грунта или иных инертных материалов. Назначение этих сооружений следующее [18–20]:

- предотвращение растекания углеводородов при аварии;
- термоизоляционная функция для поддержания постоянной температуры в грунте;
- защита от воздействия человека и животных на трубопровод.

Инженерные объекты предназначены для предотвращения деформаций трубопроводов. При этом в зависимости от их функционального назначения и характера нагрузок регламентируются точность и параметры контроля [20].

Для контроля физического состояния и геометрических параметров защитных сооружений требуется выполнять мониторинг. При этом произведенный анализ нормативных документов и литературных источников не позволил выявить критерии требуемой точности мониторинга.

Методология

Для обоснования погрешностей контроля защитных сооружений воспользуемся принципиальными положениями теории точностных расчетов [21]:

1) точностные расчеты должны быть комплексными, причем это требование необходимо правильно реализовать в трех основных направлениях:

- при обязательном полном учете в расчетах влияний всей совокупности основных факторов, характеризующих свойства объекта контроля;
- при обязательном параллельном расчете точности не только одного вида геометрического параметра, но и других характерных для данного объекта геометрических параметров;
- выполнение расчетов точности всей «технологической цепочки», начиная от точности

контроля геометрического параметра сооружения и оборудования до точности измерения элементов в геодезических построениях;

2) точностные расчеты должны быть проектными, т. е. необходимо обеспечить возможность проводить их заблаговременно. Иными словами, они должны быть направлены в будущее, а не в прошлое;

3) точностные расчеты должны быть нормативными, т. е. их следует принимать исходя из принятых на данном производстве нормативов на техническое состояние конструкций зданий, сооружений и оборудования или на монтажные и выверочные работы;

4) точностные расчеты должны быть конкретными, т. е. относиться к определенному объекту контроля и условиям его эксплуатации; в более полном виде они должны выполняться для типовых и конструктивно новых объектов, но при обязательном соблюдении требований полной конкретности задаваемых исходных условий; менее полными – для повторяющихся и близким к типовым объектам контроля, но также при обязательном условии конкретного учета всех существенных отклонений реального объекта от типового.

В результате выполненного анализа выделим основные виды контроля, требующие определения норм точности [21–24]:

- контроль постоянных параметров;
- контроль переменных параметров.

Нормы точности контроля постоянных параметров (пассивный контроль) предназначены для решения точностных задач, связанных с оценкой отклонений геометрических параметров от проектных значений для конструкций сооружений и технологического оборудования после их изготовления, в процессе строительства, монтажа, ремонта, а также при проверке их состояния согласно эксплуатационным требованиям. Точность контроля постоянных параметров (пассивный контроль), как правило, устанавливается расчетным путем введения понижающего коэффициента (коэффициента точности), принципом равного или пренебрегаемого влияния погрешностей измерений.

Нормы точности контроля переменных параметров применяются для изучения технического состояния конструкций сооружений и оборудования производственных объектов,

меняющих свое положение во времени (активный контроль). Точность контроля переменных параметров рассчитывается путем деления норм точности измерения постоянных на число контролируемых интервалов слежения.

Для контроля защитных сооружений целесообразно применять нормы контроля постоянных параметров. Если известны технологические или эксплуатационные допуски на геометрические параметры, характеризую-

щие техническое состояние защищаемых объектов, точность устанавливается введением понижающего коэффициента на технологические и эксплуатационные допуски. При этом понижающий коэффициент следует принимать равным 0,4–0,7 в зависимости от класса опасности возникновения аварийной ситуации или разлива углеводородов. В этом случае точность контроля выражается следующими формулами [21]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{(п)} &= c_n \Delta_{\text{э}}; \quad \Delta_{(п)} = c_n \Delta_{\text{тех}}; \quad \sigma = \frac{m_{(п)} \Delta_{\text{э}}}{6} = \frac{c_n \Delta_{\text{тех}}}{6} \\ \delta_{(п)} &= c_n \delta_{\text{э}}; \quad \delta_{(п)} = c_n \delta_{\text{тех}}; \quad \sigma = \frac{m_{(п)} \delta_{\text{э}}}{3} = \frac{c_n \delta_{\text{тех}}}{3} \\ \Delta &= 2\delta = 6\sigma = 6m \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $\Delta_{(п)}$ – допуск на измерения при пассивном контроле;

$\Delta_{\text{э}}$ и $\Delta_{\text{тех}}$ – эксплуатационные и технологические допуски соответственно;

$\delta_{(п)}$ – допустимое отклонение измерений при пассивном контроле;

$\delta_{\text{э}}$ и $\delta_{\text{тех}}$ – эксплуатационные и технологические предельные отклонения соответственно;

σ – среднее квадратическое отклонение результатов измерений при пассивном контроле;

$m_{(п)}$ – средняя квадратическая погрешность измерения при пассивном контроле.

Результат и обсуждение

Для расчета значений предельных деформаций был выполнен анализ производственных материалов мониторинга защитных сооружений (рис. 1). В результате установлено следующее:

- при выявлении смещений бетонных защитных сооружений (подпорная стенка, фундамент и т. д.) более 15 мм появляются трещины. Данные выводы также подтверждаются материалами моделирования в программном комплексе PLAXIS;

- при выявлении смещений для защитных сооружений, установленных на свайных фундаментах, предельные допустимые смещения следует устанавливать не более 2 мм, так как при моделировании процессов уставлено, что максимальная относительная разность осадок ($\Delta h/L$) не должна превышать 0,0007–0,001;

- для земляных защитных сооружений контроль можно выполнить путем топографической съемки, для которой погрешность

определения высот относительно ближайших пунктов съемочной сети составляет 12–15 см.

Рис. 1. Разрушение фундамента защитного сооружения при его смещении на 18 мм

Ввиду того, что защитные сооружения располагаются на большом протяжении, целесообразно выполнять мониторинг по данным активного дистанционного зондирования, а именно: по данным радиолокационной, лазерной и интерферометрической съемок (рис. 2).

Рис. 2. Пример данных активного дистанционного зондирования:

а) данные радиолокационной съемки; б) данные лазерной съемки; в) данные интерферометрической съемки

Заключение

В результате выполненного анализа можно выделить следующие критерии контроля защитных сооружений:

- земляные сооружения – точность высотного и планового положения составляет 15 см;
- бетонные сооружения – точность высотного положения 15 мм, плановое 10 мм;
- свайные фундаменты – точность высотного положения 2 мм, плановое 10 мм.

Контроль земляных сооружений следует выполнять на основе съемки поперечников относительно ближайших реперов, положение которых устойчиво во времени.

Контроль бетонных и свайных сооружений необходимо выполнять по установленным маркам или маркированным точкам, чтобы обеспечить единство временного контроля.

Помимо инструментального контроля для всех представленных сооружений необходимо выполнять визуальный осмотр на предмет поиска различного рода дефектов сооружения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Разработка теории и технологических решений контроля состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов методами активного дистанционного зондирования», № 0807-2020-0002).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хренов Н. Н. Аэрокосмические методы в комплексе исследований по оценке технического состояния северных трубопроводов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2009. – № 3. – С. 55–59.
2. Стандарт организации положение о воздушном патрулировании трасс магистральных трубопроводов ОАО «Газпром» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://zinref.ru/000_uchebniki/01500_gaz/301_00_STO_gazprom_raznie/154.htm. – Загл. с экрана.
3. Аэрокосмическая и аэровизуальная диагностика газопроводов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gazdiagnoz.narod.ru/gaz09.html>. – Загл. с экрана.
4. СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gostrf.com/normadata/1/4293793/4293793668.pdf>.
5. ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200100941>.
6. СП 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/17066/>.
7. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/1906/>.

8. СП 425.1325800.2018. Инженерная защита территорий от эрозионных процессов. Правила проектирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs-api.cntd.ru/document/554403584>.
9. Сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ : учеб. пособие для вузов / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ); сост. В. Г. Крец [и др.]. – 2-е изд., испр. и доп. – Томск : Изд-во ТПУ, 2019. – 356 с.
10. Галиахметова А. В., Ядзинская М. Р., Канева И. В. Оценка природных и техногенных факторов для целей инженерной защиты трубопроводов в криолитозоне // Инженерные изыскания. – 2013. – № 1. – С. 52–55.
11. Бабин Л. А., Григоренко П. Н., Ярыгин Е. Н. Типовые расчеты при сооружении трубопроводов : учеб. пособ. для вузов. – М : Недра, 1995. – 246 с.
12. Дятлов В. А. Обслуживание и эксплуатация линейной части магистральных газопроводов. – М. : Недра, 1984. – 240 с.
13. Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. И. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов. – М. : Ин-октаво, 2005. – 368 с.
14. Хренов Н. Н. Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Аэрокосмические методы и обработка материалов съемок : монография. – М. : Газоил пресс, 2002. – 352 с.
15. Аскарлов Р. М., Китаев С. В., Исламов И. М. О технологии выявления участков трубопроводов с изгибными напряжениями при пересечении ими геодинамических зон // Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – № 5. – С. 18–25.
16. Хасенова Д. Ф. Возможности применения методов аэрокосмического мониторинга для обнаружения утечек из нефтегазопроводов // Технические науки: теория и практика : материалы I Междунар. науч. конф. (г. Чита, апрель 2012 г.). – Чита : Молодой ученый, 2012. – С. 135–139.
17. Шилин Б. В. Тепловая аэросъемка при изучении природных ресурсов. – Л. : Гидрометеиздат, 1980. – 247 с.
18. Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса [Электронный ресурс] / Под ред. академика В. Г. Бондура. – М. : Научный мир, 2012. – Режим доступа: <http://www.aerocosmos.info/pdf/2012/2012.pdf>.
19. Комаров В. А., Семенова З. В., Бронников Д. А., Нигрей А. А. О структуре системы физической защиты магистральных трубопроводов от преднамеренных угроз // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 87–100.
20. Минкин Д. Ю., Терехин С. Н., Корольков А. П., Османов Ш. А. Космический тепловизионный мониторинг нефтегазопроводного транспорта // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26, № 12. – С. 45–51.
21. Жуков Б. Н. Геодезический контроль сооружений и оборудования промышленных предприятий : монография. – Новосибирск : СГГА, 2003. – 356 с.
22. Жарников В. Б., Дьяков Б. Н., Жуков Б. Н. и др. Геодезическое обеспечение эксплуатации промышленных объектов. – М. : Недра, 1992. – 160 с.
23. Жуков Б. Н. Нормирование точности – основа повышения качества инженерно-геодезических работ // Тр. 7 съезда ВАГО «Астрономические и геодезические исследования». – М., 1982. – С. 76–79.
24. Жуков Б. Н. Нормирование точности геодезических измерений при возведении сооружений, монтаже оборудования и контроле за их состоянием // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1983. – № 4. – С. 28–35.

Получено 29.09.2020

© А. В. Комисаров, М. М. Шляхова, М. А. Алтынцев, Е. Н. Кулик, 2020

CRITERIA FOR PROTECTIVE CONSTRUCTION MONITORING OF MAIN PIPELINES

Alexander V. Komissarov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Associate Professor, Head of the Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (383)361-01-59, e-mail: a.v.komissarov@sgugit.ru

Maria M. Shlyahova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (383)361-01-59, e-mail: m.m.shlyakhova@sgugit.ru

Maxim A. Altyntsev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (383)343-29-55, e-mail: m.a.altincev@sgugit.ru

Ekaterina N. Kulik

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (383)361-01-59, e-mail: e.n.kulik@sgugit.ru

The purpose of this article is to select and substantiate the criteria for protective construction monitoring of main pipelines. Main pipelines are constantly exposed to influences of external and internal factors. Special protective constructions are being raised to ensure the continuous operation of the pipelines. The main goal of creating protective constructions is to minimize economic losses and preserve the environmental characteristics of the facility. All existing protective constructions can be divided into two large groups: earth work and engineering constructions. Each of these groups includes different types of the constructions. All of them are designed to ensure safety of main pipelines from a certain natural phenomenon. It is also necessary to ensure constant monitoring of their geometric state regardless the protective construction type. Various data can be used for monitoring, among which the Earth remote sensing data perform a special role. One of the main issues in the construction monitoring is the explanation of the arising measurement errors. This requires knowledge of complex precision calculations theory. It is also necessary to take into account that a visual inspection of the construction defects is imperative in any calculations. A classification of protective constructions is given. The base of the accuracy calculation theory that is necessary to substantiate the errors in the protective construction monitoring is discussed. The main accuracy standards based on this theory are highlighted. The results of the performed analysis are the numerical values of the accuracy criteria for various protective construction types.

Keywords: main pipeline, remote sensing, accuracy standards, control, accuracy, active remote sensing, earth protective constructions, engineering protective constructions

REFERENCES

1. Xrenov, N. N. (2009). Aerospace methods in a complex of studies to assess the technical condition of northern pipelines. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 3, 55–59 [in Russian].
2. Organization standard regulations on air patrolling of the main pipelines of OAO Gazprom. (n. d.). Retrieved from https://zinref.ru/000_uchebniki/01500_gaz/301_00_STO_gazprom_raznie/154.htm [in Russian].
3. Aerospace and aerovisual diagnostics of gas pipelines. (n. d.). Retrieved from <http://gazdiagnoz.narod.ru/gaz09.html> [in Russian].
4. Code of Practice. (2012). SP 58.13330.2012. Hydraulic structures. Basic Provisions. Retrieved from <http://gostrf.com/normadata/1/4293793/4293793668.pdf> [in Russian].
5. Standards Russian Federation. (2004). GOST 31937-2011. Buildings and constructions. Rules for inspection and monitoring of technical condition. Retrieved from <http://docs.cntd.ru/document/1200100941> [in Russian].
6. Code of Practice. (2016). SP 115.13330.2016. Geophysics dangerous natural influences. Retrieved from <https://minstroyrf.gov.ru/docs/17066/> [in Russian].
7. Code of Practice. (2012). SP 116.13330.2012. Engineering protection of territories, buildings and structures from hazardous geological processes. Basic Provisions. Retrieved from <https://minstroyrf.gov.ru/docs/1906/> [in Russian].

8. Code of Practice. (2018). SP 425.1325800.2018 Engineering protection of territories from erosion processes. Design rules. Retrieved from <http://docs-api.cntd.ru/document/554403584> [in Russian].
9. Krez, V. G. (2019). *Sooruzhenie i ekspluatatsiya gazonefteprovodov i gazoneftekhranilishch [Construction and operation of gas and oil pipelines and gas and oil storage facilities: manual for graduate student]*. (2nd ed.). Tomsk: TPU Publ., 356 p. [in Russian].
10. Galiahmetova, A. V., Jadzinskaja, M. P., & Kaneva I. V. (2013). Assessment of natural and man-made factors for the purposes of engineering protection of pipelines in the permafrost zone. *Inzhenernye izyskaniya [Engineering Survey]*, 1, 52–55 [in Russian].
11. Babin, L. A., Grigorenko, P. N., & Jarygin, E. N. (1995). *Tipovye Raschety pri sooruzhenii truboprovodov [Typical calculations for the construction of pipelines]*. Moscow: Nedra Publ., 246 p. [in Russian].
12. Djatlov, V. A. (1984). *Obsluzhivanie i ekspluatatsiya lineynoy chasti magistral'nykh gazoprovodov [Maintenance and operation of the linear part of the main gas pipelines]*. Moscow: Nedra Publ., 246 p. [in Russian].
13. Vorobjov, Ju. L., Akimov, V. A., & Sokolov, Ju. I. (2005). *Preduprezhdenie i likvidatsiya avariynykh razlivov nefti i nefteproduktov [Prevention and response to accidental oil and oil product spills]*. Moscow: In-oktavo Publ., 368 p. [in Russian].
14. Xrenov, N. N. (2002). *Osnovy kompleksnoy diagnostiki severnykh truboprovodov. Aerokosmicheskie metody i obrabotka materialov s'emok [Fundamentals of comprehensive diagnostics of northern pipelines. Aerospace methods and processing of filming materials]*. Moscow: Gazoil Press, 352 p. [in Russian].
15. Askarov, R. M., Kitaev, S. V., & Islamov, I. M. (2019). On the technology of identifying pipeline sections with bending stresses when they intersect geodynamic zones. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring geosursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]*, 5, 18–25 [in Russian].
16. Hasenova, D. F. (2012). Possibilities of using aerospace monitoring methods for detecting leaks from oil and gas pipelines. In *Sbornik materialov I Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Tekhnicheskie nauki: teoriya i praktika" [Proceedings of I International Scientific Conference "Technological Sciences: Science and Practice"]* (pp. 135–139). Chita: Molodoy uchenyy Publ. [in Russian].
17. Shilon, B. V. (1980). *Teplovaya aeros'emka pri izuchenii prirodnnykh resursov [Thermal aerial photography in the study of natural resources]*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 247 p. [in Russian].
18. Bondur, V. G. (2012). *Aerokosmicheskiy monitoring ob'ektov neftegazovogo kompleksa [Aerospace monitoring of oil and gas facilities]*. Moscow: Nauchnyy mir Publ. Retrieved from http://www.aerocosmos.info/pdf/2012/2012_.pdf [in Russian].
19. Komarov, V. A., Semenova, Z. V., Bronnikov, D. A., & Nigrej, A. A. (2019). On the structure of the system of physical protection of trunk pipelines from deliberate threats. *Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo [Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering]*, 19(1), 87–100 [in Russian].
20. Minkin, D. Ju., Terehin, S. N., Korolkov, A. P., & Osmanov, Sh. A. (2017). Space thermal imaging monitoring of oil and gas pipeline transport. *Pozharovzryvobezopasnost' [Fire and Explosion Safety]*, 26(12), 45–51 [in Russian].
21. Zhukov, B. N. (2002). *Geodezicheskiy kontrol' sooruzheniy i oborudovaniya promyshlennykh predpriyatiy [Geodetic control of structures and equipment of industrial enterprises]*. Novosibirsk: SGGA Publ., 356 p. [in Russian].
22. Zharnikov, V. B., Djakov, B. N., Zhukov, B. N., & and etc. (1992). *Geodezicheskoe obespechenie ekspluatatsii promyshlennykh ob'ektov [Geodetic support for the operation of industrial facilities]*. Moscow: Nedra Publ., 160 p. [in Russian].
23. Zhukov, B. N. (1982). Accuracy standardization is the basis for improving the quality of engineering and geodetic works. *Trudy 7 s'ezda VAGO "Astronomicheskie i geodezicheskie issledovaniya" [Proceedings of the 7th Congress of VAGO "Astronomical and Geodetic Research"]* (pp. 76–79). Moscow [in Russian].
24. Zhukov, B. N. (1983). Standardization of the accuracy of geodetic measurements during the construction of structures, installation of equipment and monitoring their condition. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 4, 28–35 [in Russian].

Received 29.09.2020

© A. V. Komissarov, M. M. Shlyahova, M. A. Altyntsev, E. N. Kulik, 2020

ФАКТОРЫ, КРИТЕРИИ И ТРЕБОВАНИЯ К ИЗОБРАЗИТЕЛЬНОМУ КАЧЕСТВУ МАТЕРИАЛОВ АЭРОФОТОСЪЕМКИ, ПОЛУЧАЕМОЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ

Ирина Александровна Аникеева

АО «Роскартография», 109316, Россия, г. Москва, Волгоградский проспект, 45, стр. 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (499)177-50-00, e-mail: ia.anikeeva@roscartography.ru

Оценка изобразительного качества материалов аэрофотосъемки, получаемых для целей картографирования, представляет сегодня актуальную проблему. Целью данной статьи является разработка системы критериев изобразительного качества топографических аэрофотоснимков и требований к ним. В статье рассмотрен набор факторов, определяющих изобразительное качество снимков, – естественные (природные) условия съемки, технические и технологические условия и параметры. Проведен анализ влияния перечисленных факторов на материалы аэрофотосъемки, показаны вызванные ими основные дефекты снимков – нерезкость (смаз), дымка, потеря информации в светах и тенях, высокий уровень случайного шума, нарушение цветового баланса. Определены способы выявления данных дефектов и оценки степени их влияния на изобразительное качество аэроснимков как визуальными, так и автоматическими методами. Показано, что оценку изобразительного качества необходимо проводить в части структурометрических и градационных (фотографических) характеристик снимков. Также показано, что, кроме приведенных характеристик, на изобразительное качество аэроснимков могут оказывать влияние случайные факторы, появление которых не поддается прогнозированию. Вызванные данными факторами дефекты выявляются при визуальном контроле оператора. Приведены требования к части критериев изобразительного качества, которые позволяют установить данный этап исследования.

Ключевые слова: аэрофотоснимки, изобразительное качество, нерезкость снимка, дымка, потеря информации в светах и тенях, случайный шум, цветовой баланс, гистограмма, структурометрические характеристики, градационные (фотографические) характеристики

Введение

В настоящее время широкий спектр крупномасштабных картографических материалов (карты и планы, ортофотокарты и ортофотопланы, трехмерные модели местности, текстурированные фотореалистичным изображением, стереоскопические модели местности) создается на основе материалов аэрофотосъемки. По этой причине к аэрофотоснимкам, получаемым для целей картографирования, предъявляются высокие требования в ча-

сти измерительных свойств. Однако, качество получаемой продукции зависит не только от измерительных свойств снимков, на него в равной степени оказывает влияние их изобразительное качество. Очевидно, что даже при высокоточной геодезической привязке снимка, обладающего низким изобразительным качеством (например, нерезкий), и, как следствие, плохими дешифровочными свойствами, выполнить по нему точные измерения не представляется возможным ни в ручном, ни в автоматическом режимах.

В настоящее время единственным нормативным документом, регламентирующим качество материалов аэрофотосъемки, получаемых для целей картографирования, в части фотограмметрических и фотографических характеристик, является ГКИНП-09-32-80 «Основные положения по аэрофотосъемке, выполняемой для создания и обновления топографических карт и планов». Устанавливаемые этим документом требования к качеству относятся к материалам, получаемым аналоговыми аэрофотоаппаратами, и если в части фотограмметрических характеристик (углы наклона снимков, перекрытия, «елочка» и пр.) они не утратили своей актуальности и для снимков, получаемых современными цифровыми аэросъемочными камерами, то в части изобразительных свойств эти требования к цифровым аэрофотоснимкам не применимы.

В связи с этим проблема оценки изобразительного качества топографических аэрофотоснимков приобретает сегодня особую актуальность.

Целью данной статьи является разработка системы критериев изобразительного качества материалов аэрофотосъемки, получаемой для целей картографирования, формулировка требований к ним.

Для этого необходимо решение следующих задач:

- анализ факторов, влияющих на изобразительное качество материалов аэрофотосъемки;
- определение дефектов изобразительного качества снимков, возникающих вследствие влияния данных факторов;
- определение способов выявления данных дефектов и оценки степени их влияния на изобразительное качество аэроснимков.

Основная часть

Факторы, влияющие на изобразительное качество аэрофотоснимков

Изобразительное качество аэрофотоснимка определяется следующими основными факторами [1, 2]:

1) естественными (природными) условиями съемки, основными из которых являются освещенность и состояние атмосферы;

2) техническими условиями съемки – эволюциями носителя во время выполнения аэрофотосъемки, техническими особенностями съемочной камеры (наличие/отсутствие компенсации сдвига изображения, тип затвора и пр.);

3) техническими параметрами съемки, такими как время выдержки, настройка светочувствительности матрицы и др.;

4) технологическими параметрами первичной обработки снимков – радиометрической коррекции, преобразования гистограммы и пр.

Влияние перечисленных факторов при их тесной взаимосвязи может приводить к ухудшению изобразительного качества снимков. Ниже приведены основные дефекты материалов аэрофотосъемки, вызванные влиянием перечисленных факторов.

1. Нерезкость (смаз) на аэроснимках

Линейные и угловые перемещения носителя во время выполнения съемки приводят к нерезкости и смазам на изображении. Данная проблема особенно актуальна в связи со все более активным применением в практике аэрофотосъемочных работ комплексов на базе беспилотных воздушных судов (БВС). БВС обладают небольшой массой, что не позволяет им сохранять стабильность своего положения при выполнении аэросъемочных работ. Кроме того, наиболее широко применяющиеся аэросъемочные комплексы оборудованы нетопографическими камерами, в которых отсутствует компенсация сдвига изображения. Ограничения полезной нагрузки БВС также не позволяют устанавливать на борту гиростабилизирующие платформы.

Данные факторы приводят к тому, что границы контуров объектов на аэроснимках представляют собой не четкие контрастные линии, а размытые переходные полосы.

Общая размытость границ контуров определяется как резкость аэрофотоизображения, размытость деталей – как его четкость. Резкость и четкость изображения снижаются с увеличением светочувствительности матрицы, что особенно следует иметь в виду при крупномасштабной топографической аэросъемке (ГКИНП-02-121-79. Руководство по дешифрированию аэроснимков при топогра-

фической съемке и обновлении планов масштабов 1 : 2 000 и 1 : 5 000).

На рис. 1 приведены два фрагмента аэро-снимков, полученных с БВС. Несмотря на то,

что снимки получены при одних и тех же условиях (за один вылет при одинаковой высоте фотографирования), они обладают визу-ально различной резкостью (четкостью).

Рис. 1. Пример фрагментов аэрофотоснимков различной резкости (четкости): резкость (четкость) правого снимка заметно ниже, чем левого снимка

Для раздельного восприятия на аэроснимках изображений смежных объектов пограничная переходная полоса (или пограничный переход) между ними не должна превышать трети аэрофотоизображения каждого из объектов (ГКИНП-02-121-79).

Визуально нерезкость снимка можно оценить по изображению резких краев объектов – при сильном увеличении должна быть видна пикселизация. Пограничный переход – это участок изображения в виде строки / столбца, содержащий резкое изменение тона (значений)

пикселей от светлого к темному на сравнительно небольшом пиксельном интервале (несколько пикселей) [3, 4]. Для снимков, обладающих визуальной высокой резкостью (четкостью), длина пограничного перехода не превышает 5 пикселей. Если длина пограничного перехода пять и более пикселей, снимок выглядит нерезким, что снижает его дешифровочные и информационные свойства, а также приводит к ошибкам в опознавании и измерениях как в ручном, так и в автоматическом режимах (ухудшение работы коррелятора) (рис. 2).

Рис. 2. Пример изображения резкого края и пограничного перехода: а) на резком снимке; б) на нерезком снимке

Если на снимке имеются области засветки, на них также возникают пограничные переходы (рис. 3). Однако, такие пограничные переходы относятся к артефактам изображения и не могут быть использованы для оценки резкости (четкости) снимка.

Рис. 3. Пример пограничных переходов в областях засветки, использование их при оценке резкости снимков не допускается

Смаз является частным случаем нерезкости снимка. Он характерен нерезкостью в каком-либо направлении, как правило, в направлении движения камеры и возникает вследствие ее перемещения во время экспозиции. В результате смаза возникают двоения границ объектов съемки, нарушение геометрии (например, расположенные рядом равные объекты, такие как автомобили, бордюрный камень, дорожная разметка и т. п., имеющие одинаковый размер и форму, на снимке отображаются в виде объектов разного размера и площади в зависимости от ориентации данных объектов относительно оси аэросъемочного маршрута) (рис. 4).

Численно резкость изображения можно оценить с помощью градиентной характеристики пограничного перехода по формуле:

$$g_{\text{norm}} = \frac{\delta D}{L} \cdot \frac{3}{G-1}, \quad (1)$$

где δD – разность максимального и минимального значения пикселей пограничного перехода; L – длина пограничного перехода в пикселях; G – максимально возможное число градаций цветового тона; для изображения с радиометрическим разрешением 8 бит/пиксель, $G = 256$.

Градиентный показатель резкости g_{norm} является нормированной величиной, значение которой меняется в пределах от 0 до 1.

Чем ближе значение g_{norm} к 1, тем выше фотографическая резкость изображения и, соответственно, чем ближе оно к 0, тем изображение более нерезкое (или смазанное).

Рис. 4. Пример двоения изображения границ объектов местности и нарушения геометрии, вызванные смазом

Для оценки показателя резкости выбираются снимки с высокой контурной нагрузкой – застроенная территория, промышленные зоны – на таких снимках присутствуют изображения резких краев. Наибольшим градиентом обладают пограничные переходы, ориентированные вдоль строк или столбцов изображения. Кроме того, резкость изображения по данным направлениям также может быть неодинакова – например, в случае смаза, когда резкость изображения вдоль оси движения воздушного судна ниже, чем резкость в перпендикулярном направлении. Поэтому показатель резкости нужно вычислять по двум направлениям – вдоль строк $g_{\text{norm } x}$ и вдоль столбцов $g_{\text{norm } y}$ изображения.

Оценку резкости снимка можно выполнять как в ручном, так и в автоматическом режимах. На снимке выбирается статистически представительное число пограничных переходов. В случае оценки резкости в ручном режиме число пограничных переходов должно быть не менее 60 (не менее 30 ориентированных вдоль строк изображения и не менее 30 – вдоль столбцов). При автоматической оценке число пограничных переходов должно быть увеличено в зависимости от размера изобра-

жения (например, число пограничных переходов можно сделать кратным ширине изображения). Алгоритм автоматического поиска пограничных переходов, обладающих максимальным градиентом, описан в [3, 4]. В случае численной оценки резкости в ручном режиме пограничные переходы выбираются визуально при большом увеличении.

По каждому пограничному переходу по формуле (1) вычисляется нормированный показатель резкости, отдельно вдоль строк $g_{\text{norm } x}$ и вдоль столбцов $g_{\text{norm } y}$ изображения. Общее значение резкости вдоль строк и вдоль столбцов снимка вычисляется (2) как среднее из всех $g_{\text{norm } x}$ и $g_{\text{norm } y}$:

$$\bar{g}_{\text{norm}} = \frac{1}{n_{x,y}} \sum g_{\text{norm}_{x,y}}, \quad (2)$$

где n_x и n_y – число пограничных переходов вдоль строк и вдоль столбцов изображения соответственно.

Если значения $\bar{g}_{\text{norm } x}$ и $\bar{g}_{\text{norm } y}$ различаются несущественно (различие во втором знаке после запятой), то на снимке присутствует общая нерезкость. Если значения $\bar{g}_{\text{norm } x}$ и $\bar{g}_{\text{norm } y}$ различаются в первом знаке после запятой, значит на снимке присутствует смаз, направленный вдоль оси, по которой показатель резкости максимален.

Для резких снимков показатели $\bar{g}_{\text{norm } x}$ и $\bar{g}_{\text{norm } y}$ превышают значение 0,5.

В случае автоматической оценки резкости изображения по найденным пограничным переходам одновременно выполняется и оценка

фактической разрешающей способности – линейных размеров наименьшего объекта, различимого на снимке, выражающихся как в пикселях, так и в метрах. Алгоритм автоматической оценки фактической разрешающей способности снимка подробно описан в [3, 4].

2. Наличие дымки.

Воздействие воздушной дымки на аэро-съемку выражается, главным образом, в сокращении интервала яркостей ландшафтов, а, следовательно, и возможностей четкого раздельного воспроизведения на аэроснимках топографических объектов (особенно темных) (рис. 5). Для нейтрализации этого явления летно-съемочные работы должны выполняться, когда дымка визуально не воспринимается, а горизонтальная метеорологическая дальность видимости не менее 10 км (Руководство по дешифрированию аэроснимков при топографической съемке и обновлении планов масштабов 1 : 2 000 и 1 : 5 000).

Наличие дымки на снимке может определяться визуально как присутствие общего светлого фона и понижение контраста. Также присутствие дымки однозначно определяется по гистограмме идущими подряд нулевыми значениями в области малых яркостей пикселей (рис. 6). Выявление дымки по гистограмме может производиться как визуально, так и автоматически путем реализации простейших алгоритмов в любых программных средах, позволяющих строить гистограмму изображения и выполнять с ней математические действия – MathCad, MATLAB, Python и др.

Рис. 5. Пример влияния атмосферной дымки на дешифровочное качество аэроснимка

Рис. 6. Пример аэроснимка с дымкой и его гистограмма с нулевыми значениями в области малых яркостей пикселей

3. Потеря информации в светах и тенях.

Неправильный подбор экспозиции, ограничения динамического диапазона светочувствительной матрицы, а также некорректная постобработка аэроснимков являются причинами возникновения областей засветок и глубоких теней.

Области засветки на изображении проявляются в виде полигонов пикселей с максимальной яркостью и свидетельствуют о потере информации в светах. На рис. 7 приведен пример потери информации в светах в виде отсутствия текстуры крыш зданий.

Присутствие больших областей засветок на аэроснимках недопустимо. В качестве исключения допускаются единичные случаи, неизбежно возникающие в ясную солнечную погоду в результате прямого отражения сол-

нечных лучей от гладких поверхностей (крыш зданий, поверхностей водоемов). Такие области должны занимать небольшую площадь, носить локальный характер и не мешать дешифрированию объектов. Объекты в области светов должны быть отображены на снимках без потери структурных и текстурных характеристик.

Потеря информации в тенях проявляется в виде присутствия на аэроснимках глубоких теней, препятствующих дешифрированию попавших в них объектов (рис. 8). Присутствие подобных областей на снимках недопустимо.

Снимки должны обладать хорошей проработкой в тенях, т. е. объекты, попадающие в область теней высотных объектов, должны хорошо дешифрироваться (рис. 9).

Рис. 7. Пример областей засветки на аэроснимках

Рис. 8. Пример глубоких теней на аэроснимках, препятствующих дешифрованию попавших в них объектов

Рис. 9. Пример хорошей проработки деталей аэроснимка в тенях

Потери информации в светах/тенях могут быть выявлены путем визуальной оценки. Однако, наиболее надежный результат дает анализ гистограммы. Потери в светах/тенях определяются как наличие значений гистограммы для минимальных или максимально возможных значений пикселей. При достаточном радиометрическом разрешении [5] гистограмма имеет выброс в значении минимальной или максимальной яркости пикселя

(или в обоих сразу при наличии потери информации в светах и тенях одновременно). На рис. 10 приведен пример снимка, на котором имеются области засветки и потери в тенях и характерные выбросы значений гистограммы данного снимка в минимальном и максимальном значении пикселя. По гистограмме также однозначно определяется наличие дымки на данном снимке – нулевые значения ($hist = 0$) в области малых яркостей пикселей.

Рис. 10. Пример аэроснимка, на котором присутствуют области засветки, потери в тенях и дымка, и его гистограмма, имеющая характерные выбросы при минимальном и максимально возможном значении пикселя; присутствующая на снимке дымка также определяется по гистограмме наличием нулевых ее значений в области малых яркостей пикселей

Численно потерю информации в сетах/тенях можно оценить в процентном соотношении к общему числу пикселей изображения, т. е. процент потери в тенях – это отношение числа пикселей минимального значения (при наличии выброса гистограммы на этом значении пикселя, см. рис. 10) к общему числу пикселей изображения, а процент потери в светах – это отношение числа пикселей с максимально возможным значением, обеспечиваемым радиометрическим разрешением изображения (255 для радиометрического разрешения 8 бит/пиксель), к общему числу пикселей снимка.

Например, размер снимка на рис. 10 составляет $9\,000 \times 6\,732$ пикселя, соответственно, об-

щее количество пикселей – 60 588 000. Число пикселей минимального значения – 32 657, число пикселей со значением 255 – 374 676. Соответственно, процент потери в тенях для данного снимка составит $\approx 0,05\%$, а потеря в светах $\approx 0,62\%$. Из рис. 10 видно, что даже очень малый процент потери информации, как в тенях, так и в светах, приводит к существенному ухудшению дешифровочных свойств снимка.

В случае нехватки радиометрического разрешения гистограмма имеет вид усеченной фигуры в минимальном или максимальном значении яркости пикселя (или в обоих сразу) (рис. 11).

Рис. 11. Пример нехватки радиометрического разрешения снимка в области максимальных значений пикселей

4. Оценка наличия шума.

Недостаток освещенности снимаемой поверхности приводит к увеличению времени выдержки системой автоматического регулирования экспозиции камеры и повышению настроек светочувствительности матрицы, что может вызвать появление глубоких теней и повышение уровня случайного шума на снимке, ухудшающего его информационные (исчезновение деталей) и дешифровочные свойства (рис. 12).

Цифровой (случайный) шум на изображении – это случайно расположенные пиксели, значительно отличающиеся по яркости или цвету от средних яркостей или цвета соседних пикселей [6, 7]. Наличие цифрового шума на изображении можно оценить визуально

при большом увеличении участков с ровной однородной поверхностью (вода, ровные плоские крыши), а также областей теней, например, от многоэтажных домов и других высотных объектов (рис. 13).

При наличии технических возможностей, оценку шума предпочтительно выполнять автоматически с помощью специализированных программных средств, реализующих соответствующие алгоритмы [7–15]. В частности, для оценки уровня шума цифрового изображения хорошо зарекомендовал себя метод гармонического анализа, предложенный Е. М. Лапшенковым [7, 9]. Данный метод позволяет с высокой точностью определить уровень случайного шума (среднеквадратическое отклонение – СКО – N_{rms}) по снимку [16].

Рис. 12. Пример снижения информационного и дешифровочного качества аэроснимка из-за глубоких теней и высокого уровня случайного шума

Рис. 13. Пример случайного шума на аэрофотоснимке, заметного при сильном увеличении:
а) на участке водной поверхности; б) в области тени от многоэтажного дома

При благоприятных условиях и корректных параметрах аэросъемки уровень шума для снимков с радиометрическим разрешением 8 бит/пиксель в среднем составляет $N_{rms} = 2,5$ (в числе тонов яркости пикселей). Данный результат является обобщенным для полноформатных топографических камер (DMCII, DMCIII, ADS100), для снимков, полученных среднеформатными топографическими камерами (RCD30, PhaseOne), а также неметрических камер, установленных на легких беспилотных воздушных судах (Sony RX, Canon 5D ProMark), без существенного различия для какой-либо из перечисленных групп камер.

Присутствие случайного шума не должно мешать дешифрированию мелких малоконтрастных деталей на изображении, а также объектов в области теней.

5. Оценка правильности цветопередачи.

Снимки должны отображать подстилающую поверхность в естественных цветах. Ис-

кажения цветов отдельных объектов, отображившихся на снимке (рис. 14), или преобладание какого-либо из цветовых тонов (рис. 15) не допускаются.

Правильность цветопередачи (цветовой баланс) можно оценить вручную путем сравнения цветовых компонент пикселей на участках снимка, которые должны иметь серый цвет (асфальтовое покрытие, серые крыши и пр.). Измерение компонент серых пикселей можно выполнять в любом графическом редакторе (например, Adobe Photoshop и др., имеющих данный функционал).

Цветовые компоненты пикселей серых участков снимка должны быть равны между собой: $R = G = B$. В случае, если это равенство не выполняется, на снимке имеется цветовой перекос в сторону цветовой компоненты, значение которой максимально.

Рис. 14. Пример нарушения правильности цветопередачи – искажение цветов объектов

Рис. 15. Пример нарушения правильности цветопередачи – перекос цвета снимка в область одного тона

При наличии технической возможности правильность цветопередачи (цветовой баланс) можно оценивать автоматически с помощью программного обеспечения, реализующего соответствующие алгоритмы [17–19]. Один из таких алгоритмов применительно к материалам аэрофотосъемки описан в работе [20].

Допустимое значение цветового разбаланса определяется визуальным восприятием изображения, т. е. снимок может иметь перекос в сторону какой-либо из цветовых компонент на такое число тонов, которое не воспринимается при визуальной оценке снимка. Экспериментально было выяснено, что для изображения с радиометрическим разрешением 8 бит/пиксель нарушение цветового баланса становится визуально заметным при преобладании одной из цветовых компонент, начиная от 10 тонов по сравнению с остальными, т. е. для серых пикселей изображения

выполняется одно из условий:

$$\begin{cases} |R - G| \geq 10, \\ |R - B| \geq 10, \\ |B - G| \geq 10. \end{cases} \quad (3)$$

Выполнение любого из условий (3) соответствует величине вектора цветового разбаланса Δ , вычисленной согласно формуле по алгоритму [20], равной 3:

$$|\bar{\Delta}| = \Delta = \sqrt{\Delta R^2 + \Delta G^2 + \Delta B^2} \geq 3, \quad (4)$$

где ΔR , ΔG и ΔB – отклонение от серого красной, зеленой и синей цветовой компоненты соответственно.

На рис. 16 приведен пример снимка с нарушением цветового баланса (рис. 16, а) и с правильной цветопередачей (рис. 16, б), восстановленной по алгоритму [20].

Рис. 16. Оценка правильности цветопередачи и восстановление баланса цветов:

а) аэроснимок с нарушением цветового баланса; б) аэроснимок с правильной цветопередачей, восстановленный по алгоритму [20]; ниже приведены графики цветового баланса по каждой из цветовых компонент – красной (R), зеленой (G) и синей (B) (выделены соответствующим цветом), а также значения цветового разбаланса отдельно по каждой цветовой компоненте ΔR , ΔG и ΔB и величина общего цветового разбаланса по всем каналам Δ для данных снимков

Графики показывают нарушение цветового баланса в интервалах значений пикселей по каждой из цветовых компонент (выделены соответствующим цветом). На рис. 16 также приведены значения цветового разбаланса отдельно по каждой цветовой компоненте ΔR , ΔG и ΔB , а также величина общего цветового разбаланса по всем каналам Δ .

6. Оценка наличия иных артефактов.

Перечисленные выше дефекты материалов аэрофотосъемки, как следствие влияния соответствующих факторов, являются наиболее типичными и прогнозируемыми. Однако на снимках могут присутствовать дефекты случайного характера, обусловленные спецификой применяемого конкретного оборудования (сбои в ра-

боте камеры во время съемки), программного обеспечения постобработки материалов аэрофотосъемки (некорректная работа программ постобработки при выводе изображений) или иными случайными факторами (например, загрязнение стекла аэросъемочного люка или непосредственно объектива камеры брызгами воды, керосина, грязи и пр.). Как следствие, на снимках возникают соответствующие артефакты в виде пятен, полос, локальных областей нерезкости и пр. (рис. 17). Наличие таких дефектов не поддается прогнозированию и автоматическому выявлению, поскольку неизвестно где, когда и каким образом они проявятся. Выявить эти дефекты позволяет лишь визуальная оценка.

Рис. 17. Примеры дефектов аэрофотоснимков, вызванных влиянием случайных факторов:

а) локальные области нерезкости, являющиеся следствием попадания капель воды на объектив камеры; б) артефакты, возникшие вследствие программного сбоя при синтезе единого цветного изображения из отдельных спектральных каналов; в) артефакты, вызванные сбоем программного обеспечения при создании единого аэрофотоснимка из составного кадра

Критерии изобразительного качества материалов аэрофотосъемки, получаемой для целей картографирования, и требования к ним.

Приведенный анализ факторов, влияющих на изобразительные свойства материалов аэрофотосъемки, и возникающих вследствие этого дефектов, позволяет сформулировать набор критериев изобразительного качества снимков. Разработка и обоснование полного набора требований к критериям изобразительного качества материалов аэрофотосъемки, в особенности к их численным показателям, является темой отдельного исследования, выходящего за рамки данной статьи. Поэтому ниже приведены требования лишь к части критериев изобразительного качества, которые позволяет установить данный этап исследования.

Аэрофотоснимки должны обладать высокими показателями изобразительного качества, к которым относятся структурометрические и градационные (фотографические) характеристики [2].

1. *Структурометрические* характеристики определяют возможность воспроизведения мелких деталей на изображении. К ним относятся:

а) фотографическая резкость (четкость) снимка – для снимков, обладающих визуальной высокой резкостью (четкостью), длина пограничного перехода не превышает 5 пикселей, при численной оценке значение нормированного показателя фотографической резкости (четкости) снимка $\bar{g}_{\text{norm } x,y}$ должно составлять не менее 0,5;

б) фактическая разрешающая способность – оценивается с применением автоматизированных алгоритмов.

2. *Градационные (фотографические)* характеристики позволяют оценить воспроизведение яркостных различий объекта съемки. К градационным характеристикам относятся:

а) правильность цветопередачи – нарушение цветового баланса становится визуально заметным в случае преобладания одной из цветовой компонент, начиная от 10 тонов по сравнению с остальными (для снимка с радиометрическим разрешением 8 бит/пиксель), т. е. отклонение любой из цветовой компонент для серого пикселя изображения не должно превышать 10 единиц цветовой тона (см. условие (3)) или величина общего цветового разбаланса Δ [20] не должна превышать 3;

б) показатели уровня случайного шума – присутствие случайного шума не должно мешать дешифрированию мелких малоконтрастных деталей на изображении, а также объектов, находящихся в области теней, где случайный шум имеет наибольшее влияние на изображение;

в) характеристики радиометрического разрешения – диапазон фактического радиометрического разрешения снимка должен максимально охватывать диапазон номинального радиометрического разрешения, однако предпочтительно, чтобы он был слегка меньше номинального значения, так как наличие на изображении пикселей минимального и максимального значения диапазона номинального радиометрического разрешения свидетельствует о присутствии на снимках потерь в тенях и светах соответственно;

г) показатели полноты информации – процент потери информации в светах/тенях.

3. *Дефекты аэрофотоснимков*, вызванные влиянием случайных непрогнозируемых факторов, – на снимках не должно присутствовать артефактов в виде пятен, полос, локальных областей нерезкости и пр., обусловленных некорректной работой применяемого аэросъемочного оборудования, программного обеспечения постобработки материалов аэрофотосъемки или иными случайными факторами.

Заключение

Проблема оценки изобразительного качества материалов аэрофотосъемки, получа-

емых для целей картографирования, в настоящее время приобретает особую актуальность.

К основным факторам, влияющим на изобразительное качество аэрофотоснимков, относятся естественные (природные) условия, технические и технологические параметры аэрофотосъемки и первичной обработки получаемых материалов. Каждый из этих факторов в отдельности и их совокупность определенным образом влияют на изобразительное качество снимков.

Оценку изобразительного качества необходимо проводить в части структурметрических и градационных (фотографических) характеристик.

К структурметрическим характеристикам относятся:

- фотографическая резкость (четкость);
- фактическая разрешающая способность.

К градационным характеристикам относятся:

- правильность цветопередачи;
- показатели уровня случайного шума;
- показатели радиометрического разрешения;
- показатели полноты информации – потеря в светах/тенях.

Кроме перечисленных показателей, на изобразительное качество аэроснимков могут оказывать влияние случайные факторы, появление которых не поддается прогнозированию. Вызванные данными факторами дефекты выявляются при визуальном контроле оператора.

Разработка и обоснование набора требований к числовым показателям изобразительного качества материалов аэрофотосъемки является темой широкого исследования, результаты которого будут опубликованы в отдельной статье.

В заключение следует отметить, что приведенные требования и система критериев изобразительного качества справедливы и могут быть применены не только к материалам аэрофотосъемки, но и к материалам космической съемки, а также к любой картографической продукции, предусматривающей наличие фотореалистичного изображения – ортофотопланы, ортофотокарты, 3D-модели местности, текстурированные фотографическим изображением, и пр.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Srivastava G. S. An Introduction to Geoinformatics. – McGraw-Hill Education, 2014. – 278 p.
2. Кучко А. С. Аэрофотография. Основы и метрология. – М. : Недра, 1974. – 272 с.
3. Аникеева И. А., Кадничанский С. А. Оценка фактической разрешающей способности аэро- и космических фотоснимков по пограничной кривой // Геодезия и картография. – 2017. – Т. 78, № 6. – С. 25–36. doi: 10.22389/0016-7126-2017-924-6-25-36.
4. Аникеева И. А. Обоснование допустимых размеров пикселя на местности и параметров сжатия аэро- и космических изображений, получаемых для целей картографирования // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 109–130. doi: 10.33764/2411-1759-2019-24-2-109-130.
5. Чандра А. М., Гош С. К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. – М. : Техносфера, 2008. – 312 с.
6. Хрящев Д. А. Об одном методе определения наиболее подходящей для анализируемого цифрового изображения модели аддитивного шума // Изв. Волгоградского государственного технического университета. – 2011. – № 3 (76). – С. 24–31.
7. Лапшенков Е. М. Незаталонная оценка уровня шума цифрового изображения на основе гармонического анализа // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, № 3. – С. 439–447.
8. Зотов П. В. Цифровой шум изображения и его прикладное значение в криминалистике // Вестник Саратовской государственной юридической академии. – 2015. – № 6. – С. 175–179.
9. Лапшенков Е. М. Реализация методов оценки уровня шума изображения в среде Matlab // Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики. Серия: приборостроение и информационные технологии. – 2013. – № 44. – С. 96–106.
10. Комар В. Г. Количественные критерии качества изображения для оценки кинематографических систем // Техника кино и телевидения. – 2000. – № 10.
11. Ghazal M., Amer A., Ghrayeb A. Structure-Oriented Spatio-Temporal Video Noise Estimation // Proc. IEEE Int. Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP). – Toulouse, France, 2006 – P. 845–848.
12. Сурин В. А., Тырсин А. Н. Исследование свойств цифрового шума в контрастных изображениях // Изв. вузов. Физика. – 2016. – Т. 59, № 8-2. – С. 93–96.
13. Самойлин Е. А. Алгоритмы оценивания импульсного шума в задачах цифровой фильтрации оптических изображений // Оптический журнал. – 2006. – Т. 73, № 12. – С. 42–46.
14. Miao C. Research on denoising processing of computer video electromagnetic leakage reduction image based on fuzzy degree // EURASIP Journal on Image and Video Processing. – 2019. – Vol. 2019. – Article number 9. doi: 10.1186/s13640-018-0405-4 <https://doi.org/10.1186/s13640-018-0405-4>.
15. Chen M., Zhang H., Han Q., Huang C. C. A convex nonlocal total variation regularization algorithm for multiplicative noise removal // EURASIP Journal on Image and Video Processing. – 2019. – Vol. 2019. – Article number 28. doi: 10.1186/s13640-019-0410-2 <https://doi.org/10.1186/s13640-019-0410-2>.
16. Аникеева И. А. Оценка уровня сигнал/шум аэро- и космических изображений [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://www.roscartography.ru/wp-content/uploads/2019/11/rakurs-2019-anikeeva.pdf>.
17. Ancuti C. O., Ancuti C., De Vleeschouwer C., Bekaert P. Color Balance and Fusion for Underwater Image Enhancement // IEEE Transactions on Image Processing. – 2018. – Vol. 27, No. 1. – P. 379–393. doi: 10.1109/TIP.2017.2759252.
18. Hussain M. A., Akbari A. S. Color Constancy Adjustment Using Sub-Blocks of the Image // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 46617–46629. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2866792.
19. Ancuti C. O., Ancuti C., De Vleeschouwer C., Sbert M. Color Channel Compensation (3C): A Fundamental Pre-Processing Step for Image Enhancement // IEEE Transactions on Image Processing. – 2020. – Vol. 29. – P. 2653–2665. doi: 10.1109/TIP.2019.2951304.
20. Аникеева И. А. Метод и алгоритм автоматической оценки качества цветопередачи цифровых аэро- и космических фотоснимков // Геодезия и картография. – 2018. – Т. 79, № 7. – С. 45–56. doi: 10.22389/0016-7126-2018-937-7-45-56.

Получено 28.07.2020

© И. А. Аникеева, 2020

FACTORS, CRITERIA AND REQUIREMENTS FOR FINE QUALITY OF AERIAL IMAGERY, OBTAINED FOR MAPPING PURPOSES

Irina A. Anikeeva

JSC «Roskartography», 45-1, Volgogradskiy Prospect, Moscow, 109316, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (499)177-50-00, e-mail: ia.anikeeva@roscartography.ru

Fine image quality assessment of aerial imagery, obtained for mapping purposes, is a relevant problem today. The purpose of this article is development the criteria system of fine image quality assessment of aerial topographic imagery and set requirements to them. The article discusses a set of factors that determine the fine image quality - natural surveying conditions, its technical and technological conditions and parameters. The article carries out the analysis of how these factors influence on aerial imagery and shows the main defects of images caused by them – such as blurring, haze, loss of information in highlights and shadows, high random noise, color disbalance. The article defines the ways for identifying these defects and assessing their influence on the fine quality of aerial imagery both visual and automatic methods. It is shown that image fine quality assessment must be carried out in terms of structural and gradation (photographic) characteristics. It is also shown that, in addition to the above characteristics, fine quality of aerial images can be influenced by random factors, the appearance of which cannot be predicted. Defects caused by these factors are revealed by operator's visual inspection. The requirements for several fine image quality criteria, which allow to establish this research phase, are given.

Keywords: aerial imagery, fine image quality, blurring, haze, loss of information in highlights and shadows, random noise, color balance, histogram, structural characteristics, gradation (photographic) characteristics

REFERENCES

1. Srivastava, G. S. (2014). *An Introduction to Geoinformatics*. McGraw-Hill Education, 278 p.
2. Kuchko, A. S. (1974). *Aerofotografiya. Osnovy i metrologiya [Aerial photography. Fundamentals and Metrology]*. Moscow: Nedra Publ., 272 p. [in Russian].
3. Anikeeva, I. A., & Kadnichanskiy, S. A. (2017). Evaluation of the actual resolution of digital aerial and satellite imagery using an edge profile curve. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 78(6), 25–36. doi: 10.22389/0016-7126-2017-924-6-25-36.
4. Anikeeva, I. A. (2019). The substantiation of ground sampling interval and compression options of aerial and space imagery, obtained for mapping purposes. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 109–130. doi: 10.33764/2411-1759-2019-24-2-109-130.
5. Chandra, A. M., & Gosh, S. K. (2008). *Distantsionnoe zondirovanie i geograficheskie informatsionnye sistemy [Remote sensing and geographic information systems]*. Moscow: Technosphere Publ., 312 p. [in Russian].
6. Khryashchev, D. A. (2011). About one method for determining the additive noise model most suitable for the analyzed digital image. *Izvestiya volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Volgograd State Technical University]*, 3(76), 24–31 [in Russian].
7. Lapshenkov, E. M. (2012). Non-reference assessment of digital image noise based on harmonic analysis. *Komp'yuternaya optika [Computer Optics]*, 36(3), 439–447 [in Russian].
8. Zotov, P. V. (2015). Digital image noise and its applied value in forensic science. *Vestnik Saratovskoy gosudarstvennoy yuridicheskoy akademii [Bulletin of the Saratov State Law Academy]*, 6(107), 175–179 [in Russian].
9. Lapshenkov, E. M. (2013). Implementation of methods for estimating the image noise in matlab. *Vestnik moskovskogo gosudarstvennogo universiteta priborostroeniya i informatiki. Seriya: priborostroenie i informatsionnye tekhnologii [Bulletin of the Moscow State University of Instrumentation and Informatics. Instrumentation and Information Technology]*, 44, 96–106 [in Russian].
10. Komar, V. G. (2000). Image quality quantitative criteria for cinematic systems assessment. *Tekhnika kino i televideniya [Film and Television Technology]*, 10 [in Russian].
11. Ghazal, M., Amer, A., & Ghayeb, A. (2006). Structure-Oriented Spatio-Temporal Video Noise Estimation. *Proc. IEEE Int. Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 845–848). Toulouse, France.

12. Surin, V. A., & Tyrsin, A. N. (2016). Property research of digital noise in contrast images. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika [Bulletin of Higher Educational Institutions. Physics]*, 59(8-2), 93–96 [in Russian].
13. Samoilin, E. A. (2006). Algorithms for impulse noise assessment in tasks of optical images digital filtering. *Opticheskiy zhurnal [Optical Magazine]*, 73(12), 42–46 [in Russian].
14. Miao, C. (2019). Research on denoising processing of computer video electromagnetic leakage reduction image based on fuzzy degree. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2019, Article number 9. doi: 10.1186/s13640-018-0405-4 <https://doi.org/10.1186/s13640-018-0405-4>.
15. Chen M., Zhang, H., Han, Q., & Huang, C. C. (2019). A convex nonlocal total variation regularization algorithm for multiplicative noise removal. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2019, Article number: 28. doi: 10.1186/s13640-019-0410-2 <https://doi.org/10.1186/s13640-019-0410-2>.
16. Anikeeva, I. A. (2019). Estimation of the signal / noise level of aerial and space images. Retrieved from <https://www.roscartography.ru/wp-content/uploads/2019/11/rakurs-2019-anikeeva.pdf> [in Russian].
17. Ancuti, C. O., Ancuti, C., De Vleeschouwer, C., & Bekaert, P. (2018). Color Balance and Fusion for Underwater Image Enhancement. *IEEE Transactions on Image Processing*, 27(1), 379–393. doi: 10.1109/TIP.2017.2759252.
18. Hussain, M. A., & Akbari, A. S. (2018). Color Constancy Adjustment Using Sub-Blocks of the Image. *IEEE Access*, 6, 46617–46629. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2866792.
19. Ancuti, C. O., Ancuti, C., De Vleeschouwer, C., & Sbert, M. (2020). Color Channel Compensation (3C): A Fundamental Pre-Processing Step for Image Enhancement. *IEEE Transactions on Image Processing*, 29, 2653–2665. doi: 10.1109/TIP.2019.2951304.
20. Anikeeva, I. A. (2018). Method and algorithm of automatic color rendition quality assessment of digital aerial and space photos. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 79(7), 45–56. doi: 10.22389/0016-7126-2018-937-7-45-56 [in Russian].

Received 28.07.2020

© I. A. Anikeeva, 2020

УДК 528.92:332.1

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-120-129

ГЕОИНФОРМАЦИОННО-КОГНИТИВНАЯ РЕПРЕЗЕНТАЦИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

Александр Петрович Карник

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор, ректор, тел. (383)343-39-37, e-mail: rector@ssga.ru

Дмитрий Витальевич Лисицкий

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института стратегического развития, тел. (383)344-35-62, e-mail: dliis@ssga.ru

Алексей Григорьевич Осипов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор исторических наук, профессор, зам. директора Научно-исследовательского института стратегического развития, тел. (383)344-35-62, e-mail: a.g.osipov@ssga.ru

Вячеслав Николаевич Савиных

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, кандидат экономических наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления, тел. (913)767-30-30, e-mail: savinslav@inbox.ru

Актуальность исследования заключается в рассмотрении нового содержания и особенностей единой геопрограммной поддержки экономики и жизнедеятельности общества в условиях цифровой трансформации. Целью работы является представление сущности, принципиальных моментов, новых взглядов и подходов к геопрограммной деятельности. Используются методы формально-логического анализа, линейного программирования, теории матричных игр с природой. Предложена формальная трактовка оценки и использования территориальных ресурсов как объектов единой геопрограммной деятельности. С позиций структурно-функционального подхода рассмотрены сущностные характеристики обеспечения жизнедеятельности общества геоинформацией и геознаниями. Приведен формально-логический анализ представлений о жизнедеятельности в окружающем геопрограммном пространстве с целью оптимизации использования его ресурсов на основе всеохватывающей геопрограммной перспективы. Введено понятие «геофрагмент» как элементарной единицы геопрограммного пространства, в которой происходят отраслевые и/или природные процессы и осуществляется взаимодействие объектов разных отраслевых пространств. Обоснована роль геопрограммных знаний и предложен комплексный подход к процессам подготовки пространственных решений для управления территорией на основе сочетания геоинформационного и геокогнитивного пространств. Геопрограммная деятельность в территориальном дискурсе становится самостоятельным фактором управления территориями для обеспечения жизнедеятельности общества, основанным на оптимизации распределения (перераспределения) территориальных ресурсов путем комплексного взаимодействия отраслей и кластеров. Эта деятельность обеспечивает геоинформацией и геознаниями разноплановые процессы взаимодействия отраслевых пространств и природы в рамках общего физического геопрограммного пространства.

Ключевые слова: геоинформация, геоинформационное пространство, геокогнитивное пространство, геофрагмент, геопрограммная деятельность, геопрограммная индустрия

Введение

Как уже отмечалось в современной технической литературе, геодезическое и картогра-

фическое производство находится на этапе преобразования в новую геопрограммную индустрию [1–4]. Характерной особенностью этого вида деятельности является

определение в качестве ее базовой продукции двух виртуальных пространств, сформированных над заданной территорией: геоинформационного пространства и геокогнитивного пространства [4].

До настоящего времени основной конечной продукцией геодезической и картографической деятельности были картографические (аналоговые и цифровые) и/или геоинформационные модели местности. Они воспроизводили пространственный образ, аналог моделируемого объекта местности и отображали пространственные свойства объектов, процессов и явлений местности, но с учетом их назначения и дальнейшего использования. Такой подход максимально удовлетворял потребности отраслевых пользователей в геоинформации при рациональных затратах на процессы картографирования, однако не обеспечивал единства информационной среды.

По мере пространственного и социального развития территорий, урбанизации, усложнения отраслевых производств эта ситуация уже не отвечала возросшим потребностям управления территориями. По этим же причинам дополнительно проявляется общая тенденция технологического развития экономики и общества по переходу к эпохе знаний. Поэтому в сфере геодезии и картографии появляется новый процесс получения и представления пространственных знаний о местности, параллельный процессу получения и представления геоинформации, и, соответственно, новая продукция в виде геопространственных знаний (геознаний) о территории.

Учитывая важность и перспективность этого направления, уже ведется разработка инфраструктуры геопространственных знаний [5, 6], а в блоге компании East View Geospatial [7] приводятся многочисленные примеры того, как современная платформа геопространственных знаний способствует решению различного рода задач и улучшению социально-экономических условий общества.

Статистический отдел Организации Объединенных Наций (СОООН) и компания «Geospatial Media and Communications» в октябре 2019 г. договорились разработать совместный подход к повышению роли инфраструктуры геопространственных знаний в гло-

бальном обществе и экономике. С целью укрепления инфраструктуры геопространственных знаний в условиях трансформации экономики цифрового века компания «Geospatial Media and Communications» планировала провести в апреле 2020 г. эксклюзивный семинар на Форуме «Geospatial World» на тему «Повышение роли инфраструктуры геопространственных знаний в мировой экономике и обществе» [8, 9]. Однако из-за вспышки коронавируса (COVID-19) учебная программа перенесена на октябрь 2020 г. в Хайдарабаде, Индия, в рамках конференции GeoSmart India 2020.

Эти и целый ряд других публикаций и мероприятий свидетельствуют о существенном расширении сферы и значимости геодезической и картографической деятельности, и, следовательно, появлении принципиально новых теоретических, методологических и технологических задач.

Материалы и методы

Целью настоящего исследования является выявление, обоснование и определение сущности, основных особенностей и принципиальных моментов, новой концепции геопространственной деятельности в части создания и использования геоинформационного пространства и геокогнитивного пространства.

Для обеспечения непротиворечивости и достоверности выполненных логических суждений, обоснованности выводов и корректности полученных результатов нами использован формально-логический инструментарий и методы математического моделирования.

По этом учитывалось, что степень проработанности указанных вопросов существенно различается – проблемы и методология создания геоинформационного пространства в технической литературе рассмотрены гораздо глубже, чем тематика пространственных знаний.

Результаты

Рассмотрим сущность и особенности геопространственного обеспечения жизнедеятельности с точки зрения структурно-функционального подхода.

Каждую сферу (отрасль) жизнедеятельности (и природную среду) можно формально представить как некоторое j -е пространство, где $j = 1, \dots, M$, которое включает множество O_j отраслевых (природных) объектов $o_{jr} \in O_j$, $r = 1, \dots, V_j$, требующих определенного набора различных ресурсов, необходимых для осуществления своей отраслевой (природной) деятельности.

Каждый такой объект o_{jr} , кроме набора семантических ресурсов $\bar{s}_{jr}$, также нуждается в наборе геопространственных ресурсов $\bar{g}_{jr}$, в виде его местоположения, формы и размера, позволяющих рассматривать его еще как структурный элемент окружающего геопространства. Это же относится к природе, отдельные компоненты которой также могут рассматриваться как геопространственные ресурсы. Следовательно, между каждым r -м объектом j -го пространства o_{jr} и набором семантических и геопространственных ресурсов справедливо взаимно-однозначное соответствие

$$o_{jr} \leftrightarrow (\bar{s}_{jr}, \bar{g}_{jr}), j = 1, \dots, M, r = 1, \dots, V_j. \quad (1)$$

Объекту o_{jr} можно поставить в соответствие отражающее его сущность характеристическое свойство $z_{jr} \in Z_j$, $j = 1, \dots, M$, где Z_j – множество значений характеристических свойств объекта с позиции j -й отрасли (природы). При этом набор геопространственных ресурсов $\bar{g}_{jr}$ описывается в форме значений 4-мерной системы координат (три координаты x, y, h и время t).

С учетом вышесказанного выражение (1) примет следующий вид:

$$z_{jr} \leftrightarrow \left\langle \bar{s}_{jr}, \left\{ \left(x_{jr}^n(t), y_{jr}^n(t), h_{jr}^n(t) \right), \right. \right. \left. \left. n = 1, \dots, n_{jr} \right\} \right\rangle, \quad (2)$$

где $x_{jr}^n(t) \in X$, $y_{jr}^n(t) \in Y$, $h_{jr}^n(t) \in H$, $t \in T$, n_{jr} – число точек, описывающих геопространственные ресурсы, необходимые для

объекта o_{jr} .

Каждый отраслевой объект o_{jr} функционирует (или планируется для функционирования) в пределах определенного фрагмента геопространства gf_k , $k = 1, \dots, K$, который мы будем в дальнейшем называть геофрагментом. В рамках каждого отраслевого пространства (природы) осуществляются отраслевые (природные) процессы, при которых происходит взаимодействие объектов данного пространства O_j внутри k -го геофрагмента gf_k . Обозначим множество объектов j -го пространства, прикрепленных к геофрагменту gf_k как подмножество $O_{jk} \subset O_j$.

Для этого подмножества O_{jk} нужно установить эффективность суммарного использования j -й отрасли (природой) p -го ресурса k -го геофрагмента $E_p(O_{jk})$, $p = 1, \dots, N$. При этом необходимо осуществить суммирование соответствующей детальной информации и знаний о ресурсах, необходимых для функционирования отраслевых (природных) объектов o_{jr} , входящих в подмножество O_{jk} .

В итоге нужно получить следующие результаты (3):

$$E_p(O_{jk}) = E_{jp}^k, j = 1, \dots, M, p = 1, \dots, N, \quad (3)$$

где E_{jp}^k – количественная оценка эффективности использования j -й отраслью p -го ресурса k -го геофрагмента, которая может принимать отрицательное значение или равняться нулю. Полученные оценки представлены в табл. 1.

Проблему оптимально согласованного многоотраслевого использования ресурсов данного геофрагмента можно анализировать с помощью предлагаемой нами модели, основанной на принципах стратегической матричной игры с природой [10].

Для построения модели рассмотрим «платежную» матрицу игры с природой k -го геофрагмента (табл. 2), составленную на основе табл. 1.

Таблица 1

Оценки эффективности использования j -й отраслью p -го ресурса k -го геофрагмента

Отрасли жизнедеятельности и компоненты природной среды	Виды ресурсов k -го геофрагмента					Суммарная эффективность по отраслям
	социальный	экономический	экологический	...	устойчивого развития	
Сельское хозяйство	E_{11}	E_{12}	E_{13}	...	E_{1N}	$\sum_{p=1}^N E_{1p}$
Промышленность	E_{21}	E_{22}	E_{23}	...	E_{2N}	$\sum_{p=1}^N E_{2p}$
Транспорт	E_{31}	E_{32}	E_{33}	...	E_{3N}	$\sum_{p=1}^N E_{3p}$
Строительство	E_{41}	E_{42}	E_{43}	...	E_{4N}	$\sum_{p=1}^N E_{4p}$
...	...	...	...	...	...	...
Растительность	E_{m1}	E_{m2}	E_{m3}	...	E_{mN}	$\sum_{p=1}^N E_{mp}$
Почвы	$E_{m+1,1}$	$E_{m+1,2}$	$E_{m+1,3}$	...	$E_{m+1,N}$	$\sum_{p=1}^N E_{m+1,p}$
...	...	...	...	...	...	...
Гидрография	E_{M1}	E_{M2}	E_{M3}	...	E_{MN}	$\sum_{p=1}^N E_{Mp}$
Суммарная эффективность по ресурсам	$\sum_{j=1}^M E_{j1}$	$\sum_{j=1}^M E_{j2}$	$\sum_{j=1}^M E_{j3}$	...	$\sum_{j=1}^M E_{jN}$	$\sum_{p=1}^N \sum_{j=1}^M E_{jp}$

Таблица 2

Матрица оценок многоотраслевого использования ресурсов k -го фрагмента геопространства

	R_1	R_2	...	R_p	...	R_N
D_1	E_{11}	E_{12}	...	E_{1p}	E_{11}	E_{12}
D_2	E_{21}	E_{22}	...	E_{2p}	E_{21}	E_{22}
...	...	...	...	...	...	...
D_j	E_{j1}	E_{j2}	...	E_{jp}	E_{j1}	E_{j2}
...	...	...	...	...	...	...
D_M	E_{M1}	E_{M2}	...	E_{M3}	E_{M1}	E_{M2}

Обозначения табл. 2 имеют следующий смысл:

R_p – соответствует состоянию природы, позволяющему отраслям (природным процес-

сам) полностью (на 100 %) использовать p -й ресурс геофрагмента;

D_j – соответствует решению лица, принимающего решения (ЛПР), использовать (на 100 %) весь потенциал ресурсов геофрагмента только отраслью (природным процессом) под номером j ;

E_{jp} – выражает ожидаемую эффективность (положительную или отрицательную), который получит ЛПР, если будет использовать (на 100 %) p -й ресурс геофрагмента исключительно отраслью (природным процессом) под номером j .

При многоотраслевом подходе нужно установить оптимальное распределение сто-процентного использования ресурсов выбранного геофрагмента между всеми отраслями (природными процессами), претендующими на этот геофрагмент, вместо того,

чтобы заведомо полагаться на какую-то одну отрасль (природный процесс). Это не исключает, что единственная отрасль (природный процесс) может оказаться оптимальным вариантом использования ресурсов данного геофрагмента.

Разную интенсивность использования отраслями (природными процессами) ресурсов данного геофрагмента может отражать смешанная стратегия формирования многоотраслевого комплекса потребления этих ресурсов [11], которая описывается вектором

$$\begin{aligned}\bar{D} &= (d_1, d_2, \dots, d_j, \dots, d_M); \\ \sum_{j=1}^M d_j &= 1; d_j \geq 0; j = \overline{1, M}. \quad (4)\end{aligned}$$

Вектору $\bar{D}$ нужно поставить в соответствие вектор процентов

$$\bar{D}^{\%} = (d_1^{\%}, d_2^{\%}, \dots, d_j^{\%}, \dots, d_M^{\%}), \quad (5)$$

где $d_j^{\%} = d_j \times 100\%$ – процент использования j -й отрасли (природным процессом) ресурсов анализируемого геофрагмента.

Оптимальный комплект отраслевых объектов, подбираемый для функционирования в данном фрагменте геопространства, должен являться многоотраслевым образованием, каждая отраслевая составляющая которого ориентируется на соответствующую компоненту вектора процентов (5), полученного на основе оптимальной смешанной стратегии матричной игры с природой

$$\bar{D}^* = (d_1^*, d_2^*, \dots, d_j^*, \dots, d_M^*). \quad (6)$$

В свою очередь, оптимальная стратегия (6) вычисляется как решение следующей задачи линейного программирования [12].

Ограничения задачи:

$$E_{11}d_1 + E_{21}d_2 + \dots + E_{j1}d_j + \dots + E_{M1}d_M \geq E; \quad (7)$$

$$E_{1p}d_1 + E_{2p}d_2 + \dots + E_{jp}d_j + \dots + E_{Mp}d_M \geq E; \quad (8)$$

$$E_{1N}d_1 + E_{2N}d_2 + \dots + E_{jN}d_j + \dots + E_{MN}d_M \geq E; \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^M d_j = 1, d_j \geq 0, j = \overline{1, M}. \quad (10)$$

Целевая функция задачи:

$$W = E \rightarrow \max. \quad (11)$$

Смысловое содержание решения задачи (7)–(11) заключается в определении оптимального распределения процентной нагрузки на ресурсы геофрагмента между отраслями (природными процессами), обеспечивающее получение от проектируемого в данном геофрагменте многоотраслевого размещения максимальной в среднем эффективности $W_{\max} = E^*$.

Для каждого геофрагмента gf_k согласно его набору ресурсов $\bar{R}_k$ с учетом геоинформации gi_k и матрицы эффективностей (см. табл. 2) по модели (7)–(11) может быть вычислено оптимальное управляющее решение вида (6) о долевом (процентном) участии отраслей и природных процессов в потреблении всех его ресурсов

$$\begin{aligned}\bar{D}_k^* &= (d_{k1}^*, d_{k2}^*, \dots, d_{kj}^*, \dots, d_{kM}^*); \\ \sum_{j=1}^M d_{kj}^* &= 1, k = \overline{1, K}. \quad (12)\end{aligned}$$

Компонента вектора (12) d_{kj}^* выражает рекомендуемую управляющему органу территории долю использования j -й отрасли ресурсов k -го геофрагмента, в том числе и, в первую очередь, территориального ресурса. Тем отраслям (природным процессам), у которых эта доля близка к нулю, должно быть отказано в территориальном доступе к ресурсам этого геофрагмента.

Решение задачи (7)–(11) для каждого фрагмента геопространства можно рассматривать как один из источников получения цифровым путем геознаний для формирования единого геокогнитивного пространства.

Обсуждение

На рис. 1 дана иллюстрация оптимизации межотраслевого потребления ресурсов в пределах геофрагментов. Показано на примере, что на основании оптимальных управляющих решений (12) до ресурсов геофрагмента gf_1

допущены отрасли O_1 и O_2 с долями их потребления, например, $d_{11}^* = 0,6$ и $d_{12}^* = 0,4$, а доли других отраслей и природных процессов равняются нулю. До ресурсов геофраг-

мента gf_2 допущены отрасли O_2 , O_3 и O_4 с долями их использования, например, $d_{22}^* = 0,5$, $d_{23}^* = 0,2$ и $d_{24}^* = 0,3$, при долях других отраслей, равных нулю, и т. д.

Рис. 1. Схема оптимизации долевой привязки межотраслевого потребления ресурсов в пределах геофрагментов

Ресурсы каждого из геофрагментов территории могут быть представлены для каждой отрасли единым набором пространственных данных (геоданных): координатно привязанной информации (геоинформации) и координатно привязанных знаний (геознаний). В совокупности эти наборы образуют, соответственно, отраслевое геоинформационное пространство (ОГИП) и отраслевое геокогнитивное пространство (ОГКП).

В результате обработки геоданных на основе отраслевых профессиональных знаний

формируется геоинформация, образующая ОГИП и используемая как для формирования или уточнения отраслевых профессиональных геознаний, так и для формирования геознаний о ресурсе территории. Геознания в свою очередь образуют ОГКП и используются для профессиональной обработки геоданных.

Схема взаимосвязей компонентов инфраструктуры пространственных данных и инфраструктуры пространственных знаний приведена на рис. 2.

Рис. 2. Схема взаимосвязей компонентов инфраструктуры пространственных данных и инфраструктуры пространственных знаний

Нужно принять во внимание интегрированные (системные) последствия свободного функционирования на территориях одних и тех же геофрагментов множества различных отраслей и природных процессов. При этом каждая отрасль, преследуя своекорыстные цели, может формировать в пределах доступного ей геофрагмента свои варианты ОГИП и ОГКП.

Государственная политика должна находить оптимальные пересечения указанных пространств и образовывать единые пространства, соответственно, единое геоинформационное

пространство (ЕГИП) и единое геокогнитивное пространство (ЕГКП), создание и использование которых и составляют основу эффективной геопространственной деятельности.

Заключение

Процесс геоинформационного и геокогнитивного обеспечения подготовки пространственных решений для управления территорией может быть изображен схемой (рис. 3).

Рис. 3. Схема геоинформационного и геокогнитивного обеспечения подготовки пространственных решений для управления территорией

Геоинформационное и геокогнитивное обеспечение территорий в рамках единой геопространственной деятельности в качестве одной из задач имеет оценку ресурсного потенциала локализованных участков и объектов территории, помощь в анализе их возможностей в рамках разных отраслей, информационную поддержку организации про-

странственного взаимодействия, определение взаимовлияния объектов и процессов одних отраслей на объекты и процессы других отраслей.

На основе оценки использования ресурсов территории по отдельным геофрагментам можно оценить потенциал территории в целом с позиций каждой отрасли и таким обра-

зом, на основе четырехмерной системы координат, обеспечить оптимальное межотраслевое взаимодействие с объектами окружающего мира в пределах данной территории. Далее можно перейти к оценке ресурсов всей территории в комплексе и к управлению ее использованием.

Рассмотренные аспекты единой геопространственной деятельности в территориальном дискурсе представляют ее как актуальный фактор управления территориями и обеспечения жизнедеятельности общества, основанный на оптимизации распределения (перераспределения) территориальных ресурсов на уровне комплексного взаимодействия отраслей и кластеров.

В этом контексте единая геопространственная деятельность заключается в обеспечении разноплановых процессов межотраслевого характера, системного взаимодействия отраслевых пространств и природы в рамках общего геопространства. Через комбинацию новых идей, потенциальных возможностей и структурных преобразований она задает вектор формирования современной геопространственной индустрии, организует направленность ее на оптимизацию использования территориальных ресурсов, способствует системному обеспечению потребностей общества. В конечном итоге практическое использование геоинформационных и геокогнитивных пространств, построенных в соответствии с предложенной парадигмой [3, 4], обеспечит переход единой геопространственной деятельности на уровень актуальной производи-

тельной силы, что и отражает главную особенность и цель цифровой экономики.

Рекомендации

Выполненная формализация процессов использования территориальных ресурсов в деятельности отраслей экономики, предложенный геопространственный подход к их представлению создают основу для дальнейших исследований и разработок методов и технологий оценки и приоритетного использования отдельных территорий для достижения целей их социально-экономического и пространственного развития.

Перспективными направлениями таких исследований и разработок, на наш взгляд, являются изучение сущности, содержания и разработка инфраструктуры геознаний, разработка решений по рациональному использованию территорий путем разрешения конфликта интереса отраслей, разработка структуры, содержания и функционала единых геоинформационного и геокогнитивного пространств, обоснование нового этапа развития геодезии и картографии – геопространственного картографирования.

Выполненные исследования, полученные результаты и выводы могут быть полезны для ученых и специалистов, работающих в области геопространственной деятельности, а также для специалистов территориальных управленческих структур. Кроме того, статья может быть использована в учебных целях для докторантов, аспирантов и магистрантов, обучающихся по тематике наук о Земле.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. The Pennsylvania State University. College of Earth and Mineral Sciences [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.e-education.psu.edu/natureofgeoinfo/c1_p13.html.
2. Карпик А. П., Лисицкий Д. В. Перспективные направления развития геодезической отрасли в условиях постиндустриальной эпохи и цифровой экономики // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80, № 4. – С. 55–64. doi: 10.22389/0016-7126-2019-946-4-55-64.
3. Karpik A., Lisitsky D., Osipov A., Savinykh V. N. New paradigm of geoinformation space in territorial aspect [Electronic resource] // Caderno Suplementar. – 2020. – No. 1. – 13 p. Turismo: estudos & praticas. Rio Grande do Norte : Univ. do Estado do Rio Grande do Norte. – Mode of access: <http://natal.uern.br/periodicos/index.php/RTEP/article/view/544>. – Title from screen.
4. Карпик А. П., Лисицкий Д. В. Перспективы развития геодезического и картографического производства и новая парадигма геопространственной деятельности // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 19–29.

5. Towards a Spatial Knowledge Infrastructure White Paper Released [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.gsdiassociation.org/index.php/news/global-news/795-towards-a-spatial-knowledge-infrastructure-white-paper-released.html/>.
6. Written by Jon Fairall. From spatial information to Spatial Knowledge Infrastructure. By Anthony Wallace on 21 June, 2017 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.spatialsource.com.au/gis-data/spatial-information-spatial-knowledge>.
7. Blog – East View Geospatial [Electronic resource]. – Mode of access: <https://geospatial.com/blog/>.
8. Advancing role of geospatial knowledge infrastructure in world economy and society [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.geospatialworld.net/blogs/advancing-role-of-geospatial-knowledge-infrastructure-in-world-economy-and-society>.
9. Training program: advancing role of geospatial knowledge infrastructure in world economy, society and environment [Electronic resource]. – Mode of access: <https://geospatialworldforum.org/advancing-role-of-geospatial-knowledge-in-world-economy.asp>.
10. Colman A. M. Game theory and experimental games: The study of strategic interaction. – Elsevier, 2016. – 314 p.
11. Dixit A. K., Skeath S. Games of Strategy: Fourth International Student Edition. – WW Norton & Company, 2015. – 712 p.
12. Савиных В. Н. Математическое моделирование производственного и финансового менеджмента. – М. : Кнорус, 2020. – 192 с.

Получено 01.09.2020

© А. П. Карпик, Д. В. Лисицкий, А. Г. Осипов, В. Н. Савиных, 2020

GEOINFORMATIONAL-COGNITIVE REPRESENTATION OF TERRITORIAL RESOURCES

Alexander P. Karpik

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Rector, phone: (383)343-39-37, e-mail: rector@snga.ru

Dmitry V. Lisitsky

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Director of Scientific Research Institute of Strategic Development, phone: (383)344-35-62, e-mail: dlis@snga.ru

Aleksey G. Osipov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Deputy Director, Scientific Research Institute of Strategic Development, phone: (383)344-35-62, e-mail: a.g.osipov@snga.ru

Vyacheslav N. Savinykh

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Automated Control Systems, phone: (913)767-30-30, e-mail: savinslav@inbox.ru

The relevance of the study lies in considering the new content and features of a unified geospatial support for the economy and the life of society in the context of digital transformation. The aim of the work is to present the essence, fundamental points, new views and approaches to geospatial activities. Methods of formal logical analysis, linear programming, theory of matrix games with nature are used. A formal interpretation of the assessment and use of territorial resources as objects of a single geospatial activity is proposed. From the standpoint of the structural-functional approach, the essential characteristics of ensuring the life of society with geo-information and geosciences are considered. A formal-logical analysis of ideas about life in the surrounding geospace is given in order to optimize the use of its resources on the basis of an all-encompassing geospatial perspective. The concept of "geofragment" is introduced as an elementary unit of geospace, in which sectoral and / or natural processes take place and objects of different sectoral spaces interact. The role of geospatial

knowledge is substantiated and an integrated approach to the processes of preparing spatial solutions for territory management based on a combination of geoinformation and geocognitive spaces is proposed. Geospatial activity in the territorial discourse is becoming an independent factor in the management of territories to ensure the life of society, based on the optimization of the distribution (redistribution) of territorial resources through the complex interaction of industries and clusters. This activity provides geodata, geo-information and geosciences for the diverse processes of interaction between industrial spaces and nature within the framework of a common physical geospace.

Keywords: geodata, geoinformation, geoscience, geoinformation space, geocognitive space, geofragment, geospatial activity, geospatial industry

REFERENCES

1. The Pennsylvania State University. College of Earth and Mineral Sciences. (n. d.). Retrieved from https://www.e-education.psu.edu/natureofgeoinfo/c1_p13.html.
2. Karpik, A. P., & Lisitsky, D. V. (2019). Surveying industry: prospective development directions in the post-industrial era and the digital economy. *Geodezija i kartografija [Geodesy and Cartography]*, 80(4), 55–64. doi: 10.22389/0016-716-2019-946-4-55-64 [in Russian].
3. Karpik, A. P., Lisitsky, D. V., Osipov, A. G., & Savinykh, V. N. (2020). New paradigm of geoinformation space in territorial aspect. *Caderno Suplementar*, 1, 13 p. Turismo: estudos & praticas. Rio Grande do Norte: Univ. do Estado do Rio Grande do Norte. Retrieved from <http://natal.uern.br/periodicos/index.php/RTEP/article/view/544>.
4. Karpik, A. P., & Lisitsky, D. V. (2020). Prospects for the development of geodesic and cartographic production and the new paradigm of geospatial activity. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(2), 19–29 [in Russian].
5. Towards a Spatial Knowledge Infrastructure White Paper Released. (n. d.). Retrieved from <http://www.gsdiassociation.org/index.php/news/global-news/795-towards-a-spatial-knowledge-infrastructure-white-paper-released.html/>.
6. Wallace A. (21 June, 2017). From spatial information to Spatial Knowledge Infrastructure. Written by Jon Fairall. Retrieved from <https://www.spatialsource.com.au/gis-data/spatial-information-spatial-knowledge>.
7. Blog – East View Geospatial. (n. d.). Retrieved from <https://geospatial.com/blog/>.
8. Advancing role of geospatial knowledge infrastructure in world economy and society (n. d.). Retrieved from <https://www.geospatialworld.net/blogs/advancing-role-of-geospatial-knowledge-infrastructure-in-world-economy-and-society>.
9. Training program: advancing role of geospatial knowledge infrastructure in world economy, society and environment. (n. d.). Retrieved from <https://geospatialworldforum.org/advancing-role-of-geospatial-knowledge-in-world-economy.asp>.
10. Colman, A. M. (2016). *Game theory and experimental games: The study of strategic interaction*. Elsevier, 314 p.
11. Dixit, A. K., & Skeath, S. (2015). *Games of Strategy: Fourth International Student Edition*. WW Norton & Company, 712 p.
12. Savinykh, V. N. (2020). *Matematicheskoe modelirovanie proizvodstvennogo i finansovogo menedzhmenta [Mathematical modeling of production and financial management]*. Moscow: "Knorus" Publ., 192 p. [in Russian].

Received 01.09.2020

© A. P. Karpik, D. V. Lisitsky, A. G. Osipov, V. N. Savinykh, 2020

УДК 528.94:004.4

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-130-137

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ WEB-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ, ПОЛУЧАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ АКТИВНЫХ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Алексей Александрович Колесников

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры картографии и геоинформатики, тел. (913)725-09-28, e-mail: alexeykw@mail.ru

Денис Викторович Грищенко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры картографии и геоинформатики. тел. (383)361-06-35, e-mail: mr_divis@mail.ru

Все большее количество типов пространственных данных становится возможным отображать с помощью только технических средств web-сервисов и стандартного браузера, без необходимости установки ГИС или САД систем. Одним из таких типов данных являются данные, получаемые с помощью активных методов дистанционного зондирования (как правило, они представляют собой облака точек), полноценная работа с которыми буквально 3–4 года назад была возможна только на высокопроизводительных компьютерах и специализированном программном обеспечении. Существующие же сейчас web-технологии позволяют не только отображать облака точек, но и интерактивно взаимодействовать с ними – выполнять измерения, настраивать стили отображения, совмещать с пространственными данными других типов. Целью статьи является формирование критериев и анализ производительности программных средств для создания web-сервисов по визуализации данных, получаемых с помощью активных методов дистанционного зондирования. Для практической апробации выбранного программного обеспечения и выполнения анализа по сформулированной системе групп критериев были использованы несколько файлов, содержащих облака точек из открытых источников. Исследование проводилось на примере программных библиотек Three.js, Deck.gl, Plas.io, Potree, CesiumJS и Blend4Web. По результатам апробации сформированы сводные таблицы производительности и функциональности. Полученные результаты демонстрируют, что с точки зрения производительности, средств визуализации, базовых функций по оформлению и анализу облаков точек современные web-сервисы не уступают специализированному настольному программному обеспечению.

Ключевые слова: визуализация, пространственные данные, облака точек, web-сервис, октодерев, gLTF, JavaScript

Введение

Развитие технологии WebGL, позволяющей браузерам унифицированно использовать аппаратные средства видеокарт для визуализации интерактивной двух и трехмерной графики, дало возможность пользователям без установки дополнительного программного обеспечения работать с достаточно сложными трехмерными геопривязанными моделями [1, 2]. Примерами таких программных продуктов могут служить Google Earth, Cesium, MapBox GL [3, 4]. С точки зрения трехмерной визуализации в браузере вектор-

ных или растровых карт сейчас особых проблем, как с точки зрения качества, так и производительности, практически не возникает. Кроме этого, распространенности трехмерных web-карт во многом поспособствовали встроенные модули в наиболее популярных настольных ГИС, автоматически, без необходимости знаний в web-разработке, генерирующие трехмерные web-приложения [5–8]. Но если рассматривать такой тип пространственных данных, как облака точек, получаемые, как правило, с помощью активных методов дистанционного зондирования, то в этом случае для качественной визуализации необхо-

димы уже познания в базовом web-программировании, особенностях форматов данных и их преобразованиях, что обуславливается объемом и малой внутренней структурированностью [9–12]. В статье рассматриваются программные средства на базе web-технологий, позволяющие отображать и взаимодействовать с данными, получаемыми с помощью активных методов дистанционного зондирования только средствами web-браузера. Для выбранных средств проводится сравнительный анализ производительности, затрат на подготовку исходных данных и функциональности.

Методы и материалы

Суть исследования заключается в визуализации определенных облаков точек с помощью каждого из выбранных для тестирования программных средств, в результате оценивается производительность, сложность в подготовке данных, функциональность.

Под производительностью в данном случае будет подразумеваться среднее количество кадров в секунду (англ. FPS, frame per second) при отображении полного оборота облака точек в горизонтальной плоскости, выполняемого за 12 секунд.

Затраты на подготовку исходных данных оцениваются с точки зрения количества шагов, которые требуется выполнить для получения файла (или набора файлов) формата из исходного набора данных, подходящего для конкретного программного средства.

Функциональность программного средства анализировалась с позиций настройки параметров отображения облака точек, возможностей выполнения геометрических измерений и расчетов, наличия инструментов редактирования. Для проведения тестирования были взяты два облака точек: «Abenberg» [13] и «Stanford-2D-3D» [14].

«Abenberg» представляет собой облако, состоящее из 5,4 млн точек со средней плотностью в 16 точек на квадратный метр. Все точки разделены на классы поверхностей, растительности и строений. В процессе использования данных, кроме координат и значения класса, в семантику точки также заносилось значение интенсивности отраженного сигнала.

«Stanford-2D-3D» – это набор облаков точек, преимущественно внутренних помещений (холлы, офисы, конференц-залы) общественных зданий. В исходных данных, кроме координат, каждая точка содержит значения ее цвета в формате RGB и класс объекта, к которому эта точка принадлежит. Для экспериментов был использован конференц-зал № 2 из набора № 1, состоящий из 1,5 млн точек.

Поскольку наиболее универсальным форматом хранения данных облаков точек является LAS, а исходные данные в обоих наборах представляют собой текстовые файлы со значениями определенных параметров, разделенными запятыми, то предварительно выполнялась конвертация в этот формат посредством программного обеспечения libLAS.

В качестве исследуемого было выбрано следующее наиболее популярное бесплатное либо распространяемое с открытым исходным кодом программное обеспечение: Three.js, Potree, Plas.io, Deck.gl, CesiumJS, Blend4Web.

Three.js [15] – это библиотека на языке JavaScript, используемая для создания и отображения интерактивной трехмерной графики при разработке веб-приложений. Она является базовой программной библиотекой трехмерной графики для большинства рассматриваемых в статье библиотек (Potree, Plas.io, Deck.gl), то есть построение базовых элементов трехмерной сцены и взаимодействие с пользователем осуществляются через функции библиотеки Three.js. Для загрузки и визуализации облаков точек Three.js использует формат PCD (Point Cloud Data) программного обеспечения с открытым исходным кодом Point Cloud Library [16]. Особенностью этого формата является сочетание человекочитаемого заголовка, определяющего количество, размер, размерность и тип данных облака точек и раздела данных, который может быть представлен как в текстовом, так и двоичном формате, который не читается человеком. Также имеется вариант отображения из формата gLTF, но формируемые с помощью pdal файлы часто обладают некорректным синтаксисом и не отображаются.

Deck.gl [17] является JavaScript библиотекой, ориентированной на отображение пространственных данных большого объема. Встроенный модуль PointCloudLayer позво-

ляет в качестве исходных данных использовать файлы формата LAS/LAZ. Для наиболее полного использования всех функций необходимо использовать Node.js и React.

Plas.io [18, 19] также формирует визуальное отображение непосредственно из файла формата LAS. На официальном сайте представлен сервис, который позволяет загрузить произвольный файл и отобразить его, задав необходимый набор базовых параметров. Для создания локальной копии этого сервиса используется система сборки файлов Gulp.

JavaScript библиотека Potree [20–22] использует для хранения и визуализации собственный формат, базирующийся на структуре октодеревя. Он формируется на принципах рекурсивного разделения трехмерного пространства на восемь ячеек (октантов) и формирования древовидной структуры, в дальнейшем используемой для генерализации облака точек и его оптимального отображения. Для создания файла нужного формата разработчиками предоставляется специальный конвертер. Для стандартного развертывания приложения нет необходимости в дополнительном программном обеспечении.

CesiumJS [23, 24] представляет собой web-приложение для визуализации различных пространственных данных посредством виртуального глобуса. Для облаков точек используются трехмерные тайлы в формате gLTF [25, 26]. gLTF (GL Transmission Format) – это формат для хранения трехмерных сцен и отдельных моделей со структурой в стандарте JSON. Технически он основывается на двух файлах: JSON для описания структуры всей трехмерной сцены и бинарного файла, для хранения данных (модели, текстуры, освещение, камеры и т. д.).

Файлы этого формата можно получить, используя либо pdal, либо сервис от разработчиков CesiumJS – Cesium Ion.

Описанные пять JavaScript библиотек реализуют традиционный подход к разработке web-приложений, и для сравнения с ними взят Blend4Web, который представляет собой расширение для настольного приложения Blender, генерирующего весь необходимый программный код на основе объектов трехмерной сцены и указанных параметров. Загрузка LAS файла осуществлялась с помощью модуля LiDAR-Importer. Для корректной визуализации облако точек в сцене Blender должно быть преобразовано в полигональный объект, что может занять довольно продолжительное время и потребовать ручного исправления ошибок обработки.

Запуск всего описанного программного обеспечения выполнялся на видеокартах Radeon 8600M и Nvidia 720M. Выбор обусловлен относительно низкой (и очень близкой) производительностью, что позволит наглядно увидеть различия в производительности отдельных программных решений.

Поскольку не все используемые варианты построения web-приложений обладали встроенными счетчиками количества кадров в секунду, то для унификации визуализации значений использовалась библиотека stats.js.

Результаты

С помощью каждого программного обеспечения визуализировались указанные облака точек с максимально близкими параметрами оформления. Сводные результаты представлены в табл. 1 (большее значение – лучше).

Таблица 1

Сводная таблица показателей производительности

Программное обеспечение	Abenberg, количество кадров в секунду	Stanford-2D-3D, количество кадров в секунду
Three.js	21	26
Deck.gl	12	15
Plas.io	36	48
Potree	30	39
CesiumJS	22	28
Blend4web	38	51

С точки зрения подготовки данных Deck.gl и Plas.io (пример визуализации облака точек Abenberg с помощью Plas.io приведен на рис. 1) позволяют загружать облака точек непосредственно в исходном формате LAS, второй вариант работает гораздо быстрее, но нужно отметить, что требуется затратить больше времени на предварительную настройку отображения (по умолчанию выбирается некорректная цветовая схема, что приводит к сокрытию части элементов облака).

Рис. 1. Визуализация Abenberg в Plas.io

Three.js, Potree (пример визуализации облака точек Abenberg с помощью Potree приведен на рис. 2) и CesiumJS (пример визуализации облака точек Abenberg с помощью CesiumJS приведен на рис. 3) требуют конвертации каждая в свой формат и наиболее простым вариантом является подготовка данных для последнего (использованием сервиса Cesium Ion), в случае первых двух вариантов требуются установка и настройка дополнительного программного обеспечения.

Наибольшее количество времени требуется на подготовку файла LAS для отображе-

ния в Blend4web. Первым шагом выполняется конвертация в среду Blender с помощью модуля LiDAR-Importer, затем полученное облако точек необходимо конвертировать в полигональный объект (или их набор) и потом преобразовать трехмерную сцену в набор файлов web-приложения (на всех этапах могут возникнуть дополнительные сложности с согласованием различных версий моделей и основного приложения, что зачастую приводит к необходимости изменения исходного программного кода). Итоговая сводная информация по подготовке данных приведена в табл. 2.

Рис. 2. Визуализация Abenberg в Potree

Рис. 3. Визуализация Abenberg в CesiumJS

Таблица 2

Сводная таблица этапов подготовки данных

Программное обеспечение	Количество шагов, их описание
Three.js	1, конвертация в формат Point Cloud Data (PCD) с помощью программного обеспечения Point Cloud Library или PDAL
Deck.gl	0, используется исходный формат LAS
Plas.io	0, используется исходный формат LAS
Potree	1, конвертация в формат октодерева potree octree
CesiumJS	1, конвертация в формат 3D тайлов gLTF
Blend4web	3, импорт в Blender, конвертация вертексов в полигоны, формирование web-приложения

Кроме основной функциональности по визуализации облаков точек, большинство описываемых программных средств обладают дополнительными функциями. К ним относятся инструменты для измерения длин, площадей и объемов, настройки цветовых схем и т. д. Описание конкретных инструментов приведено

в табл. 3. Нужно отметить, что не все возможности Blender по созданию визуальных эффектов для трехмерных сцен могут быть корректно преобразованы в приложение Blend4web.

Более подробная информация по функциональности каждого программного обеспечения приведена в табл. 3.

Таблица 3

Функциональность программного обеспечения

Программное обеспечение	Функциональность
Three.js	Статичный набор файлов для создания web-страницы
Deck.gl	Цветовые схемы
Plas.io	Измерение расстояний, цветовые схемы
Potree	Измерение расстояний и площадей, цветовые схемы, настройка цвета для каждого класса точек
CesiumJS	Измерение расстояний, цветовые схемы, расчет зон видимости
Blend4web	Цветовые схемы, визуальные эффекты, источники света

Заключение

С точки зрения производительности наилучшим выбором является Blend4web и Plas.io, но нужно учитывать значительные временные затраты на подготовку данных в случае с Blend4web. С точки зрения сочетания функциональности, простоты сборки приложения и подготовки данных наилучшим выбором представляется Potree.

Также проведенное исследование показало, что зависимости производительности только от формата представления данных

не наблюдается, в отличие от его сочетания с определенным программным обеспечением.

Дополнительно нужно отметить, что на текущий момент web-инструменты позволяют на достаточно высоком уровне реализовать только функции визуализации и базовых измерений облака точек, а то, что касается редактирования, фильтрации, сегментации, сравнения и выравнивания нескольких наборов данных, остается прерогативой настольного (и при этом практически всегда проприетарного) программного обеспечения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Разработка теории и технологических решений контроля состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов методами активного дистанционного зондирования», № 0807-2020-0002).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Behr J., Eschler P., Jung Y., Zöllner M. X3DOM: a DOM-based HTML5/X3D integration model // Web3D '09: Proceedings of the 14th International Conference on 3D Web Technology. – 2009. – P. 127–135. doi: 10.1145/1559764.1559784.
2. Evans A., Romeo M., Bahrehmand A., Agenjo J., Blat J. 3D Graphics on the Web: A Survey // Computers & Graphics. – 2014. – No. 41. – P. 43–61. doi: 10.1016/j.cag.2014.02.002.
3. Li L., Qiao X., Lu Q., Ren P., Lin R. Rendering optimization for mobile web 3D based on animation data separation and on-demand loading // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 88474–88486. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993613.
4. Potenziani M., Callieri M., Dellepiane M., Corsini M., Scopigno R. 3DHOP: 3D heritage online presenter // Computers & Graphics. – 2015. – No. 52. – P. 1–15. doi: 10.1016/j.cag.2015.07.001.
5. Елшина Т. Е., Утробина Е. С., Сысоев А. В. Визуализация модели горного рельефа для web-карт // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, №. 1. – С. 145–155.

6. Каленов Н. Е., Кириллов С. А., Соболевская И. Н., Сотников А. Н. Визуализация цифровых 3d-объектов при формировании виртуальных выставок // *Russian Digital Libraries Journal*. – 2020. – № 23 (3). – С. 418–432.
7. Бугаков П. Ю., Кацко С. Ю., Басаргин А. А., Воронкин Е. Ю. Анализ функциональных возможностей веб приложения Kepler.gl для визуализации и анализа больших наборов пространственных данных // *Вестник СГУГиТ*. – 2018. – Вып. 4 (23). – С. 155–164.
8. Сотников А. Н., Соболевская И. Н., Кириллов С. А., Чередниченко И. Н. Технологии визуализации 3d web-коллекций // *Научный сервис в сети Интернет : труды XX Всероссийской научной конференции (17–22 сентября 2018 г., г. Новороссийск)*. – М. : ИПМ им. М. В. Келдыша, 2018. – С. 438–447.
9. Galeazzi F., Callieri M., Dellepiane M., Charno M., Richards J., Scopigno R. Web-based visualization for 3D data in archaeology: The ADS 3D viewer // *Journal of Archaeological Science: Reports*. – 2016. – No. 9. – P. 1–11. doi: 10.1016/j.jasrep.2016.06.045.
10. Gonizzi Barsanti S., Guidi G. 3D digitization of museum content within the 3D icons project // *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS Annals)*. – 2013. – No. II-5/W1. – P. 151–156. doi: 10.5194/isprsannals-II-5-W1-151-2013.
11. Алтынцев М. А. Карпик П. А. Методика создания цифровых трехмерных моделей объектов инфраструктуры нефтегазодобывающих комплексов с применением наземного лазерного сканирования // *Вестник СГУГиТ*. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 121–139.
12. Анализ больших объемов данных [Электронный ресурс] // Технологии анализа данных BASEGROUP LABS. – Режим доступа: <https://basegroup.ru/community/articles/very-large-data> (дата обращения: 01.10.2020).
13. Hebel M., Arens M., Stilla U. Change detection in urban areas by object-based analysis and on-the-fly comparison of multi-view ALS data // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2013. – No. 86. – P. 52–64. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2013.09.005.
14. Armeni I., Sax A., Zamir A., Savarese S. Joint 2D-3D-Semantic Data for Indoor Scene Understanding // *arXiv preprint*. – 2017. – arXiv:1702.01105.
15. Williams J. Learning HTML5 game programming: a hands-on guide to building online games using Canvas, SVG, and WebGL. – Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley, 2012. – 142 p.
16. Rusu R. B., Cousins S. 3D is here: Point Cloud Library (PCL) // *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. – Shanghai. – 2011. – P. 1–4. doi: 10.1109/ICRA.2011.5980567.
17. Bostock M., Ogievetsky V., Heer J. D-3: Data-Driven Documents // *IEEE transactions on visualization and computer graphics*. – 2011. – No. 17. – P. 2301–2309. doi:10.1109/TVCG.2011.185.
18. Point cloud compression framework for the Web / S. Renault, T. Ebner, I. Feldmann, O. Schreer // *2016 International Conference on 3D Imaging (IC3D)*, Liege. – 2016. – P. 1–8. doi: 10.1109/IC3D.2016.7823455.
19. Schütz M., Mandlbürger G., Otepka J., Wimmer M. Progressive real time rendering of one billion points without hierarchical acceleration structures // *Computer Graphics Forum*. – 2020. – No. 39. – P. 51–64.
20. Sánchez-Aparicio L., Masciotta M., Alvarez J., Ramos L., Oliveira D., Jimenez J. A., Aguilera D., Monteiro P. Web-GIS approach to preventive conservation of heritage buildings // *Automation in Construction*. – 2020. – No. 118. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103304.
21. Scianna A., La Guardia M., Scaduto M. Sharing on web 3D models of ancient theatres. A methodological workflow // *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2016. – No. XLI-B2. – P. 483–490. doi: 10.5194/isprs-archives-XLI-B2-483-2016.
22. Zhang C., Florencio D., Loop C. Point cloud attribute compression with graph transform // *2014 IEEE International Conference on Image Processing, ICIP*. – 2014. – P. 2066–2070. doi: 10.1109/ICIP.2014.7025414.
23. Alvarez M., Raposo J., Miranda M., Bello A., Barbero M. Web 3D: a CityGML viewer for cross-domain problem resolution // *Applied Geomatics*. – 2020. – No. 6. doi: 10.1007/s12518-020-00325-4.
24. De Paor D., Whitmeyer S., Bentley C. Cesium – a virtual globe with strong potential applications in geoscience education // *GSA Abstracts with Programs*. – 2020. – Vol. 48. – No. 2. doi: 10.1130/abs/2016NE-272098.
25. Chen Y., Shooraj E., Sabri S. From IFC to 3D tiles: An integrated open-source solution for visualising BIMs on Cesium // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. – 2018. – No. 7(10). – P. 393–404. doi: 10.3390/ijgi7100393.
26. Gao Y., Cheung G., Maugey T., Frossard P., Liang Jie. 3D geometry representation using multiview coding of image tiles // *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. – 2014. – P. 6157–6161. doi: 10.1109/ICASSP.2014.6854787.

Получено 16.10.2020

© А. А. Колесников, Д. В. Грищенко, 2020

POSSIBILITIES OF USING WEB-TECHNOLOGIES FOR VISUALIZATION OF DATA OF ACTIVE METHODS OF REMOTE SENSING

Aleksey A. Kolesnikov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Cartography and Geoinformatics, phone: (913)725-09-28, e-mail: alexeykw@mail.ru

Denis V. Grishchenko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, Department of Cartography and Geoinformatics, phone: (383)361-06-35, e-mail: mr_divis@mail.ru

An increasing number of types of spatial data is possible to display and operate using only technical means of web services and a standard browser, without the need to install GIS or CAD systems. One of these types of data is data obtained with using active methods of remote sensing (as a rule, they are point clouds), full-fledged work with which 3–4 years ago was possible only on high-performance computers and specialized software. The existing web technologies allow not only displaying point clouds, but also interactively interacting with them - to perform measurements, customize display styles, combine with spatial data of other types. The purpose of the article is to form criteria and analyze the performance of software tools for creating web services for visualizing data obtained with using active methods of remote sensing. For practical testing of the selected software and analysis according to the formulated system of criteria groups, several files containing point clouds from open sources were used. The research was carried out with using the software libraries Three.js, Deck.gl, Plas.io, Potree, CesiumJS and Blend4Web. Based on the testing results, summary tables of performance and functionality were formed. The obtained results demonstrate that in terms of performance, visualization tools, basic functions for designing and analyzing point clouds, modern web services are not inferior to specialized desktop software.

Keywords: visualization, spatial data, point clouds, web service, octree, gLTF, JavaScript

REFERENCES

1. Behr, J., Eschler, P., Jung, Y., & Zöllner, M. (2009). X3DOM: a DOM-based HTML5/X3D integration model. *Web3D '09: Proceedings of the 14th International Conference on 3D Web Technology* (pp. 127–135). doi: 10.1145/1559764.1559784.
2. Evans, A., Romeo, M., Bahrehmand, A., Agenjo, J., & Blat, J. (2014). 3D Graphics on the Web: A Survey. *Computers & Graphics*, 41, 43–61. doi: 10.1016/j.cag.2014.02.002.
3. Li, L., Qiao, X., Lu, Q., Ren, P., & Lin, R. (2020). Rendering optimization for mobile web 3D based on animation data separation and on-demand loading. *IEEE Access*, 8, 88474–88486. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993613.
4. Potenziani, M., Callieri, M., Dellepiane, M., Corsini, M., & Scopigno, R. (2015). 3DHOP: 3D heritage online presenter. *Computers & Graphics*, 52, 1–15. doi: 10.1016/j.cag.2015.07.001.
5. Elshina, T. E., Utrobina, E. S., & Sysoev, A. V. (2020). Visualization of the mountain digital elevation model in web-maps *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(1), 145–155 [in Russian].
6. Kalenov, N. E., Kirillov, S. A., Sobolevskaya, I. N., & Sotnikov, A. N. (2020). Visualization of digital 3d objects in the formation of virtual exhibitions. *Russian Digital Libraries Journal*. 23(3), 418–432.
7. Bugakov, P. Yu., Katsko, S. Yu., Basargin, A. A., & Voronkin E. Yu. (2018). Analysis of the functionality of the web application Kepler.gl for visualizing and analyzing of large spatial datasets. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(4), 155–164 [in Russian].
8. Sotnikov, A. N., Sobolevskaya, I. N., Kirillov, S. A., & Kalenov, N. E. (2018). The use of 3D visualization technology web-collections for the formation of virtual exhibitions. In *Sbornik trudov XX Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii: Nauchnyi servis v seti Internet [Proceedings of the XX All-Russian Scientific Conference: Scientific Service on the Internet]* (pp. 438–447). Moscow: Keldysh Institute of Applied Mathematics (Russian Academy of Sciences) Publ. [in Russian].

9. Galeazzi, F., Callieri, M., Dellepiane, M., Charno, M., Richards, J., & Scopigno, R. (2016). Web-based visualization for 3D data in archaeology: The ADS 3D viewer. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 9, 1–11. doi: 10.1016/j.jasrep.2016.06.045.
10. Gonizzi Barsanti, S., & Guidi, G. (2013). 3D digitization of museum content within the 3D icons project. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS Annals)*, II-5/W1, 151–156. doi: 10.5194/isprsannals-II-5-W1-151-2013.
11. Altyntsev, M. A., & Karpik, P. A. (2020). The technique for creating digital three-dimensional models of oil and gas manufacturing facility object infrastructure using terrestrial laser scanning. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(2), 121–139 [in Russian].
12. Big Data Analysis. (n. d.). Retrieved from <https://basegroup.ru/community/articles/very-large-data> [in Russian].
13. Hebel, M., Arens, M., & Stilla, U. (2013) Change detection in urban areas by object-based analysis and on-the-fly comparison of multi-view ALS data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 86, 52–64. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2013.09.005.
14. Armeni, I., Sax, A., Zamir, A., & Savarese, S. (2017). Joint 2D-3D-Semantic Data for Indoor Scene Understanding. *arXiv preprint*. arXiv:1702.01105.
15. Williams, J. (2012). *Learning HTML5 game programming: a hands-on guide to building online games using Canvas, SVG, and WebGL*. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley, 142 p.
16. Rusu, R. B., & Cousins, S. (2011). 3D is here: Point Cloud Library (PCL). *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 1–4). Shanghai. doi: 10.1109/ICRA.2011.5980567.
17. Bostock, M., Ogievetsky, V., & Heer, J. (2011). D-3: Data-Driven Documents. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17, 2301–2309. doi:10.1109/TVCG.2011.185.
18. Renault, S., Ebner, T., Feldmann, I., & Schreer, O. (2016). Point cloud compression framework for the Web. *2016 International Conference on 3D Imaging (IC3D)* (pp. 1–8). Liege. doi: 10.1109/IC3D.2016.7823455.
19. Schütz, M., Mandlbürger, G., Otepka, J., & Wimmer, M. (2020). Progressive real-time rendering of one billion points without hierarchical acceleration structures. *Computer Graphics Forum*, 39, 51–64.
20. Sánchez-Aparicio, L., Masciotta, M., Alvarez, J., Ramos, L., Oliveira, D., Jimenez, J. A., Aguilera, D., & Monteiro, P. (2020). Web-GIS approach to preventive conservation of heritage buildings. *Automation in Construction*, No. 118. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103304.
21. Scianna, A., La Guardia, M., & Scaduto, M. (2016). Sharing on web 3D models of ancient theatres. A methodological workflow. *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B2, 483–490. doi: 10.5194/isprs-archives-XLI-B2-483-2016.
22. Zhang, C., Florencio, D., & Loop, C. (2014). Point cloud attribute compression with graph transform. *2014 IEEE International Conference on Image Processing, ICIP*. (pp. 2066–2070). doi: 10.1109/ICIP.2014.7025414.
23. Alvarez, M., Raposo, J., Miranda, M., Bello, A., & Barbero, M. (2020). Web 3D: a CityGML viewer for cross-domain problem resolution. *Applied Geomatics*, No. 6. doi: 10.1007/s12518-020-00325-4.
24. De Paor, D., Whitmeyer, S., & Bentley, C. (2020). Cesium – a virtual globe with strong potential applications in geoscience education. *GSA Abstracts with Programs*, 48(2). doi:10.1130/abs/2016NE-272098.
25. Chen, Y., Shooraj, E., & Sabri, S. (2018). From IFC to 3D tiles: An integrated open-source solution for visualising BIMs on Cesium. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(10), 393–404 doi: 10.3390/ijgi7100393.
26. Gao, Y., Cheung, G., Maugey, T., Frossard, P., & Liang, Jie. (2014). 3D geometry representation using multiview coding of image tiles. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (pp. 6157–6161). doi:10.1109/ICASSP.2014.6854787.

Received 16.10.2020

© A. A. Kolesnikov, D. V. Grishchenko, 2020

УДК 528.9

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-138-145

ПОЗНАВАТЕЛЬНЫЙ АСПЕКТ В КАРТОГРАФИИ

Людмила Константиновна Радченко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент, тел. (913)909-51-88, e-mail: l.k.radchenko@sgugit.ru

В статье анализируется познавательный аспект в картографии, который присутствует, когда мы говорим о теоретических концепциях развития картографии, функциях картографических произведений, языке карты и т. д. Приводятся суждения о «познавательной способности», которую в свою очередь предлагается подразделить на два уровня – первичный (не профессиональный) и вторичный (профессиональный), о познавательной деятельности и о познании (рациональном и чувственном, применительно к картографическим произведениям). В результате обсуждения функций карт, и в частности познавательной функции, предложена классификация карт по новому признаку – по преобладающей функции. На примере уже опубликованных и изданных карт познавательной направленности сформулированы особенности таких карт. Приведены практические примеры карт познавательной направленности, которые могут составить основу для создания познавательной картографической модели региона. Исследование, представленное в статье, основано на методах классической картографии, философских понятиях: познание и познавательная деятельность, – и на практических картографических исследованиях, а также соответствует ряду задач, сформулированных в Государственной программе «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» на 2019–2030 годы, что говорит об актуальности темы исследования.

Ключевые слова: познание, познавательная способность, познавательная деятельность, познавательная карта, функции карт, классификация карт, современные методы картографии, классификация по преобладающей функции, теоретические концепции картографии

Введение

Современная картография – это увлекательная познавательная наука, исследующая посредством карт пространственное размещение явлений природы и общества, их связи, динамику; наука, способная проникать в механизмы функционирования процессов во времени и пространстве, предсказывать их дальнейшее развитие [1, 2]. Еще в одном источнике звучит следующее: «Современная картография прежде всего познавательная наука», – сказал в интервью президент МИИГАиК, академик Международной академии астронавтики, Российской инженерной академии, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, летчик-космонавт СССР Савиных Виктор Петрович [3]. Эти утверждения в последнее время подкрепляются готовыми картографическими продуктами, которые несут в своих названиях слово «познавательная», или в них явно выражена познавательная функция и эти картографические продукты позволяют нам узнать что-то новое, приобрести новые знания.

Методы и материалы

В связи с тем, что современные технологии позволяют создавать картографические продукты на готовых базах данных, в сети Интернет появились различные карты познавательной направленности. Одним из примеров является сайт rndnet.ru, который содержит ряд карт или, если выражаться картографическим языком, «серию карт» под общим названием «Познавательные карты мира».

Этот раздел содержит карты со специфическими названиями, такими как:

- карта счастья;
- карта уровня IQ;
- карта количество ученых на 1 млн человек;
- карта популярных видов спорта;
- карта уровня потребления кофе в мире;
- карта использования Интернета в зависимости от времени года;
- карта доступности сервиса просмотра улиц Google и т. д.

Еще один сайт – www.globusoff.ru – представляет ряд карт:

- познавательную карту мира для детей Travel Map Kids Animals, где ребенку предлагается установить по описанию места обитания животных условные знаки, выполненные в виде объемных наклеек;

- скретч-карту мира «Карта твоих путешествий», где есть возможность обозначить территорию, на который Вы побывали, путем стирания специального слоя, нанесенного на эту карту. То есть на такой карте можно отметить локации своих путешествий и прокладывать будущие маршруты. Эта карта дарит теплые воспоминания о пережитых приключениях и мотивирует на новые свершения.

Сайт u-stena.ru содержит познавательную карту мира для детей. Для придания эффекта познавательности используются специальные способы «оживления карты» с помощью наложения аппликационных материалов, которые знакомят ребенка с уникальными объектами архитектуры, фауной, флорой и т. д.

В картографии слово «познавательная» появляется тогда, когда мы говорим о теоретических концепциях развития этой науки (систем взглядов на предмет и метод картографии). Познавательная, или модельно-познавательная концепция, интерпретирует картографию как познавательную науку, тесно связанную с науками о Земле, естественными и социально-экономическими науками, теорией познания, и отдает предпочтение в изучении действительности картографическому моделированию, рассматривая карту как модель действительности. Сторонниками этой концепции считаются российские картографы Н. Н. Баранский, К. А. Салищев, А. В. Гедымин, А. Г. Исаченко и их последователи еще с 1940-х гг. [4].

А. Ф. Асланикашвили в работе [5], основываясь на той части эмпирического материала картографии, которая имеет познавательное, а не исполнительско-техническое значение, исследует картографическую науку в гносеологическом смысле и дает ее новое теоретическое осмысление, принципиально отличное от традиционного. Логико-методологическая система картографии, разработанная в данном исследовании, находится в полном

соответствии не только с эмпирическим материалом картографии вообще, но и с теорией познания материалистической диалектики и семиотикой. Исходной философской категорией послужила категория пространства-времени, которая и дала возможность автору теоретически осмыслить весь эмпирический материал картографии и обосновать принципиально новое определение предмета ее познания, объектного языка и метода [5].

С нашей точки зрения, аспект познавательности проявляется также в функциях картографических произведений [4, 5]. При практическом и научном использовании карт выделяют пять основных функций:

- коммуникативную по хранению и передаче пространственной информации;

- оперативную, связанную с непосредственным решением различных практических задач (например, по навигации, управлению сельским хозяйством и т. п.);

- конструктивную – по применению карт для разработки и реализации всевозможных народнохозяйственных и социальных проектов;

- познавательную – для пространственно-временных исследований явлений природы и общества и приобретения о них новых знаний;

- прогностическую (как развитие познавательной) для предвидения явлений – их распространения, изменений во времени и будущих состояний.

В результате осуществленного в картографии научно-технического прогресса за сравнительно небольшой промежуток времени произошли существенные изменения в части основных свойств, характеристик и функций карт, роли и места картографии в экономике и жизни общества, методах и технологиях:

- появились методы цифровой, геоинформационной, мультимедийной, в том числе анимационной, трехмерной, навигационной, мобильной картографии, на их базе формируются новые разделы в картографии;

- изменились функции самой карты в процессах исследования и познания пространства;

- меняется классический картографический метод исследования в направлении осу-

ществления познания накопленных геопространственных знаний [6];

– существенно расширились объемы и сферы использования геоинформации и картографических материалов широкими слоями населения через средства массовой информации, для навигации, в обучении, через Интернет [7].

Результаты и их обсуждение

Географические карты состоят из природных и социально-экономических объектов и явлений, в зависимости от темы и назначения карты эти объекты и явления по-разному отображаются. Например, на экологических картах в равной степени присутствуют и природные, и социально-экономические элементы содержания карты (примеры создания экологических карт приведены в статье [8]). Карты могут показывать явления, происходящие над земной поверхностью (карты относительной влажности, карты осадков), а также явления, протекающие внутри планеты Земля (карты геологического строения [9]). На картах можно отобразить явления или события, которые происходили очень давно (например, исторические и этнополитические карты, освещенные в работе [10]). Можно показать перемещение объектов и явлений (карты миграции животных, методический подход по созданию таких карт описан в источнике [11]), изменение явлений во времени (карты антропогенного рельефа). На картах могут отображаться прогнозы во времени (карты урожайности сельскохозяйственных культур) и прогнозы в пространстве (карты оценки угленосности территории [12]). Также карты могут содержать оценку природных условий и ресурсов [13], отображать результаты оценки объекта или явления применительно к конкретной задаче (частный случай – карты оценки состояния городских зеленых насаждений [14], карты мелиорации земель) [15].

Исходя из темы и назначения карты, из того, какие объекты и явления отображены на ней, в каком объеме и с помощью каких способов отображения, можно уверенно утверждать, что все функции карты, упомянутые в предыдущем разделе, в той или иной мере

превалируют в каждой карте. В каких-то картах преобладает коммуникативная функция, например карты погоды, которые информируют о погоде. Конструктивная функция больше присутствует в картах, которые помогают принимать решения, например навигационные карты для широкого круга пользователей помогают принять решение – какой кратчайший путь до места назначения. Прогностическая функция максимально проявляется в картах возможной степени загрязнения атмосферы (при осуществлении строительства каких-либо промышленных объектов).

Все картографические изображения в той или иной мере считаются познавательными, но уровень интереса к картам у всех пользователей разный. И к тому же нужно учитывать уровень подготовленности пользователей с точки зрения чтения карты. Этот уровень отличается у профессионала (например, геолога или военного), который читает карту, используя свои профессиональные знания по изучаемому объекту картографирования, и у школьника, который приступил к изучению какого-либо предмета, и у него нет никаких базовых знаний по изучаемому вопросу [16]. Из этого следует, что познавательная способность у всех разная, и ее можно подразделить на первичную (не профессиональную) и вторичную (профессиональную). Словосочетание «познавательная способность» одно, а значений у него два. Если мы рассмотрим значение слова «познание», представленное в различных словарях, то тоже увидим двоякое значение этого слова.

Познание – процесс отражения и воспроизведения действительности в мышлении субъекта, результатом которого является новое знание о мире [17]. Познание – высшая форма отражения объективной действительности, процесс выработки истинных знаний. Первоначально познание представляло собой одну из сторон практической деятельности людей, постепенно, в ходе исторического развития человечества, познание стало особой деятельностью. В познании выделяют два уровня: чувственное познание, осуществляемое с помощью ощущения, восприятия, представления, и рациональное познание, протекающее в понятиях, суждениях, умозаключе-

ниях и фиксируемое в теориях. Различают также обыденное, художественное и научное познание, а в рамках последнего – познание природы и познание общества [18]. Рациональное познание проявляется в картах, которые построены по научным классификациям, это карты почвенные, геологические, растительности. Чувственное познание заложено в картах первичного знания, например общегеографические карты. Мы чувственно воспринимаем элементы карты: гидрографию – голубой, растительность – зеленой.

Также двойко рассматривают и познавательную деятельность. В источнике [19] познавательная деятельность представлена как особый вид процесса науки, направленный на получение нового знания. В отличие от обыденного, художественного и других видов деятельности, научное познание направлено на получение объективно-истинного знания, отражающего сущность объектов, и выражено специальным языком. В основе анализа науки лежит деятельностный подход, означающий, что познавательный процесс можно рассматривать как определенный вид деятельности, имеющий следующую структуру: цель, средства, результат. Также познавательная деятельность может рассматриваться в других категориях: субъект, познавательное действие, объект. Совмещение двух подходов позволяет определить субъектную структуру деятельности, в которую входят цель, мотивы, планы, а также объектную структуру деятельности, включающую в себя изучаемые наукой объекты как определенные фрагменты объективной реальности, предметы как стороны объектов, а также результаты в виде продуктов (знаний).

Картография в современном обществе – это не только наука и техника или специальная область и это не только ее подразделение на университетскую, или вузовскую, или производственную, но и создание и использование карт [20]. Важную роль в создании карт сегодня играют требования, которые предъявляются пользователями карт, а также те условия научно-технологического прогресса, которые позволяют нам по-новому использовать картографические продукты. В связи с этим предлагается новое основание для клас-

сификации карт – по преобладающей функции, то есть по той преобладающей характеристике, благодаря которой ее создают и используют:

- карты, в которых преобладает познавательная функция, причем они делятся на карты познавательных первичных знаний (ученик ищет на карте уникальные объекты Новосибирской области) и карты познавательных вторичных знаний (геоморфолог смотрит на карту и на базе своих знаний получает новые знания);

- карты, в которых преобладает *конструктивная* функция, например карты, которые помогают принять решение – по навигационной карте рассчитать оптимально-выгодный в экономическом плане путь до места назначения, либо карты по рациональному использованию ресурсов;

- карты, в которых преобладает *коммуникативная или информационная* функция, например карта распространения коронавирусной инфекции COVID-19 информирует о количестве случаев заболеваемости в разных странах;

- карты, в которых преобладает *прогностическая* функция, например карты возможного затопления или карты возможного загрязнения атмосферы;

- карты, в которых преобладает *оперативная* функция, например карты с помощью которых принимаются пространственные решения, навигационные карты;

- карты, в которых преобладает *инновационная* функция, например ученый-геоморфолог, используя геоморфологическую карту, придумал теорию, выработал новые знания;

- карты, в которых преобладает *функция ориентирования*, например по топографической карте можно проследить движение войск или по туристским картам осуществить ориентирование в турпоходах;

- карты, в которых преобладает *проектировочная* функция, например проектные карты используются как основа для различных видов проектирования – транспортного, энергетического, промышленного и сельскохозяйственного, включая городское проектирование. Также по картам проектируется планируемое расположение коммуникаций, автомобильных и железных дорог;

– карты, в которых преобладает *управленческая* функция, например, карты, предназначенные для государственного и регионального планирования, а также для нужд административного и хозяйственного управления различных уровней;

– карты, в которых преобладает *оценочная* функция, например оценочные карты для оценки условий ведения народного хозяйства (для исследований, рационального использования и восстановления природных богатств, охраны, контроля и улучшения географической среды, целесообразного размещения производственных сил, комплексного развития экономических районов);

– карты, в которых преобладает *инвентаризационная* функция, например кадастровые карты территории, где отображаются кадастровые сведения различных объектов учета: земельных, градостроительных, природных, лесных, водных и т. д.

Данная классификация карт по преобладающей функции карт показывает, что для широкого круга пользователей наиболее удобными для восприятия являются карты с преобладающей функцией познавательности и именно такие карты должны лечь в основу познавательной модели региона. Такая модель должна настраиваться для каждого возрастного периода и категории пользователей, комбинироваться рядом тематических слоев

и предназначаться для комплексного восприятия региональных особенностей широким кругом потребителей.

Например, для учащихся начальной школы понадобятся познавательные карты с уникальными объектами региона (рис. 1) и учебные карты (рис. 2).

Также такие карты отличаются рядом особенностей:

– тематическое содержание этих карт – это уникальные объекты или события, отличающие данный регион от другого, которые не связаны по смысловой тематике и содержанию;

– легенды таких карт, чаще всего, просты (или просто перенесены на само картографическое изображение), и имеют один – два тематических элемента содержания;

– это карты аналитического типа (отвечают на единственный вопрос) и включают познавательные моменты из различных сфер жизнедеятельности человечества;

– эффект познавательности достигается за счет дополнительных средств оформления и способов картографического отображения;

– для создания познавательных карт используют мелкий масштаб, так как эти карты носят, чаще всего, обзорный характер;

– познавательные карты яркие в оформлении, часто сопровождаются иллюстративными (художественными) условными знаками.

Рис. 1. Объемная познавательная карта Новосибирской области, карту составила обучающаяся группы БК-41 (2020 г.) СГУГиТ Е. В. Китаева под руководством к. т. н., доцента кафедры картографии и геоинформатики Л. К. Радченко

Рис. 2. Карты «Животные Новосибирской области», «Рыбы Новосибирской области», «Птицы Новосибирской области» для начальных классов, карты составила обучающаяся группы БК-41 (2019 г.) СГУГиТ А. И. Пахомова под руководством к. т. н., доцента кафедры картографии и геоинформатики Л. К. Радченко

Заключение

В настоящее время, когда картография и геодезия стали неотъемлемой частью обычной жизни граждан, постепенно формируются новые направления в картографии, которые ориентированы на неподготовленного пользователя, но желающего познавать мир посредством картографических произведений, таких как познавательные модели региона. Тем более к этому есть все предпосылки со стороны технологического прогресса: это высокий уровень информатизации, компьютеризации и смартфонизации. Исследования, приведенные в статье, соответствуют ряду задач, сформированных в Государственной программе на 2019–2030 гг., утвержденной постановлением Правительства РФ от 27.03.2019 № 337 «Научно-технологическое развитие Российской Федерации». А именно ПП 4 «Формирование и реализация комплексных научно-технических задач», цель данной подпрограммы: «Формирование сбалансированной системы поддержки всех стадий «жиз-

ненного цикла» знаний, обеспечивающей эффективное использование инициативного, интеллектуального и творческого потенциала нации». Задачи подпрограммы – обеспечение передачи научного знания для развития технологий, продуктов (товаров, услуг) по широкому спектру направлений научно-технологического и инновационного развития, эффективная поддержка перспективных инициативных научных и (или) научно-технических, высокотехнологичных проектов и стимулирование частных, в том числе зарубежных, инвестиций в исследования и разработки; ПП5 «Инфраструктура научной, научно-технической и инновационной деятельности», цель подпрограммы: обеспечение доступности инфраструктуры и информации, необходимой для осуществления научной, научно-технической и высокотехнологичной деятельности, одна из задач подпрограммы «Создание условий для развития «гражданской» науки, расширение доступа граждан РФ к научным знаниям и участия в их получении» [21].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берлянт А. М. Образ пространства: карта и информация. – М. : Мысль, 1986. – 238 с.
2. Комиссарова Т. С. Картография. – СПб., 2010. – 212 с.
3. Современная картография – это прежде всего познавательная наука [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vestniknews.ru>.
4. Берлянт А. М. Картография. – М. : Аспект Пресс, 2001. – 336 с.
5. Асланикашвили А. Ф. Метакартография. Основные проблемы. – Тбилиси : Изд-во Мецниереба, 1974. – 124 с.
6. Янкелевич С. С. Функции карты в условиях постиндустриальной эпохи // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 160–168.

7. Лисицкий Д. В. Перспективы развития картографии: от системы «Цифровая земля» к системе виртуальной геореальности // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 2 (22). – С. 8–16.
8. Николаева О. Н. Некоторые аспекты создания карт экологического разнообразия территории // Вестник СГУГиТ. – 2011. – Вып. 3 (16). – С. 75–80.
9. Geological Structures and Maps. A practical guide [Electronic resource]. – Mode of access: [https://www.ucursos.cl/usuario/c19094b1ea89f1f08e243796b671e2e5/mi_blog/r/Geologia_Estructural_y_Mapas\(ingles\).pdf](https://www.ucursos.cl/usuario/c19094b1ea89f1f08e243796b671e2e5/mi_blog/r/Geologia_Estructural_y_Mapas(ingles).pdf).
10. Баталов Р. Н., Радченко Л. К. Обзор основных направлений использования ГИС-технологий в историко-картографических исследованиях // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 1. – С. 119–135.
11. Никулина И. В., Минервин И. Г., Мелкий В. А., Радченко А. В. Геоинформационное биогеографическое картографирование состояния островных экосистем по данным дистанционного зондирования Земли // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 1. – С. 194–210.
12. Susan J. Tewalt, Leslie Ruppert. Coal Assessments and Coal Research in the Appalachian Basin [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/273763553_Coal_Assessments_and_Coal_Research_in_the_Appalachian_Basin.
13. Дубровский А. В., Малыгина О. И., Конева А. В., Антипов И. Т. «Карта оздоровительных местностей Сибирского федерального округа» как элемент системы инвестиционной привлекательности региона // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 58–70.
14. Трубина Л. К., Николаева О. Н., Муллаярова П. И., Баранова Е. И. Инвентаризация городских зеленых насаждений средствами ГИС // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 107–119.
15. Сладкопцевцев С. А. Тематическое картографирование (достижения и проблемы) : монография. – М. : МИИГАиК, 2010. – 130 с.
16. Patrick Wiegand. Educational Cartography [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/284426899_Educational_Cartography.
17. Большой энциклопедический словарь : А–Я / Гл. ред. Прохоров А. М. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. ; СПб : БСЭ, 2000. – 1452 с.
18. Философский словарь / авт.-сост. С. Я. Подопрigора, А. С. Подопрigора. – 3-е изд., перераб. – Ростов-н/Д. : Феникс, 2015. – 480 с.
19. Старжинский В. П., Цепкало В. В. Методология науки и инновационная деятельность : учебное пособие. – Минск ; М. : Новое знание : Инфра-М, 2016.
20. Володченко А. е-LEXIKON. Картосемиотика. – Дрезден, 2009. – 61 с.
21. Научно-технологическое развитие Российской Федерации [Electronic resource]. – Mode of access: https://pstu.ru/files/2/file/fpkp/gos/2019/Nauchno-tehnologicheskoe_razvitie_RF_2019-2030.pdf.

Получено 25.06.2020

© Л. К. Радченко, 2020

COGNITIVE ASPECT IN CARTOGRAPHY

Ludmila K. Radchenko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Cartography and Geoinformatics, phone: (913)909-51-88, e-mail: l.k.radchenko@sgugit.ru

The article analyzes the cognitive aspect in cartography, which is present when we talk about theoretical concepts of cartography development, functions of cartographic works, map language, etc. Judgments are made about the «cognitive ability» of two levels – primary (non-professional) and secondary (professional), cognitive activity and cognition (rational and sensory). As a result of the discussion of map functions, and in particular the cognitive function, the classification of maps by a new feature is proposed – by the predominant function. On the example of already published and published maps of cognitive orientation, the features of such maps are formed. Practical examples of cognitive maps that can form the basis for creating a cognitive cartographic model of the region are given. The research presented in the article is based on the methods of classical cartography, philosophical concepts: cognition and cognitive activity, and practical cartographic research, and also corresponds to a number of tasks formed in the State program «Scientific and technological development of the Russian Federation» for 2019-2030, which indicates the relevance of the research topic.

Keywords: knowledge, informative ability, informative activity, informative map, map functions, map classification, modern cartography methods, classification by predominant function, theoretical concepts of cartography

REFERENCES

1. Berlyant, A. M. (1986). *Obraz prostranstva: karta i informatsiya [Image of space: map and information]*. Moscow: Mysl' Publ., 238 p. [in Russian].
2. Komissarova, T. S. (2010). *Kartografiya [Cartography]*. St. Petersburg, 212 p. [in Russian].
3. Modern cartography is primarily a cognitive science. (n. d.). Retrieved from <https://vestniknews.ru> [in Russian].
4. Berlyant, A. M. (2001). *Kartografiya [Cartography]*. Moscow: Aspekt Press Publ., 336 p. [in Russian].
5. Aslanikashvili, A. F. (1974). *Metakartografiya. Osnovnye problemy [Metacartography. Main problem]*. Tbilisi: Metsniereba Publ., 124 p. [in Russian].
6. Yankelevich, S. S. (2020). Map functions in the post-industrial era. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(2), C. 160–168 [in Russian].
7. Lisitsky, D. V. (2013). Prospects for the development of cartography: from the "Digital earth" system to the system of virtual geo-reality. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(2), 8–16 [in Russian].
8. Nikolaeva, O. N. (2011). Some aspects of creating maps of ecological diversity of the territory. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(16), 75–80 [in Russian].
9. Geological Structures and Maps. A practical guide. (n. d.). Retrieved from [https://www.ucursos.cl/usuario/c19094b1ea89f1f08e243796b671e2e5/mi_blog/r/Geologia_Estructural_y_Mapas\(ingles\).pdf](https://www.ucursos.cl/usuario/c19094b1ea89f1f08e243796b671e2e5/mi_blog/r/Geologia_Estructural_y_Mapas(ingles).pdf).
10. Batalov, R. N., & Radchenko, L. K. (2020). Overview of the main directions of using GIS technologies in historical and cartographic research. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(1), 119–135 [in Russian].
11. Nikulina, I. V., Minervin, I. G., Melky, V. A., & Radchenko, A. V. (2020). Geoinformation biogeographic mapping of the state of island ecosystems based on remote sensing Data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(1), 194–210 [in Russian].
12. Tewalt, S. J., & Ruppert, L. (n. d.). Coal Assessments and Coal Research in the Appalachian Basin. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/273763553_Coal_Assessments_and_Coal_Research_in_the_Appalachian_Basin.
13. Dubrovsky, A. V., Malygina, O. I., Koneva, A. V., & Antipov, I. T. (2018). Map of health-improving areas of the Siberian Federal district» as an element of the system of investment attractiveness of the region. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(2), 58–70 [in Russian].
14. Trubina, L. K., Nikolaeva, O. N., Mullayarova, P. I., & Baranova, E. I. (2017). Inventory of urban green spaces using GIS. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(3), 107–119 [in Russian].
15. Sladkoptsev, S. A. (2010). *Tematicheskoe kartografirovanie (dostizheniya i problemy) [Thematic mapping (achievements and problems)]*. Moscow: Moscow State University of Geodesy Publ., 130 p. [in Russian].
16. Wiegand, P. (n. d.). Educational Cartography. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/284426899_Educational_Cartography.
17. Prokhorov A. M. (Ed.). (2000). *Bol'shoy entsiklopedicheskiy slovar': A-Ya [Big encyclopedic dictionary: A-Z]* (2nd ed.). Moscow; St. Petersburg: BSE Publ., 1452 p. [in Russian].
18. Podoprighora, S. Ya., & Podoprighora, A. S. (2015). *Filosofskiy slovar' [Philosophical dictionary]* (3rd ed.). Rostov-on-don: Feniks Publ., 480 p. [in Russian].
19. Starzhinsky, V. P., & Tsepikalo, V. V. (2016). *Metodologiya nauki i innovatsionnaya deyatel'nost' [Methodology of science and innovative activity]*. Minsk: "New knowledge"; Moscow: "Infra-M" [in Russian].
20. Volodchenko, A. (2009). *e-LEXIKON. Kartosemiotika [e-LEXIKON. Cartosemiotics]*. Dresden, 61 p. [in Russian].
21. Scientific and technological development of the Russian Federation (n. d.). Retrieved from https://pstu.ru/files/2/file/fpkp/gos/2019/Nauchno-tehnologicheskoe_razvitie_RF_2019-2030.pdf. [in Russian].

Received 25.06.2020

© L. K. Radchenko, 2020

УДК 528.9:004.9

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-146-151

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ ОНЛАЙН-СЕРВИСОВ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «НАУКИ О ЗЕМЛЕ»

Людмила Константиновна Трубина

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор кафедры экологии и природопользования, тел. (383)361-08-86, e-mail: trubinalk@rambler.ru

Ольга Николаевна Николаева

Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства им. А. Н. Костякова, 127550, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, доктор технических наук, профессор кафедры экологической безопасности и природопользования, тел. (499)976-09-37; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, профессор кафедры экологии и природопользования, тел. (383)361-08-86, e-mail: onixx76@mail.ru

Евгения Ивановна Баранова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры экологии и природопользования, тел. (383)361-08-86, e-mail: evgn.dxn@yandex.ru

В статье рассматриваются возможности использования геоportалов как основного источника открытых цифровых картографических данных для развития у обучающихся пространственного мышления и навыков работы с геопространственными данными. Отмечено, что в настоящее время развитию навыков пространственного мышления у обучающихся уделяется недостаточно внимания. Отмечена роль пространственного мышления в освоении обучающимися картографии и других наук о Земле. Дано определение понятия «геоportалы». Представлен перечень региональных геоportалов, проанализированных с точки зрения их наполненности пространственно распределенными природно-ресурсными данными и разнообразия предоставляемых средств для работы с ними. Перечислены параметры геоportалов, оценивавшиеся в процессе анализа. Сделаны выводы о критериях, которым должен соответствовать геоportал, рекомендуемый учащимся для закрепления навыков работы с геопространственными данными.

Ключевые слова: геопространственные данные, пространственное мышление, обучающиеся, профессиональные компетенции, картографические онлайн-сервисы, геоportалы, цифровые карты

Введение

Углубленное направление «Науки о Земле» представлено во многих вузах Российской Федерации и включает в себя обширный перечень специальностей, являющихся как естественно-научными, так и техническими (экологи и геоэкологи, геологи, гидрометеорологи, картографы, кадастровые инженеры, инженеры в области строительства и коммуникаций и пр.). Одной из основных компетенций обучающихся по данным специальностям является овладение навыками создания

и моделирования данных, которые имеют координатную привязку.

Основные способы и приемы определения положения объектов на земной поверхности и использования карт в научной, хозяйственной и повседневной деятельности осваиваются обучающимися еще в средней школе, в ходе изучения физической и экономической географии, истории, краеведения и прочих предметов, предполагающих использование пространственных данных. Однако для успешной подготовки специалистов по специальностям, входящим в углубленное направление

«Науки о Земле», необходимо сформировать у обучающихся более глубокое представление о пространственном моделировании объектов, явлений и процессов окружающей среды. Для решения этой задачи необходимо развивать у обучающихся пространственное мышление, которое позволяет мысленно воссоздавать особенности размещения и взаимного расположения объектов и устанавливать взаимосвязи между различными формами их представления (трехмерное или плоскостное, реалистичное или схематизированное и т. п.). Данная обучающая деятельность соответствует требованиям ФГОС 3++, согласно которому преподаватель обязан обеспечить «расширение компетенций обучающихся в области познавательной деятельности» [1].

Квинтэссенцией визуального метода познания окружающей среды являются географические карты, поэтому в процессе развития пространственного мышления обучающихся важную роль играет работа с картами различной тематики и назначения [1–3]. Как показывает ряд исследований [2, 4], многие современные студенты испытывают затруднения при формировании и использовании мысленных образов изучаемых объектов и явлений.

Материалы и методы

Появление такого вида деятельности, как геоинформационное картографирование, трактуемое создание карты как «обработку и визуализацию данных, организованных и структурированных в виде базы географических данных» [5, 6], развитие технологий web-картографирования значительно упростили доступ (в том числе удаленный) к информации, представленной в картографической форме, что привело к популяризации цифровых и электронных карт среди широкого круга пользователей [7–11]. Благодаря этому современная образовательная сфера располагает таким инструментарием для выработки и совершенствования навыков пространственного мышления обучающихся, как картографические онлайн-сервисы, чаще именуемые геопорталами [12]. Геопорталы – это web-порталы, которые визуализируют и предоставляют доступ к географической ин-

формации с помощью web-сервисов [13]. Они представляют собой сочетание баз геоданных и основных инструментов для выполнения пространственных запросов. Таким образом, они могут выступать одним из эффективных средств для выработки и совершенствования навыков пространственного мышления обучающихся, так как в этом случае образовательная деятельность будет концентрироваться именно на действиях по преобразованию геоданных, визуализации полученных результатов и мысленном установлении соответствия картографических и реальных образов изучаемых объектов.

Картографическая информация, представленная на геопортале, зачастую структурируется в соответствии с предпочтениями разработчиков и пожеланиями заказчика. Это может быть либо совокупность цифровых слоев, которые дополняют основной массив данных, систематизированный в виде текстов и таблиц, либо отдельная подсистема, например, «справочная картографическая система», «геоинформационная система», «информационно-картографическая система» и пр. Изначально картографическая компонента геопорталов представляла собой бесплатные цифровые карты (Яндекс.Карты или OpenStreetMap), которые визуализировали базовые общегеографические сведения, дополненные ограниченной информацией о социально и экономически значимых объектах (органы местной администрации и самоуправления, маршруты общественного транспорта, школы, поликлиники, кинотеатры и т. п.).

В современном российском сегменте интернета представлено достаточно большое количество информационных ресурсов, позиционирующих себя как геопорталы [14, 15]. Однако далеко не все из них могут быть отнесены к данной категории, и, в первую очередь, – в силу несоблюдения такого важного формального признака, как наличие функции поиска данных и сервиса по метаданным [16]. Поэтому выбор геопорталов, которые могут быть использованы в образовательной деятельности при подготовке специалистов по укрупненному направлению «Науки о Земле», должен осуществляться с учетом ряда критериев, которые будут рассмотрены ниже.

Результаты и обсуждение

Кафедрой экологии и природопользования СГУГиТ был проанализирован ряд геопорталов, которые могут быть использованы в образовательной деятельности при подготовке специалистов по направлению «Экология и природопользование». Учитывались следующие параметры:

- тип доступа к геопорталу (свободный или требующий регистрации);
- полнота характеристики природно-ресурсного комплекса региона;
- возможность поиска и выбора объектов по различным критериям, запроса характеристик объектов;
- возможность выполнения измерений по картам;
- широта возможностей пространственного моделирования (выделение районов и зон по заданным критериям, буферизация, сетевой анализ, классификация объектов или участков местности в соответствии с заданной шкалой);
- возможность создания пользовательских цифровых слоев, содержащих объекты различной пространственной локализации (точечной, линейной или полигональной), внесения атрибутивных сведений, сохранения результатов.

Оценка соответствия геопортала тем или иным критериям выполнялась по специально разработанной балльной шкале. Максимальное количество набранных баллов составляет 12.

Для анализа были выбраны следующие геопорталы, расположенные в верхних строках выдачи поисковых систем Google и Яндекс: ГИС Республики Башкортостан, геопортал Республики Бурятия, геопортал Воронежской области, «Енисей ГИС», геопортал Республики Коми, ГИС «Природные ресурсы Магаданской области», ГИС «Природопользование» (Самара), геопортал «Югра».

Результаты анализа показали следующее:

- максимальное количество баллов набрали геопортал Республики Коми и геопортал Республики Бурятия (соответственно 12 и 9 из 12 возможных), которые характеризовались не только широким спектром представленных геопространственных данных об окружающей среде и природных ресурсах, но

и разнообразным инструментарием для выполнения пространственного анализа. Однако обучающимися был отмечен не вполне удобный пользовательский интерфейс геопортала Республики Бурятия, где все цифровые картографические слои были собраны в общий каталог без группировки по темам, что затрудняло работу со структурой карт;

- минимальное количество баллов набрали геопорталы «Югра» и геопортал Воронежской области (соответственно 4 и 5 из 12 возможных). Это было обусловлено малым разнообразием тематики представленных геоданных и ограниченным инструментарием для осуществления пространственного анализа;

– обучающиеся проявили большой интерес к геопорталам ГИС «Природопользование» (Самара) и «Енисей ГИС», которые, несмотря на отсутствие у них функции пространственного моделирования, позволяли создавать цифровые слои из объектов, наносимых пользователями.

По результатам анализа геопортал Республики Коми был выбран как базовый для организации практической деятельности обучающихся в области совершенствования пространственного мышления и выработки навыков по обработке и визуализации геопространственных данных.

Заключение

По результатам анализа региональных геопорталов были сделаны следующие выводы:

- перечень параметров геопорталов, использованный в ходе анализа, в целом достаточен для определения возможности использования того или иного геопортала в образовательном процессе при подготовке специалистов по направлению «Науки о Земле»;
- тем не менее, необходима разработка дополнительного критерия, позволяющего учитывать удобство работы обучающихся со сведениями, представленными на геопортале;
- целесообразно пересмотреть вес критерия, определяющего возможность создания новых цифровых слоев средствами геопортала, в сторону увеличения, так как именно

эта возможность позволяет обучающимся попробовать собственные силы в создании и моделировании геоданных «с нуля»; набравших одинаковое количество баллов, необходимо отдавать предпочтение тому, который предоставляет возможность создавать новые цифровые слои.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванова И. В. Исследование уровня и условий развития пространственного мышления студентов в рамках изучения картографии // Вестник Томского государственного педагогического университета. – 2016. – № 4 (169). – С. 53–58.
2. Иванова И. В. Развитие пространственного мышления студентов посредством картографической визуализации // Царскосельские чтения. – 2014. – Т. II, № XVIII. – С. 47–50.
3. Комиссарова Т. С. Формирование пространственного мышления картографическим методом обучения // Царскосельские чтения. – 2010. – Т. II, № XIV. – С. 264–267.
4. Василенко А. В. Психолого-педагогические условия развития пространственного мышления учащихся // Наука и школа. – 2013. – №. 4. – С. 69–72.
5. Cartographic Design Process: Artistic Interpretation With the Geodatabase // An ESRI White Paper, July 2004.
6. Guo H., Goodchild M. F., Annoni A. Manual of Digital Earth. – Singapore : Springer, 2020 – 852 p.
7. Воробьева Т. А. Информационно-картографическое обеспечение принятия решений в управлении природопользованием // Материалы Международной научно-практической конференции «Рациональное природопользование : традиции и инновации» (Москва, 23–24 ноября 2012 г.). – М. : Изд-во МГУ, 2013. – С. 37–40.
8. Комедчиков Н. Н. и др. Картография для всех и каждого: итоги XXIII Международной картографической конференции и XIV Генеральной ассамблеи Международной картографической ассоциации // Изв. РАН. – 2008. – № 4. – С. 133–141.
9. Лисицкий Д. В. Перспективы развития картографии: от системы «Цифровая земля» к системе виртуальной геореальности // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 2 (22). – С. 8–16.
10. Николаева О. Н. Алгоритмизация картографо-оформительских процессов при интерактивном создании картографических произведений для широкого круга пользователей // Современные тенденции развития науки и технологий : сб. науч. тр. по материалам VIII Междунар. научно-практ. конф., 30 нояб. 2015 г. / Под общ. ред. Е. П. Ткачевой. – Белгород : ИП Ткачева Е. П., 2015. – № 8, ч. 1. – С. 65–69.
11. Николаева О. Н. Об интеграции ДДЗ в ГИС для формализованной инвентаризации природно-ресурсных характеристик региона // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 2. – С. 39–44.
12. Лурье И. К. Инновации в картографии – от Ломоносова к современности // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2011. – № 5. – С. 55–60.
13. Кошкарев А. В. Геопортал как инструмент управления пространственными данными и геосервисами // Управление развитием территории. – 2008. – № 2. – С. 28–30.
14. Бешенцев А. Н. Геоинформационные ресурсы: особенности, классификация, размещение // Информационные ресурсы России. – 2015. – № 4. – С. 21–26.
15. Геопорталы России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gisgeo.org/catalogue/geoportals.html>.
16. Кошкарев А. В., Ротанова И. Н. Российские научно-образовательные и отраслевые геопорталы как элементы инфраструктуры пространственных данных // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. – 2014. – Т. 12, №. 4. – С. 38–52.

Получено 01.09.2020

© Л. К. Трубина, О. Н. Николаева, Е. И. Баранова, 2020

THE USAGE OF ONLINE MAP SERVICES IN EXPANDING OF PROFESSIONAL SKILLS WHEN TRAINING IN EARTH SCIENCE

Lyudmila K. Trubina

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Department of Ecology and Environmental Management, phone: (383)361-06-86, e-mail: trubinalk@rambler.ru

Olga N. Nikolaeva

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Institute of Amelioration, Water Management and Construction named after A. N. Kostyakov, 49, Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russia, Professor, Department of Environmental Safety and Natural Resources Management; phone: (499)976-09-37; Siberian State University of Geosystems and Technology, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Professor, Department of Ecology and Natural Resources Management, e-mail: onixx76@mail.ru

Yevgeniya I. Baranova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Associate Professor, Department of Ecology and Environmental Management, phone: (383)361-06-86, e-mail: evg.dxn@yandex.ru

The article discusses the possibilities of using geoportals as the main source of open digital cartographic data for the development of spatial thinking and skills among students. Insufficient attention is paid to the development of spatial thinking skills among students. Definition of the concept "geoportal" is given. An analysis of a number of regional geoportals in terms of their content with spatially distributed natural resource data is made as well as the variety of tools provided for working with these data. Conclusions about geoportal recommended for use by students to consolidate their skills in working with geospatial data are made.

Keywords: geospatial data, spatial thinking, students, professional skills, online map services, geoportal, digital maps

REFERENCES

1. Ivanova, I. V. (2016). The investigation of level and conditions of spatial thinking developing in terms of cartography teaching. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta [TSPU Bulletin]*, 4(169), 53–58 [in Russian].
2. Ivanova, I. V. (2016). The development of spatial thinking of students through cartographic visualization. *Tsarskosel'skie chteniya [Tsarskoye Selo Readings]*, II(XVIII), 47–50 [in Russian].
3. Komissarova, T. S. (2010). Formation of spatial thinking by the cartographic teaching method. *Tsarskosel'skie chteniya [Tsarskoye Selo Readings]*, II(XIV), 264–267 [in Russian].
4. Vasilenko, A. V. (2013). Psychological and pedagogical conditions for the development of spatial thinking of students. *Nauka i shkola [Science and School]*, 4, 69–72 [in Russian].
5. Cartographic Design Process: Artistic Interpretation With the Geodatabase. (July, 2004). *An ESRI White Paper*.
6. Guo, H., Goodchild, M. F., & Annoni, A. (2020). *Manual of Digital Earth*. Singapore: Springer, 852 p.
7. Vorobyova, T. A. (2013). Information-cartographic support for decision-making in environmental management. In *Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Ratsional'noe prirodopol'zovanie: traditsii i innovatsii" [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Environmental Management: Traditions and Innovations"]* (pp. 37–40). Moscow: Moscow State University Publ. [in Russian].
8. Komedchikov, N. N., & et al. (2008). Cartography for everyone: the results of the XXIII International Cartographic Conference and the XIV General Assembly of the International Cartographic Association. *Izvestiya RAN [Bulletin of the Russian Academy of Sciences]*, 4, 133–141 [in Russian].
9. Lisitsky, D. V. (2013). Prospects for the development of cartography: from the Digital Earth system to the virtual georeality system. *Vestnik SGGU [Vestnik SSGA]*, 2(22), 8–16 [in Russian].

10. Nikolaeva O. N. (2015). Algorithmization of cartographic and design processes during the interactive creation of cartographic works for a wide range of users. In *Sbornik nauchnykh trudov po materialam VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: no. 8, ch. 1. Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii [Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference: No. 8, Part 1. Modern Trends in the Development of Science and Technology]* (pp. 65–69). E. P. Tkacheva (Ed.). Belgorod: IP Tkacheva E. P. Publ. [in Russian].
11. Nikolaeva, O. N. (2012). On the integration of remote sensing data in GIS for a formalized inventory of the natural-resource characteristics of the region. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2012: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Distantionnye metody zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchey sredy, geoekologiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: International Scientific Conference: Vol. 2. Remote Sensing Methods of the Earth and Photogrammetry, Environmental Monitoring, Geoecology]* (pp. 39–44). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
12. Lurie, I. K. (2011). Innovation in cartography – from Lomonosov to the present. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya [Moscow University Physics Bulletin. Series 5. Geography]*, 5, 55–60 [in Russian].
13. Koshkarev, A. V. (2008). Geoportal as a tool for managing spatial data and geoservices. *Upravlenie razvitiem territorii [Territorial Development Management]*, 2, 28–30 [in Russian].
14. Beshentsev, A. N. (2015). Geoinformation resources: features, classification, placement. *Informatsionnye resursy Rossii [Information Resources of Russia]*, 4, 21–26 [in Russian].
15. Geoportals of Russia (n. d.). Retrieved from <http://gisgeo.org/catalogue/geoportals.html> [in Russian].
16. Koshkarev, A. V., & Rotanova, I. N. (2014). Russian scientific, educational and industrial geoportals as elements of the spatial data infrastructure. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Informatsionnye tekhnologii [Bulletin of Novosibirsk State University. Series: Information Technology]*, 12(4), 38–52 [in Russian].

Received 01.09.2020

© L. K. Trubina, O. N. Nikolaeva, Y. I. Baranova, 2020

ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО, КАДАСТР И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ

УДК 528.44:004.9

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-152-158

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ГЕОДЕЗИЧЕСКОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ 3D-КАДАСТРА

Евгений Ильич Аврунев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент, директор Института кадастра и природопользования, тел. (383)344-31-73, e-mail: kadastr-204@yandex.ru

Артур Ильгизович Гиниятов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры кадастра и территориального планирования, тел. (383)344-31-73, e-mail: ita1095@mail.ru

В работе рассмотрен авторский подход к формированию геодезического обеспечения 3D-кадастра. В рамках подхода предложено данный производственный процесс представить двумя технологическими операциями: построением геодезического обоснования в кадастровом квартале для координирования внешнего контура объекта капитального строительства (ОКС) и 3D-моделированием его внутренних элементов (помещений). Для реализации указанных технологических процедур предложена нормативная база выполнения геодезических измерений, система координат для внесения необходимой информации в Единый государственный реестр недвижимости и выполнения 3D-моделирования структурных элементов ОКС. Отмечено, что при реализации предложенных технологических решений подготавливаемый кадастровым инженером технический план можно рассматривать не только как документ, позволяющий поставить на государственный кадастровый учет ОКС и его структурные элементы, но и как нормативно-правовой документ, определяющий соответствие возведенного здания своим проектным параметрам.

Ключевые слова: 3D-кадастр, 3D-модель, объекты недвижимости, объект капитального строительства, Единый государственный реестр недвижимости, государственный кадастровый учет, характерная точка, координаты, средняя квадратическая ошибка, нормативная точность

Введение

В последнее десятилетие характерной особенностью развития Единого государственного реестра недвижимости (ЕГРН) и его методического обеспечения в Российской Федерации являются постоянно расширяющиеся, как по объемам, так и по существу рассматриваемых вопросов, исследования и научно-технологические разработки в области создания и ведения трехмерного кадастра (3D-кадастра). Информационно-аналитический обзор научно-технических публикаций по со-

временному состоянию проблемы создания и ведения 3D-кадастра позволил сделать следующие, заслуживающие, на наш взгляд, особого внимания выводы [1–5]:

1) создание 3D-кадастра в условиях обширных территорий Российской Федерации предполагает большую трудоемкость выполняемых технологических операций и, соответственно, значительные финансовые затраты;

2) ведение 2D-кадастра и градостроительное проектирование, как правило, осуществляется в разных координатных системах, что в ряде случаев (при различном удалении осе-

вого меридиана от центральной части территориального образования) обуславливает систематические расхождения между проектными размерами ОКС и их значениями, полученными в результате координирования относительно исходных пунктов межевого съемочного обоснования (МСО) [5];

3) в нормативно-правовой литературе, регламентирующей требования к точности выполнения кадастровых работ, отсутствуют научно-обоснованные требования к средним квадратическим ошибкам (СКО) построения геодезического обоснования, которое необходимо при выполнении кадастровых работ для получения пространственных данных в отношении местоположения ОКС в соответствующем территориальном образовании.

Таким образом, на наш взгляд, основная проблематика создания и ведения 3D-кадастра на современном этапе развития геодезических измерительных технологий обусловлена отсутствием нормативных требований к точности определения пространственных данных при координировании объектов капитального строительства и применяемой при математической обработке результатов измерений координатной системы.

Решение этого важного научно-технического вопроса позволит создать единое геопространство территориального образования, необходимое для решения многочисленных задач для устойчивого развития территорий и наполнить ЕГРН достоверной и актуальной информацией о пространственном местоположении ОКС [6–10].

Методологические подходы к решению научно-технологической задачи

Исходя из обозначенных выше методологических подходов к проблеме формирования 3D-кадастра, сформулируем цель настоящей статьи: предложить научно-обоснованные нормативные требования к точности построения пространственного геодезического обоснования территориального образования и оптимальную систему координат для наиболее технологичного перевода существующего кадастра недвижимости в 3D-формат.

Для достижения поставленной цели предусматривается реализовать следующие методические подходы:

1) создание 3D-кадастра наименее трудоемко и наиболее технологично выполнять на основании существующего 2D-кадастра, в соответствии с нормативными требованиями, которые в настоящее время установлены действующими нормативно-правовыми документами. Следовательно, для координирования объектов недвижимости следует использовать местную плоскую прямоугольную систему координат, применяемую в настоящее время для ведения 2D-кадастра;

2) для устранения системных противоречий между результатами координирования при выполнении кадастровых работ в отношении ОКС и их проектными значениями, которые должны соответствовать размерам на физической поверхности Земли, целесообразно при выполнении 3D-моделирования использовать местную систему координат ОКС, привязанную к его основным осям и координатной системе территориального образования;

3) рассматривать кадастровый квартал как структурную единицу территориального образования, для которой необходимо установить свои научно-обоснованные нормативные требования на точность выполнения кадастровых работ.

Решение поставленной научно-технологической задачи

Исходя из предлагаемых концептуальных положений и целесообразности создания 3D-кадастра на основании существующей нормативно-правовой базы, представляется целесообразным поддержать предложения, сделанные в работе [11] об установке нормативного допуска в плановом положении на среднюю квадратическую ошибку (СКО) взаимного положения углов ОКС внутри кадастрового квартала $m_{\text{окс}} = 5$ см. Установление такого допуска, во-первых, позволит с заданной нормативной точностью ($m_{\text{зу}} = 10$ см) восстанавливать на местности утраченные границы земельных участков, а, во-вторых, сохранит плановую составляющую существующего кадастра для наиболее технологичного перевода его в формат 3D.

Отметим также, что технологичность перевода определяет целесообразность использования уже имеющейся плоской прямоугольной координатной системы территориального образования с добавлением третьей координаты – нормальной высоты H , для которой необходимо установить соответствующий нормативный допуск.

Установим нормативную точность определения высотной составляющей пространственной характеристики ОКС, исходя из принципа «изотропности» метрики создаваемого геопространства кадастрового квартала

$$m_{x,y} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} = m_H = 5 \text{ см.} \quad (1)$$

Следовательно, нормативная СКО пространственного положения характерных точек контуров ОКС внутри кадастрового квартала составляет

$$m_{\text{ОКС}} = \sqrt{m_{x,y}^2 + m_H^2} = \sqrt{5^2 \text{ см} + 5^2 \text{ см}} = 7,1 \text{ см.} \quad (2)$$

В соответствии с установленным нормативом (1) и (2) определим нормативные требования к точности построения внутри кадастрового квартала межевого съемочного обоснования

$$m_{\text{МСО}} = \frac{m_{\text{ОКС}}}{t} = \frac{\sqrt{m_{x,y}^2 + m_H^2}}{t} = \frac{\sqrt{5^2 \text{ см} + 5^2 \text{ см}}}{2} = 3,6 \text{ см.} \quad (3)$$

На основании информационно-аналитического обзора, выполненного по существующей нормативно-правовой базе составления технических планов и исполнительных съемок при приеме ОКС в эксплуатацию, точность геодезических измерений в зависимости от длины и ширины помещения составляет от 2 до 10 мм [12]. Таким образом, СКО определения параметров внутренних структурных элементов ОКС является более высокой по сравнению с внешним контуром, который координируется относительно исходных пунктов МСО.

Следовательно, использование при выполнении 3D-моделирования координатной системы ЕГРН приведет к искаженным результатам и не позволит оценивать соответ-

ствие параметров возведенного ОКС проектным значениям.

Выходом из создавшейся ситуации, по нашему мнению, является применение при 3D-моделировании здания условной системы координат ОКС, привязанной к координатной системе ЕГРН одной характерной точкой (ХТ), закоординированной относительно пунктов межевого съемочного обоснования.

Образование условной координатной системы ОКС предлагается осуществлять в результате совмещения координатных осей с его основными осями, а за начало системы координат принять ХТ ОКС, закоординированную относительно пунктов МСО. Принципиальная схема такого подхода приведена на рисунке.

Реализация такого подхода позволит решить следующие научно-технологические задачи:

1) возможность восстановления утраченных характерных точек, закрепляющих на местности границы земельного участка, на котором расположен ОКС, в системе координат ЕГРН;

2) определение реальных параметров ОКС и оценивание их отличий от проектных значений, что позволит делать обоснованное заключение о возможности введения в эксплуатацию построенного ОКС.

Определение аналитических координат внутренних структурных элементов ОКС целесообразно выполнять в соответствии со следующим алгоритмом:

1) для проверки гипотезы о соответствии ОКС прямоугольной или квадратной форме в системе координат ЕГРН $(x_1^{\text{ЕГРН}}, y_1^{\text{ЕГРН}}, H_1^{\text{ЕГРН}} \dots x_4^{\text{ЕГРН}}, y_4^{\text{ЕГРН}}, H_4^{\text{ЕГРН}})$ вычислить дирекционные углы всех сторон здания и углы между ними по следующим известным формулам геодезии (обратная геодезическая задача)

$$\begin{aligned} \alpha_{i,i+1} &= \arctg \frac{y_{i+1}^{\text{ЕГРН}} - y_i^{\text{ЕГРН}}}{x_{i+1}^{\text{ЕГРН}} - x_i^{\text{ЕГРН}}}; \\ \alpha_{i,i-1} &= \arctg \frac{y_{i-1}^{\text{ЕГРН}} - y_i^{\text{ЕГРН}}}{x_{i-1}^{\text{ЕГРН}} - x_i^{\text{ЕГРН}}}; \\ \beta_i &= \alpha_{i,i+1} - \alpha_{i,i-1}, \end{aligned} \quad (4)$$

где i – номер характерной точки ОКС;

2) принятие или непринятие гипотезы о соответствии построенного здания проектным параметрам выполняется на основании следующих статистических критериев (при условии нормального характера распределения случайных ошибок геодезических измерений)

$$90^{\circ}00'00'' - t \cdot m_{\beta} \leq \beta_i \leq 90^{\circ}00'00'' + t \cdot m_{\beta}; \quad (5)$$

$$L_{i,i+1}^{\text{проект}} - t \cdot m_L \leq L_{i,i+1}^{\text{изм}} \leq L_{i,i+1}^{\text{проект}} + t \cdot m_L,$$

где t – статистический коэффициент, зависящий от доверительной вероятности при построении доверительного интервала для оцениваемого параметра; m_{β} , m_L – соответственно точность вычисления параметра (углы между сторонами ОКС) и СКО измерения линейных параметров ОКС; L – измеренная длина линии между характерными точками, закрепляющими контур ОКС на местности;

3) выполнение статистических критериев (5) обуславливает принятие гипотезы о соответствии внешнего контура ОКС проектным значениям и возможность определения аналитических координат для 3D-моделирования его внутренних элементов;

4) образование условной системы координат осуществляется в результате совмещения координатных осей этой системы с основными осями инженерного сооружения (см. рисунок)

и принятия в качестве начала – ХТ (например, ХТ 1), с условными координатами $x_1 = 0,000$ м, $y_1 = 0,000$ м;

5) вычисление аналитических координат внутренних структурных элементов ОКС в такой координатной системе выполняется по следующим элементарным формулам:

$$\begin{aligned} x_{11}^{\text{пом}} &= a, & y_{11}^{\text{пом}} &= b; \\ x_{12}^{\text{пом}} &= a, & y_{12}^{\text{пом}} &= b + b_{11-12}; \\ x_{13}^{\text{пом}} &= a + a_{12-13}, & y_{13}^{\text{пом}} &= b + b_{11-12}; \\ x_{14}^{\text{пом}} &= a + a_{11-14}, & y_{14}^{\text{пом}} &= b + b_{11-12} - b_{13-14}, \end{aligned} \quad (6)$$

где a , b – проектные расстояния между основными и вспомогательными осями ОКС, $a_{i,i+1}$, $b_{i,i+1}$ – измеренные линейные параметры внутренних структурных элементов инженерного сооружения;

6) гипотеза о соответствии параметров помещения проектным характеристикам ОКС будет принята при выполнении следующих статистических критериев:

$$\begin{aligned} b_{i-(i+1)}^{\text{изм}} - b_{i-(i+1)}^{\text{проект}} &\leq t \cdot m_{\text{норм}}; \\ a_{i-(i+1)}^{\text{изм}} - a_{i-(i+1)}^{\text{проект}} &\leq t \cdot m_{\text{норм}}; \\ P^{\text{изм}} P^{\text{проект}} = a_{\text{ср}} \cdot b_{\text{ср}} - P^{\text{проект}} &\leq 0,05 \cdot P. \end{aligned} \quad (7)$$

Принципиальная схема определения пространственных характеристик ОКС для 3D-моделирования и внесения этих данных в ЕГРН:

a , b – проектные расстояния, определяющие расположение основных и дополнительных осей; a_{i-j} , b_{i-j} – измеренные параметры внутренних помещений ОКС; 11, 12, 13, 14 – характерные точки, определяющие параметры внутренних структурных элементов ОКС и его дополнительных осей; 1, 2, 3, 4 – характерные точки, определяющие расположение основных осей ОКС; I, II, III – пункты межевого съемочного обоснования

Выполнение статистических критериев (7) определяет возможность использования аналитических координат (6) в качестве исходного геодезического обоснования для 3D-моделирования внутренних структурных элементов ОКС.

Представляется целесообразным включить предложенные критерии в кадастровые работы, выполняемые при подготовке технического плана в отношении ОКС, который должен будет являться ключевым документом как при сдаче ОКС в эксплуатацию, так и при постановке объекта недвижимости на государственный кадастровый учет.

Выполнение этих нормативных требований позволит создавать геодезическое обоснование в кадастровом квартале и 3D-модели инженерных сооружений, соответствующие современным требованиям, предъявляемым для формирования 3D-кадастра.

Заключение

Реализация предложенных технологических решений позволит решить следующие задачи:

1) перевести существующий 2D-кадастр недвижимости в 3D-формат с минимальной трудоемкостью, что весьма актуально на современном этапе развития земельно-имущественных отношений;

2) использовать технический план, формируемый кадастровым инженером в отношении ОКС как независимый контроль при приеме в эксплуатацию построенного инженерного сооружения;

3) восстанавливать утраченные границы земельных участков вне зависимости от меняющихся систем координат и исходных пунктов геодезического обоснования, используемых при осуществлении кадастровых работ;

4) выбирать схемы построения МСО и используемое при этом измерительное технологическое оборудование для получения нормативной точности пространственного положения ОКС в кадастровом квартале соответствующего территориального образования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Создание модели трехмерного кадастра недвижимости в России. G2G10/RF/9/1. Заключительный отчет. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://portal.rosreestr.ru/wps/portal/cc_news?news_id=16202&news_line_id=11662.
2. Чернов А. В. Разработка и исследование методики формирования трехмерного кадастра недвижимости : дисс. ... канд. техн. наук. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – 159 с.
3. Аврунев Е. И., Гиниятов А. И. Современное состояние и проблемы геодезического обеспечения создания и ведения трехмерного кадастра недвижимости [Электронный ресурс] : Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения : сб. материалов III Национальной научно-практической конференции, 27–29 ноября 2019 г. – Новосибирск : СГУГиТ. – Режим доступа: <http://nir.sgugit.ru/elektronnye-publikatsii-noyab19/>.
4. Vandyшева N., Tikhonov V., Van Oosterom P., Stoter J., Ploger H., Wouters R., Penkov V. 3D Cadastre Modelling in Russia // FIG Working Week 2011. Bridging the Gap between Cultures (18–22 May, 2011). – Marrakech, Morocco [Electronic resource]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/241886547_3D_Cadastre_modelling_in_Russia.
5. Аврунев Е. И., Чернов А. В., Дубровский А. В., Комиссаров А. В., Пасечник Е. Ю. Технологические аспекты построения 3D-модели инженерных сооружений в городах Арктического региона РФ // Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 7. – С. 131–137.
6. Аврунев Е. И. Геодезическое обеспечение государственного кадастра недвижимости : монография. – Новосибирск : СГГА, 2010. – 144 с.
7. Карпик А. П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий : монография. – Новосибирск : СГГА, 2004. – 260 с.
8. Карпик А. П., Лисицкий Д. В. Электронное геопространство – сущность и концептуальные основы // Геодезия и картография. – 2009. – № 5. – С. 41–44.

9. Карпик А. П., Хорошилов В. С. Сущность геоинформационного пространства территорий как единой основы развития государственного кадастра недвижимости // Изв. вузов. Геодезия и аэрофото-съемка. – 2012. – № 1. – С. 134–136.

10. Карпик А. П. Системная связь устойчивого развития территорий с его геодезическим информационным обеспечением // Вестник СГГА. – 2010. – Вып. 1 (12). – С. 3–11.

11. Метелева М. В. Разработка и исследование методики координатного обеспечения кадастровой деятельности в территориальных образованиях : дисс. ... канд. техн. наук. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 150 с.

12. ГОСТ 21779-82 (СТ СЭВ 2681-80). Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Технологические допуски [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

Получено 25.09.2020

© Е. И. Аврунев, А. И. Гиниятов, 2020

CONCEPTUAL APPROACH TO GEODETIC SUPPORT FOR 3D CADASTRE

Evgeny I. Avrunev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Director, Institute of Cadastre and Environmental Management, phone: (383)344-31-73, e-mail: kadastr204@yandex.ru

Artur I. Giniyatov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, Department of Cadastre and Territorial Planning, phone: (383)344-31-73, e-mail: ita1095@mail.ru

The article considers the approach to 3D cadastre geodetic control creation. Within the framework of this approach it is suggested to present the given production process by two technological operations: creation of geodetic control network in cadastral block to coordinate the external contour of capital construction object (CCO) and 3D modeling of its internal elements (premises). To implement these technological procedures, a regulatory framework for performing geodetic measurements and a coordinate system for entering the necessary information in the unified state register of real estate (USRRE) and performing 3D modeling of the structural elements of the CCO is proposed. It is noted that when implementing the proposed technological solutions, the technical plan prepared by the cadastral engineer can be considered not only as a document that allows the state cadastral registration of the ACS and its structural elements, but also as a regulatory document that determines the compliance of the erected building with its design parameters.

Keywords: 3D cadastre, 3D model, real estate objects, capital construction object, unified state register of real estate, state cadastral registration, characteristic point, coordinates, average square error, standard accuracy

REFERENCES

1. Creating a model of a three-dimensional real estate cadastre in Russia. G2G10 / RF/9/1. Final report. (n. d.). Retrieved from https://portal.rosreestr.ru/wps/portal/cc_news?news_id=16202&news_line_id=11662 [in Russian].
2. Chernov, A. V. (2018). Development and research of methods for forming a three-dimensional real estate cadastre. *Extended abstract of candidate's thesis*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 159 p. [in Russian].
3. Avrunev, E. I., Giniyatov, A. I. (2019). Current state and problems of geodetic support for creating and maintaining a three-dimensional real estate cadastre. In *Sbornik materialov 3-y Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Regulirovanie zemel'no-imushchestvennykh otnosheniy v Rossii: pravovoe i geoprostranstvennoe obespechenie, otsenka nedvizhimosti, ekologiya, tekhnologicheskie resheniya* [Proceedings of the 3rd National Scientific and Practical Conference, Regulation of Land and Property Relations in Russia: Legal and Geospatial Support, Real Estate Assessment, Ecology, Technological Solutions]. Novosibirsk: SSUGT Publ. Retrieved from <http://nir.sgugit.ru/elektronnye-publikatsii-noyab19/> [in Russian].

4. Vandysheva, N., Tikhonov, V., Van Oosterom, P., Stoter, J., Ploger, H., Wouters, R., & Penkov, V. (2011). 3D Cadastre Modelling in Russia. *FIG Working Week 2011 Bridging the Gap between Cultures*, 18–22 May, 2011. Marrakech, Morocco. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/241886547_3D_Cadastre_modelling_in_Russia.
5. Avrunev, E. I., Chernov, A. V., Dubrovsky, A. V., Komissarov, A. V., & Pasechnik, E. Yu. (2018). Technological aspects of building a 3D model of engineering structures in the cities of the Arctic region of the Russian Federation. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Proceedings of Tomsk Polytechnic University]*, 329(7), 131–137 [in Russian].
6. Avrunev, E. I. (2010). *Geodezicheskoe obespechenie Gosudarstvennogo kadastra nedvizhimosti [Geodesic support of the State real estate cadastre]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 144 p. [in Russian].
7. Karpik, A. P. (2004). *Metodologicheskie i tekhnologicheskie osnovy geoinformatsionnogo obespecheniya territoriy [Engineering of georesources [Methodological and technological foundations of GIS software territories]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 260 p. [in Russian].
8. Karpik, A. P., & Lisitsky, D. V. (2009). Electronic geospatial-the essence and conceptual foundations. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 5, 41–44 [in Russian].
9. Karpik, A. P., & Khoroshilov V. S. (2012). The essence of the geographic information space of territories as a single basis for the development of the state real estate cadastre. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 1, 134–136 [in Russian].
10. Karpik, A. P. (2010). System connection sustainable development of the territories with his geodesic information security. *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 1(12), 3–11 [in Russian].
11. Meteleva, M. V. (2015). Development and research of methods of coordinate support of cadastral activity in territorial formations. *Extended abstract of candidate's thesis*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 150 p. [in Russian].
12. GOST 21779-82 (ST CMEA 2681-80). System for ensuring the accuracy of geometric parameters in construction. Technological tolerances. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].

Received 25.09.2020

© E. I. Avrunev, A. I. Giniyatov, 2020

УДК 622.013.37+[622.85:504.064]
DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-159-171

ПОВЫШЕНИЕ БИОГЕННОСТИ ТЕХНОГРУНТОВ ПРИ СОЗДАНИИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА КАК СПОСОБА КОНСЕРВАЦИИ ХВОСТОХРАНИЛИЩ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

Тамара Тимофеевна Горбачева

Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ «Кольский научный центр РАН», 184209, Россия, г. Апатиты, мкр. Академгородок, 14а, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии промышленного производства, тел. (815)557-93-37, e-mail: podzol_gorby@mail.ru

Любовь Андреевна Иванова

Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина, Кольский научный центр РАН, 184256, Россия, г. Кировск, ул. Ботанический сад, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: ivanova_la@inbox.ru

Анжела Владимировна Румянцева

Череповецкий государственный университет, 162600, Россия, г. Череповец, проспект Луначарского, 5, кандидат биологических наук, доцент, e-mail: a-v-rum@yandex.ru

Виктория Вячеславовна Максимова

ФИЦ «Кольский научный центр» РАН, 184209, Россия, г. Апатиты, мкр. Академгородок, 14а, младший научный сотрудник лаборатории природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики, e-mail: fourthmax@mail.ru

В статье проведен обзор отечественной и международной практики применения муниципальных стоков в качестве нетрадиционного химического мелиоранта с удобрительным эффектом на полях орошения, в гидропонных системах, а также отвалах вскрышных пород и отходов рудобогащения при проведении на них рекультивационных мероприятий. Объектом исследований являлись отходы рудобогащения («хвосты») апатит-нефелиновой фабрики АНОФ-2 КФ АО «Апатит» с преобладанием в их составе нефелиновых песков. Хвостохранилище включено в перечень объектов накопленного экологического ущерба в регионе, но благодаря богатому минеральному составу признается техногенным месторождением, подлежащим консервации для получения в перспективе апатитового, нефелинового, сфенового, эгиринового и титаномагнетитового концентратов. Целью данной работы являлась оценка эффективности и пролонгированного действия химической мелиорации нефелиновых песков осветленными коммунальными стоками (ОКС) для повышения биогенности (НРК-статуса) техногрунта при создании растительного покрова как способа консервации хвостохранилища. В работе применен метод фитотестирования грунта, орошаемого ОКС регионального предприятия ВКХ, на одновидовом посевном материале, рекомендованном для рекультивации нарушенных территорий северных регионов. При формировании на нефелиновых песках сеянного фитоценоза из тимофеевки луговой (*Phleum pratense* L.) подтвержден стимулирующий эффект ОКС на питательный режим грунта. После фитозэкстракции (по окончании эксперимента) в нем сохраняется высокий остаточный уровень содержания основных питательных элементов (N, P, K), что свидетельствует о пролонгированном действии ОКС. Для подтверждения эффекта, полученного в лабораторных условиях, на резервном хвостохранилище АНОФ-2 в 2019 г. заложен полевой эксперимент, наблюдения продолжаются. Орошение нефелиновых песков осветленными коммунальными стоками в суммарной норме 380 т/га при соблюдении условий многократного равномерного распределения поливочной воды по площади имеет пролонгированный эффект на питательный режим грунта и достаточно для создания устойчивого растительного покрова из тимофеевки луговой на отходах рудобогащения без землевания.

Ключевые слова: отходы обогащения апатит-нефелиновых руд, азот, фосфор, калий, осветленные коммунальные стоки, нетрадиционный мелиорант, лимонная кислота, подвижные формы, доступность для растений, тимофеевка луговая *Phleum pratense* L.

Введение

Активная эксплуатация месторождений полезных ископаемых Мурманской области способствовала формированию на ее территории обширных хвостохранилищ, признающихся в регионе объектами накопленного экологического ущерба [1]. Так, в Государственный реестр объектов размещения отходов (ОРО) под номером 51-00009-3-00479-010814 включено хвостохранилище апатит-нефелиновой обогатительной фабрики КФ АО «Апатит», а основным назначением ОРО обозначено захоронение. Однако результаты технологических изысканий, обобщенные в работе [2], продемонстрировали возможность получения из отходов рудообогащения КФ АО «Апатит» качественных концентратов: апатитового, нефелинового, сфенового, эгиринового и титаномagnetитового. Отсюда все существующие хвостохранилища АО «Апатит» могут рассматриваться как техногенные месторождения, потенциально пригодные для промышленной переработки в будущем, а потому подлежащие максимальному сохранению при ликвидации хвостохранилищ как гидротехнических сооружений.

Использование техногенных месторождений, полигонов отходов недропользования и восстановление нарушенных экосистем (почв, растительного покрова) являются одними из основных направлений инновационного развития недродобывающего комплекса РФ [3]. На основе концепции внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) в области восстановления земель, нарушенных деятельностью горнопромышленных предприятий, выделено консервационное направление их рекультивации [4]. С 1964 по 1984 г. Кольским филиалом АН СССР проводилась активная наработка опыта по рекультивации и последующей консервации хвостохранилища АНОФ-1 комбината «Апатит» (близ г. Кировска). Поскольку валовой анализ нефелиновых песков свидетельствовал о благоприятных предпосылках для выращивания растений, то перспективным направлением в те годы признавалось залужение тела хвостохранилища не только для предотвращения его ветровой и водной эрозии, но и в целях создания

продуктивных сельскохозяйственных угодий на обработанной территории [5]. Результаты исследований эволюции техногенных ландшафтов законсервированных и ныне функционирующих хвостохранилищ КФ АО «Апатит», а также трансформации почв сельскохозяйственных угодий, созданных на нефелиновых песках, отражены в работе [6]. Авторами выданы рекомендации по созданию устойчивого растительного покрова на нарушенных территориях в зависимости от состава песков, характера рельефа, условий увлажнения грунта. В частности, относительно направления химической мелиорации нефелиновых песков показано, что из-за высокой подвижности калия в нефелиновых песках подкормка растений калийными удобрениями не требуется. Отсутствие в хвостах органического вещества биогенного происхождения и связанного с ним азота признано причиной неизбежности ежегодного внесения азотных удобрений в рекультивируемый грунт. Фосфор в песках находится в составе остаточного апатита в формах, слабо доступных для растений, поэтому приведены доводы о невозможности развития фитоценоза без дополнительных инвестиций минеральных фосфорных удобрений. Нами сделано предположение, что одной из мер создания и поддержания устойчивости растительного покрова на хвостохранилищах может являться их поверхностное орошение стоками регионального предприятия водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ). Метод является разновидностью химической мелиорации, направленной прежде всего на повышение биогенности грунта. Этот параметр определяется наличием в стоках органического вещества, легкодоступного для микробиоты, а также лабильностью азота, фосфора и калия, обуславливающей их ассимиляцию растениями.

Применение муниципальных сточных вод для выращивания растений с различной целевой направленностью (заготовка и переработка кормовых и технических культур, овощеводство, садоводство) признано международной практикой эффективным и экономически целесообразным еще в прошлом столетии, что обусловлено многокомпонентным составом стоков с соотношением макро-

и микроэлементов, благоприятным для удобри-тельных поливов [7]. В настоящее время особый акцент делается на пригодность таких стоков для орошения как источников азота и фосфора, легкодоступных для растений [8]. Немаловажным фактором является благоприятное влияние стоков на повышение биологической активности почв/грунтов орошаемых территорий, связанное с высоким содержанием лабильных форм органического вещества, особенно микробного происхождения [9]. Следует подчеркнуть, что во всем мире уделяется пристальное внимание оценке риска применения коммунальных стоков в системах поверхностного и внутрипочвенного орошения, а также в гидропонных установках, при этом проблема экологической безопасности в большинстве стран успешно решена [10, 11]. Тем не менее, в большинстве развивающихся стран продолжается использование коммунальных стоков либо вообще без предварительной очистки, либо не полностью доведенных до санитарно-гигиенических нормативов. Согласно оценке, приведенной в [12], площадь сельскохозяйственных полей, орошаемых такими стоками, достигает в мире 3,5 млн га.

В последние годы существенно расширяется область применения коммунальных стоков в горной промышленности, главным образом на месторождениях сульфидных руд [13, 14]. Повышенное внимание к таким водам связано с их высокой кислотонейтрализующей и комплексообразующей способностью, и смешение с ними высокоагрессивных дренажных вод позволяет существенно снизить экологическую опасность побочных продуктов добычи в местах разработки руд цветных металлов. Патентный поиск показал, что и в отечественной практике предлагалось внедрение технологий орошения нарушенных территорий хозяйственно-бытовыми стоками [15]. При этом основным направлением признавалась активизация почвообразовательных процессов для эффективного задержания территорий, нарушенных золоотвалами и хвостохранилищами, однако широкого распространения в РФ такой способ не получил. Обзор международного опыта показал, что аналогами объектов для изучения процессов взаимодействия коммунальных

стоков с песчаными грунтами хвостохранилищ могут являться медленные песчаные фильтры (SSF – «slow sand filters»). Модернизация таких объектов для эффективного применения в третичной очистке (доочистке) как в централизованных, так и в децентрализованных системах водоотведения выходит в настоящее время на новый технологический уровень, в том числе в северных регионах [16]. Весьма широко SSF-системы начинают применяться и в современных системах сбора и очистки дождевых вод для доведения их качества до нормативов питьевого водоснабжения, в частности, по микробиологическим показателям [17].

Известно, что в силу продолжающегося применения устаревших технологий на большинстве предприятий ВКХ РФ средней мощности отсутствует стадия доочистки осветленных коммунальных стоков (ОКС) от азота и фосфора до уровня НДС, обеспечиваемого внедрением НДТ водоотведения [18]. В такой ситуации в водоприемники, зачастую являющиеся одновременно и источниками питьевого водоснабжения, сбрасываются загрязненные стоки, что повышает биогенную нагрузку на водоемы. Одним из таких предприятий ВКХ является АО «Апатитыводоканал». Сброс «проблемных» стоков КОС-3 предприятия производится в озеро Имандра – крупнейшее водохранилище Мурманской области, экосистема которого весьма уязвима к изменению ее трофического статуса [19]. При этом при сбросах, помимо загрязнения водоема, безвозвратно теряются и все ценные компоненты, остающиеся в стоках предприятия после недостаточной очистки. КОС-3 территориально примыкают к резервному хвостохранилищу КФ АО «Апатит», с 2006 г. являющегося модельным объектом для отработки методов рекультивации нефелиновых песков без землевания – на основе применения инновационных технологий и химической мелиорации с применением отходов производства и потребления [20]. Целью данной работы являлось продолжение работ по оценке эффективности химической мелиорации нефелиновых песков для повышения их биогенности и подтверждение пролонгированного мелиоративного действия ОКС на

питательный режим техногрунтов при рекультивации нарушенных территорий.

Материалы и методы

Объектом исследований являлись нефелиновые пески, отобранные на хвостохранилище АНОФ-2 АО «Апатит» в виде усредненной пробы лежалых хвостов. По гранулометрическому составу грунт относится к песчаной фракции, результаты его валового анализа приведены в работе [21]. Общее содержание калия в исходном грунте (в пересчете из оксидной формы) составляет 41 500 мг/кг, фосфора – 5 276 мг/кг. Определение общего азота в работе [21] не проводилось, но существующий пробел восполнен в данной работе.

Техногенный грунт массой 340 г помещали в пластиковые емкости слоем 3 см, на поверхность наносили семена тимopheевки луговой (*Phleum pratense* L.) производства ООО «Нестор» (г. Шушары, Ленинградская область, урожай 2018 г.). Норма высева семян составляла 66 г/м². Опыт был заложен в трех вариантах: (1) – контрольный, орошение дождевой водой на протяжении всего эксперимента ($n = 5$); (2) – однократное орошение ОКС в начале эксперимента, затем – только дождевой водой ($n = 5$); (3) – орошение только ОКС в течение всего эксперимента ($n = 5$). Дождевая вода собиралась в специальную емкость до начала эксперимента. Орошение грунта и ОКС, и дождевой водой осуществлялось без их предварительной фильтрации, что предполагает наличие в них взвесей (в ОКС до 68 мг/л, табл. 1). Коммунальные стоки для орошения отбирались после первичных отстойников – на промежуточной стадии водоочистки, осуществляемой на региональных канализационных очистных сооружениях (КОС) средней мощности (26 тыс. м³ в сутки). КОС-3 расположены в промышленной зоне г. Апатиты в непосредственной близости к резервному хвостохранилищу АНОФ-2 КФ АО «Апатит». Химический состав ОКС, использованных для орошения, приведен в табл. 1. Данные производственного мониторинга указывают на высокое содержание в стоках питательных элементов (К, Са, Mg, Р, аммонийного N) в водорастворимых формах, доступных для расте-

ний. Относительно высокие значения ХПК и БПК₅ стоков позволяют предполагать инокуляцию нефелиновых песков после их орошения стоками, сопровождающуюся повышением биогенности таких техногрунтов за счет роста микробиологической активности [9]. Такое же предположение мы считаем обоснованным и в отношении дождевой воды – в связи с наличием в ней взвешенных частиц, признающимися основными источниками микробиологического загрязнения атмосферных выпадений.

Таблица 1

Химический состав ОКС*

Параметр	Ед. измерения	Значение
рН	-	7,63
Взвешенные вещества	мг/л	67,6
Сухой остаток	мг/л	290
ХПК	мгО ₂ /л	223,7
БПК ₅	мгО ₂ /л	117,7
NH ₄ ⁺	мг/л	25,74
NO ₂ ⁻	мг/л	0,14
NO ₃ ⁻	мг/л	0,30
Cl ⁻	мг/л	31,31
P-PO ₄ ³⁻	мг/л	1,83
SO ₄ ²⁻	мг/л	32,26
К	мг/л	7,50
Na	мг/л	30,0
Са	мг/л	14,5
Mg	мг/л	3,52
Fe	мг/л	1,29

* по данным Испытательного центра качества вод АО «Апатитводоканал», аттестат аккредитации № РОСС RU. 0001.514427.

Лабораторные опыты проводились параллельно для всех вариантов в период с 03.09 по 13.10.2018 в одинаковых условиях, общая продолжительность эксперимента – 40 дней. Последовательность орошения грунта ОКС либо дождевой водой следующая: при закладке опыта 40 мл на емкость, затем через каждые три дня по 35 мл на емкость. Суммарная норма орошения за весь период эксперимента составила 38 л/м² (380 т/га). Интенсивность освещения в период проведения эксперимента составляла в пасмурные дни 6, в солнечные – 20 кЛк, температура воздуха в поме-

щении не превышала 22–23 °С, влажность воздуха – 60 %. Дополнительная подкормка растений минеральными удобрениями в ходе эксперимента не проводилась. Результаты фенологических наблюдений, полученные в данном исследовании, приведены в работе [22], где показано, что последствием многократного поверхностного орошения нефелиновых песков ОКС явилось двукратное превышение зеленой биомассы относительно контрольного варианта (с орошением грунта дождевой водой в тех же нормах).

По окончании опытов наземная биомасса растений полностью срезалась, высушивалась до воздушно-сухого состояния и размалывалась. Далее навеска наземной части растительного материала (около 1 г) переводилась в азотнокислую вытяжку в открытой системе мокрого озоления (установка Gerhard (Germany)) с применением концентрированной HNO_3 . Содержание калия в профильтрованной вытяжке определялось методом атомно-эмиссионной спектроскопии, фосфора – фотоколориметрическим методом Лоури – Лопеса по интенсивности синей окраски восстановленного фосфорно-молибденового комплекса (восстановитель – аскорбиновая кислота). Валовое содержание азота в растительном материале определялось методом Кьельдаля после озоления навески в концентрированной серной кислоте в присутствии катализатора ($\text{K}_2\text{SO}_4 + \text{CuSO}_4$). Этот же метод использовался для определения общего азота в исходном грунте и остаточного содержания N в навеске по окончании эксперимента.

Техногрунт перед проведением анализов доводился до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре, после чего из него тщательным образом удалялись остатки растительного материала. Анализ на остаточное содержание доступных форм К и Р проводился после просеивания грунта через сито 2 мм. Далее по аналогии с почвенными анализами готовилась вытяжка грунта с применением аммонийно-ацетатного буфера (рН = 4,65, при соотношении «грунт : буферный раствор» 1 : 10) [23]. Содержание элемента в аммонийно-ацетатной вытяжке с таким значением рН характеризует уровень его доступности для растений [24]. Содержание

калия в профильтрованной вытяжке определялось методом атомно-эмиссионной спектроскопии, фосфора – фотоколориметрическим методом Ватанабэ по интенсивности синей окраски восстановленного фосфорно-молибденового комплекса (восстановитель – аскорбиновая кислота).

Пролонгированность действия удобрительных поливов на питательный режим нефелиновых песков оценивалась путем сопоставления результатов остаточного содержания доступных форм К и Р по окончании эксперимента с их подвижностью в лимоннокислой вытяжке исходного грунта (0,01 М раствор лимонной кислоты, соотношение 1 : 10). Выбор лимонной кислоты в качестве экстрагента обусловлен ее доминированием в составе фракции органических кислот почвенных растворов под посевными культурами [25]. К навеске 25 г грунта добавлялось 250 мл 0,01 М раствора лимонной кислоты. В течение 6 часов проводилось непрерывное перемешивание смеси на магнитной мешалке ES-6120 (ЭКРОС) при температуре 20 °С, после чего полученная суспензия фильтровалась через двойной фильтр «синяя лента». Химический анализ фильтрата на содержание калия и фосфора проводился методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (Elan 9000). Результаты анализов грунта и растений выражались в мг/кг с пересчетом на абсолютно-сухую массу, для чего в отдельной навеске каждой пробы определялся коэффициент гигроскопической влажности. При обработке результатов экспериментов использовались методы описательной и сравнительной статистики (One-Way ANOVA, анализ данных в программе Microsoft Excel).

Результаты и обсуждение

1. Биогенность техногенного грунта **Общий азот**

Считается, что нефелиновые пески лишены органического вещества биогенного происхождения и связанного с ним азота [6]. Однако в ходе химического анализа исходного грунта нами определено низкое, но не нулевое среднее содержание ($n = 3$) в нем азота, а именно 9,77 мг/кг. Это можно объяснить остаточным

содержанием в грунте азотсодержащих флотагентов и возможной азотфиксацией в поверхностном слое лежалых грунтов. Установлено, что отходы рудообогатения, выходящие с АНОФ-2, содержат как сапротрофные бактерии, использующие азот органических соединений, так и бактерии, утилизирующие минеральный азот [26]. В этой же работе отмечено возрастание численности микроорганизмов в самом технологическом процессе переработки руды, условия которого способствуют размножению бактерий. Согласно [6] техногенный грунт хвостохранилища содержит микроорганизмы (бактерии, грибы), суммарная биомасса которых достигает в среднем 37 мг/кг субстрата в свеженамытых хвостах и 56 мг/кг в лежалых отходах. В работе [27] на хвостохранилище АНОФ-2 отмечено образование поверхностной криптогамной корки, содержащей

цианопрокариоты, являющиеся основными азотфиксаторами, повышающими азотный пул складированных песков.

Следует отметить, что и без химической мелиорации с применением ОКС отмечен высокий азотный пул техногенного грунта после изъятия биомассы. Так, в контрольном варианте остаточный уровень Нобщ в грунте в 11 раз превысил исходное содержание (табл. 2), что невозможно связать только с привнесением азота в составе дождевой воды. В свою очередь, при вычислении нами массовых потоков N с учетом его изъятия зеленой биомассой выяснилось, что вынос азота растениями существенно выше его поступления с ОКС, даже с учетом возможного содержания в них органических форм азота, не принимающихся во внимание в ходе производственного мониторинга состава стоков.

Таблица 2

Остаточное содержание N, P, K в техногенном грунте по окончании эксперимента

Повторность опыта	Нобщ, мг/кг			Доступный P, мг/кг			Доступный K, мг/кг		
	(1)*	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
1	109,9	81,6	123,7	53,7	38,4	44,0	2 171,9	2 084,3	2 293,3
2	103,7	122,5	86,3	49,0	43,0	44,2	2 000,4	2 125,6	2 335,0
3	84,2	112,2	138,5	50,4	39,8	39,3	2 220,9	2 125,7	2 419,3
4	121,5	104,7	74,8	51,0	49,1	52,1	2 171,1	2 126,9	2 376,9
5	121,3	86,3	73,3	53,9	40,6	46,2	2 086,6	2 292,7	2 663,4
среднее	108,1	101,5	99,3	51,6	42,2	45,2	2 130,2	2 151,0	2 417,6
% от валового содержания	—	—	—	0,98	0,80	0,86	5,13	5,18	5,83

* здесь и далее номер в скобках соответствует номеру опыта.

Полагаем, что накопление азота в эксперименте связано не только с азотфиксирующей деятельностью микроорганизмов, присутствующих в грунте изначально и привнесенных с оросительной водой, в частности, в составе инокулированных взвесей. Вероятно, имеет место трансформация различных форм азота в пределах микробиологической пленки, формирующейся на нефелиновом субстрате, функционирующем по сути как медленный песчаный фильтр. Биогенная трансформация может как повысить, так и понизить остаточный уровень общего содержания азота. Так, многократное внесение легкодоступного органического вещества с ОКС

в варианте (3) могло стимулировать денитрификационную активность микробиоты песков, что способствовало удалению части азота из сферы реакции в молекулярной форме (N_2). Этим можно объяснить для варианта с многократным внесением ОКС самое низкое остаточное содержание общего азота в грунте при самом высоком поступлении в него соединений этого элемента (см. табл. 2). Так, в [28] отмечено, что потеря азота в гидронных системах, работающих на коммунальных стоках, за счет денитрификации признается одной из основных проблем, снижающих экономическую эффективность функционирования таких систем.

Доступные формы калия и фосфора

Высокое исходное валовое содержание калия и фосфора в нефелиновых песках обеспечило сохранение высокого уровня доступности для растений данных элементов питания и по окончании эксперимента (после изъятия зеленой биомассы) (см. табл. 2). Данные производственного мониторинга БПК₅ и ХПК коммунальных стоков (см. табл. 1), а также соотношение этих двух параметров свидетельствуют о высоком содержании в водах органического вещества, в частности, низкомолекулярных органических кислот. Эта фракция обладает высокой реакционной способностью, что способствует повышению подвижности/доступности калия и фосфора за счет их мобилизации из минеральных субстратов [25]. Однако, если с увеличением привноса органического вещества возрастает и остаточное содержание калия в грунте, то относительно доступности фосфора картина иная: максимум остаточного содержания его доступных форм отмечен после орошения дождевой водой. Возможной причиной могут являться побочные эффекты влияния ОКС на грунт, а именно ассимиляция фосфора микробиотой, формирование труднорастворимых фосфатов Са, Fe, Al за счет вытеснения указанных элементов из тонкодисперсной фракции песков, образование ассоциатов фосфат-ионов с органическим веществом, внесенным в составе ОКС. Однако следует подчеркнуть, что остаточное содержание доступных форм К и Р в техногрунте остается величинами, сопоставимыми с их содержанием в лимоннокислой вытяжке исходного грунта (табл. 3), что подтверждает пролонгированный эффект орошения на калий-фосфорный режим песков.

Таблица 3

Доступность К и Р в лимоннокислой
вытяжке исходного грунта

Параметр	Валовое содержание	0,01 М раствор лимонной кислоты	
	мг/кг	мг/кг	% извлечения
К	41 500	1 020	2,26
Р	5 276	45,7	0,49

2. Листовая диагностика по окончании эксперимента

Результаты листовой диагностики показали, что в ходе эксперимента отмечено активное накопление всех основных элементов питания (азота, фосфора, калия) в наземной части растений одновидового фитоценоза (табл. 4). Высокая обеспеченность посевной культуры указанными элементами отмечена и в контрольном варианте (с орошением дождевой водой). При этом коэффициент биологического поглощения всех элементов возрастал с увеличением количества внесенного ОКС, но линейной зависимости не наблюдалось. Такой быстрый отклик растений на оросительные поливы даже в условиях контрольного опыта мы можем объяснить возможным усилением микробиологической активности при благоприятных условиях проведения эксперимента. Высокая влажность грунта, оптимальные температура и освещенность, хорошая аэрация, поступление важных элементов питания (К, Р, Са, Mg, аммонийного и нитратного азота) с дождевой водой создают такие условия. Так, согласно данным государственного мониторинга [29], средне-взвешенный химический состав осадков, выпадающих в регионе, следующий: калий – 0,6 мг/л, ион аммония – 0,2 мг/л, нитрат-ион – 0,9 мг/л, кальций – 1,2 мг/л, магний – 0,3 мг/л.

Весьма важным фактором роста доступности К и Р может являться относительно высокая кислотность (низкие значения pH) атмосферных выпадений в виде дождя, что является характерной особенностью даже условно-фоновых территорий крайнего Северо-Запада РФ [30].

По уровню накопления калия в сухой массе *Phleum pratense* L., достигнутого в данной работе в опытах с применением ОКС, можно говорить о его соответствии вариантам с торфованием нефелиновых песков и выращиванием злаков на окультуренных подзолистых почвах региона [5]. Многократное орошение грунта дождевой водой обеспечило накопление фосфора в надземной фитомассе свыше 4 000 мг/кг. Это превысило среднее содержание элемента в сухой массе *Phleum pratense* L., выращенной на нефелиновых песках АНОФ-1 (2 400 мг/кг в контроле, 2 500 мг/кг при торфовании), а также предел 3 300 мг/кг, достигнутый на окультуренных подзолистых почвах региона [5].

Таблица 4

Валовое содержание N, P, K в наземной части *Phleum pratense* L.

Повторность опыта	Нобщ, мг/кг			Робщ, мг/кг			Кобщ, мг/кг		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
1	24 625	30 869	30 030	3 577	3 713	4 587	25 133	29 985	29 220
2	24 880	28 862	28 850	4 097	4 444	5 527	30 465	28 160	32 091
3	24 942	28 581	34 804	4 591	4 178	4 490	27 070	32 158	35 656
4	26 544	26 028	28 406	3 602	4 137	4 709	22 928	22 671	30 728
5	14 479	25 559	32 285	4 371	4 793	4 558	29 169	29 464	32 612
среднее	23 094	27 980	30 875	4 048	4 253	4 774	26 953	28 488	32 061
КПБ*	—	—	—	0,77	0,81	0,90	0,65	0,69	0,77

* коэффициент биологического поглощения (КПБ) – отношение содержания элемента в надземной части растений к его валовому содержанию в исходном грунте; для азота данный параметр не определяется.

Орошение песков ОКС в максимально достигнутой норме 380 т/га способствовало повышению уровня содержания фосфора в сухой массе тимфеески луговой до 4 800 мг/кг. Содержание фосфора в *Phleum pratense* L. во всех вариантах проведенного опыта соответствует оптимальным значениям для злаковых растений [31].

Содержание общего азота в наземной части *Phleum pratense* L. в контрольном варианте данной работы совпадает с результатами полевых экспериментов ее выращивания на хвостохранилище АНОФ-1 без принятия каких-либо мелиоративных мер [5]. В свою очередь, даже при однократном орошении нефелиновых песков коммунальными стоками накопление азота в *Phleum pratense* L. уже достигает уровня, отмеченного для данной культуры в международной практике повышения питательной ценности кормов за счет применения высоких доз минеральных удобрений, в том числе комплексных (NPK) [32]. В варианте с многократным внесением ОКС (суммарно 380 т/га) получены результаты накопления азота в сухой массе *Phleum pratense* L., соизмеримые с результатами листовой диагностики в полевых опытах на

нефелиновых песках при внесении 100 т/га навоза как традиционного мелиоранта [5].

Заключение

1. В условиях лабораторного эксперимента с имитацией поверхностного орошения грунта подтвержден стимулирующий эффект применения нетрадиционных мелиорантов (нефильтрованных дождевой воды, осветленных коммунальных стоков и их комбинации) на питательный режим рекультивируемых хвостохранилищ с преобладанием нефелиновых песков.

2. Коэффициент биологического поглощения N, P, K надземной биомассой одновидового (*Phleum pratense* L.) сеянного фитоценоза при поверхностном орошении во всех вариантах соответствует оптимальным уровням накопления, определенных для злаковых растений в вариантах с торфованием, внесением традиционных мелиорантов и комплексных минеральных удобрений.

3. По причине промывного водного режима нефелиновых песков эффект, полученный в лабораторных условиях, требует верификации в условиях полевого эксперимента.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов РФФИ № 19-05-50065 Микромир. «Комплексная оценка воздействия микрочастиц в выбросах горных и металлургических предприятий Мурманской области на экосистемы и состояние здоровья населения Арктики» и РФФИ № 18-05-60142 Арктика. «Зоны интенсивного природопользования в Российской Арктике в условиях изменения климата: природные и социальные процессы в долгосрочной перспективе».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Постановление Правительства Мурманской области от 29.03.2013 № 139-ПП/5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/465600568>.
2. Гершенкоп А. Ш., Хохуля М. С., Мухина Т. Н. Переработка техногенного сырья Кольского полуострова // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2010. – № 1. – С. 4–8.
3. Лебедев Ю. В., Ковалев Р. Н., Олейникова Л. Н. Основные направления инновационного развития горнопромышленных комплексов // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 158–168.
4. ГОСТ Р 57446–2017. Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
5. Переверзев В. Н., Подлесная Н. И. Биологическая рекультивация промышленных отвалов на Крайнем Севере. – Апатиты : Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1986. – 103 с.
6. Евдокимова Г. А., Переверзев В. Н., Зенкова И. В., Корнейкова М. В., Редькина В. В. Эволюция техногенных ландшафтов (на примере отходов апатитовой промышленности). – Апатиты : КНЦ РАН, 2010. – 146 с.
7. Zema D. A., Bombino G., Andiloro S., Zimbone S. M. Irrigation of energy crops with urban wastewater: effects on biomass yields, soils and heating values // *Agricultural Water Management*. – 2012. – Vol. 115. – P. 55–65. doi: 10.1016/j.agwat.2012.08.009.
8. Norton-Brandao D. J., Scherrenberg S. M., van Llier J. B. Reclamation of used urban waters for irrigation purposes. A review of treatment technologies // *Journal of Environmental Management*. – 2013. – Vol. 122. – P. 85–98. doi: 10.1016/j.jenvman.2013.03.012.
9. Kunacheva C., David C., Stuckey D. C. Analytical methods for soluble microbial products (SMP) and extracellular polymers (ECP) in wastewater treatment systems: A review // *Water Research*. – 2014. – Vol. 61. – P. 1–18. doi: 10.1016/j.watres.2014.04.044.
10. Ricart S., Rico A. M. Assessing technical and social driving factors of water reuse in agriculture: A review on risks, regulation and the yuck factor // *Agricultural Water Management*. – 2019. – Vol. 217. – P. 426–439. doi: 10.1016/j.agwat.2019.03.017.
11. Руководство по контролю и регулированию почвенного плодородия орошаемых земель / под ред. В. Н. Щедрина. – Новочеркасск : РосНИИПМ, 2017. – 137 с.
12. Jimenez B., Asano T. Acknowledge all approaches: the global outlook on reuse // *Water*. – 2004. – Vol. 21. – P. 32–37.
13. Tapia A., Cornejo-La Torre M., Santosc E. S., Aránd D., Gallardoe A. Improvement of chemical quality of percolated leachates by in situ application of aqueous organic wastes on sulfide mine tailings // *Journal of Environmental Management*. – 2019. – Vol. 244. – P. 154–160. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.05.040.
14. Smyntek P. M., Chastel J., Peer R., Anthony E., McCloskey J., Bach E., Wagner R., Bandstra J., Strosnider W. Assessment of sulphate and iron reduction rates during reactor start-up for passive anaerobic co-treatment of acid mine drainage and sewage // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – 2017. – Vol. 18 (1). – P. 76–84. doi: 10.1144/GEOCHEM2017-001.
15. Кордаков И. А. Способ рекультивации золоотвалов и хвостохранилищ. Авторское свидетельство [Электронный ресурс] // Бюллетень изобретений. – 1976. – № 20. – Режим доступа: <https://patents.su/2-515482-sposob-rekultivacii-zolootvalov-i-khvostokhranilishh.html>.
16. Scholz M. *Slow Filtration. Wetlands for Water Pollution Control*. – 2nd ed. – Elsevier, 2016. – P. 61–68.
17. Jenssen P. D., Krogstad T., Paruch A. M., Maehlum T., Adam K., Arias C. A., Heistad A., Jonsson L., Hellström D., Brix H., Yli-Halla M., Vråle L., Valve M. Filter bed systems treating domestic wastewater in the Nordic countries – performance and reuse of filter media // *Ecological Engineering*. – 2010. – Vol. 36 (12). – P. 1651–1659. doi: 10.1016/j.ecoleng.2010.07.004.
18. Данилович Д. А., Эпов А. Н., Канунникова М. А. Анализ данных работы очистных сооружений российских городов – основа для технологического нормирования // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2015. – № 3–4. – С. 18–28.
19. Терентьева И. А., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б. Оценка трофического статуса субарктического озера Имандра // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2017. – Т. 20, № 1/2. – С. 197–204.

20. Ivanova L. A., Gorbacheva T. T., Makarov D. V., Rumyantseva A. V. Some aspects of physicochemical and biological methods for the conservation of apatite-nepheline tailings in the Far North // Power Technology and Engineering. – 2019. – Vol. 53 (1). – P. 47–50. doi: 10.1007/S10749-019-01033-9.
21. Masloboev V. A., Svetlov A. V., Konina O. T., Mitrofanova G. V., Turtanov A. V., Makarov D. V. Selection of binding agents for dust prevention at tailings ponds at apatite-nepheline ore processing plants // Journal of Mining Science. – 2018. – Vol. 54 (2). – P. 329–338. – doi: 10.1134/S1062739118023702.
22. Лусис А. В., Горбачева Т. Т., Иванова Л. А. Применение осветленных коммунальных стоков (ОКС) и осадка сточных вод (ОСВ) в качестве мелиорантов для рекультивации отвалов отходов рудообогащения (хвостов) // Международная научно-практическая конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019» (Севастополь, 23–26 сентября 2019 г.) / под ред. Л. И. Лукиной, Н. В. Ляминой. – Севастополь : СевГУ, 2019. – С. 940–944.
23. Halonen O., Tulkki H., Derome J. Nutrient analysis methods. Metsantutkimuslaitoksen tiedonantoja. – 1983. – Vol. 121. – P. 1–28.
24. Quevauviller P. Operationally defined extraction procedures for soil and sediment analysis. I. Standartization // Trends in Analytical Chemistry. – 1998. – Vol. 17 (5). – P. 289–298. doi: 10.1016/S0165-9936(97)00119-2.
25. Jones D. L. Organic acids in the rhizosphere – a critical review // Plant and Soil. – 1998. – Vol. 205. – P. 25–44. doi: 10.1023/A:1004356007312.
26. Евдокимова Г. А., Гершенкоп А. Ш., Воронина Н. В. Микробиологические процессы в системе добычи и переработки апатит-нефелиновых руд с использованием оборотного водоснабжения. – СПб. : Наука, 2008. – 102 с.
27. Redkina V. V., Korneykova M. V., Shalygina R. R. Microorganisms of the Technogenic Landscapes: The Case of Nepheline-Containing Sands, the Murmansk Region. Processes and Phenomena on the Boundary Between Biogenic and Abiogenic Nature. – Springer, 2019. – P. 561–579. doi: 10.1007/978-3-030-21614-6_30.
28. Kuypers M. M. M., Marchant H. K., Kartul B. The microbial nitrogen-cycling network // Nature Review Microbiology. – 2018. – Vol. 16. – P. 263–276. doi: 10.1038/nrmicro.2018.9.
29. Семенец Е. С., Свистов П. Ф., Талаш А. С. Химический состав атмосферных осадков Российского Заполярья // Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328, № 3. – С. 27–36.
30. Першина Н. А., Полищук А. И., Свистов П. Ф. К вопросу о закислении атмосферных осадков в Российской Арктике // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – 2008. – Т. 558. – С. 211–232.
31. Haneklaus S. H., Schnug E. Phosphorus in Agriculture: 100 % Zero. – Dordrecht : Springer, 2016. – P. 95–125. doi: 10.1007/978-94-017-7612-7.
32. Bednarek W., Dresler S., Tkaczyk P. Nitrogen fractions in timothy grass (*Phleum pratense* L.) fertilized with different doses of mineral fertilizers // Journal of Elementology. – 2015. – Vol. 20(1). – P. 49–58. doi: 10.5601/jelem.2014.19.2.633.

Получено 06.05.2020

© Т. Т. Горбачева, Л. А. Иванова, А. В. Румянцева, В. В. Максимова, 2020

INCREASING THE BIOGENICITY OF TECHNICAL SOILS WHEN CREATING VEGETATION COVER AS A METHOD OF CONSERVATION TAILING DUMPS FOR MINING WASTE

Tamara T. Gorbacheva

Kola Science Centre of RAS, Institute of North Industrial Ecology Problems, 14a, Microdistrict Akademgorodok, Apatity, 184209, Russia, Ph. D., Leading Researcher, Industrial Ecology Laboratory, phone: (815)557-93-37, e-mail: podzol_gorby@mail.ru

Lyubov A. Ivanova

N. A. Avronin Polar-Alpine Botanical Garden-Institute, Kola Science Centre of RAS, Botanicheskiy Sad St., Kirovsk, 184256, Russia, D. Sc., Leading Researcher, e-mail: ivanova_la@inbox.ru

Anzhela V. Rumyantseva

Cherepovets State University, 5, Prospect Lunacharskogo, Cherepovets, 162600, Russia, Ph. D., Associate Professor, e-mail: a-v-rum@yandex.ru

Victoria V. Maksimova

Kola Science Centre of RAS, 14a, Microdistrict Akademgorodok, Apatity, 184209, Russia, Junior Researcher, Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic, e-mail: fourthmax@mail.ru

The article reviews the domestic and international practice of using municipal wastewater as an unconventional chemical meliorant with a fertilizing effect on irrigation fields, in hydroponic systems, as well as overburden dumps and ore enrichment waste during reclamation activities. The object of research was ore enrichment waste ("tailings") of the apatite-nepheline factory ANOF-2 of the Apatite CF JSC with a predominance of nepheline sands in their composition. The tailing dump is included in the list of objects of accumulated environmental damage in the region, but due to its rich mineral composition, it is recognized as a man-made Deposit that is subject to conservation in order to obtain Apatite, nepheline, sphene, aegirine and titanomagnetite concentrates in the future. The purpose of this work was to evaluate the effectiveness and prolonged effect of chemical reclamation of nepheline sands by clarified municipal wastewater (CMWW) to increase the biogenicity (NPK status) of technical soil when creating vegetation cover as a method of preserving the tailings dump. The article uses the method of phytotesting of soil irrigated by the CMWW of a regional enterprise of the agricultural sector on a single-species seed material recommended for recultivation of disturbed territories in the Northern regions. During the formation of seeded phytocenosis from meadow Timothy (*Phleum pratense* L.) on nepheline sands the stimulating effect of CMWW on the soil nutrient regime was confirmed. After phytoextraction (at the end of the experiment), it retains a high residual level of the main nutrient elements (N, P, K), which indicates a prolonged effect of CMWW. To confirm the effect obtained in the laboratory, a field experiment was launched at the ANOF-2 reserve tailings storage facility in 2019, and observations are continuing. Irrigation of nepheline sands with clarified municipal wastewater at a total rate of 380 t/ha, subject to the conditions of multiple uniform distribution of irrigation water over the area, has a prolonged effect on the nutrient regime of the soil and is sufficient to create a stable vegetation cover from Timothy meadow on ore enrichment waste without land use.

Keywords: apatite-nepheline ore processing waste, nitrogen, phosphorus, potassium, clarified municipal effluents, unconventional ameliorant, citric acid, mobile forms, availability for plants, meadow Timothy *Phleum pratense* L.

REFERENCES

1. Decree of the Government of the Murmansk region No. 139–PP/5 of March 29, 2013. Retrieved from <http://docs.cntd.ru/document/465600568> [in Russian].
2. Gershenkop, A. Sh., Hohulya, M. S., & Mukhina, T. N. (2010). Technogenic raw material processing in the Kola peninsula. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN [Herald of the Kola Science Center of RAS]*, 1, 4–8 [in Russian].
3. Lebedev, Yu. V., Kovalev, R. N., & Oleynikova L. N. (2019). Main directions of innovation development mining complex. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(3), 158–168 [in Russian].
4. Standarts Russian Federation. (2017). GOST R 57446-2017. Best available technology. Reclamation of disturbed lands and land plots. Biodiversity restoration. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
5. Pereverzev, V. N., & Podlesnaya, N. I. (1986). *Biologicheskaya rekul'tivatsiya promyshlennykh otvalov na Kraynem Severe [Biological reclamation of industrial dumps in the Far North]*. Apatity: Kola branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 103 p. [in Russian].
6. Evdokimova, G. A., Pereverzev, V. N., Zenkova, I. V., Korneikova, M. V., & Red'kina, V. V. (2010). *Evolutsiya tekhnogennykh landshaftov (na primere otkhodov apatitovoy promyshlennosti) [Evolution of technogenic landscapes (on the example of wastes from the apatite industry)]*. Apatity: KSC RAS Publ., 146 p. [in Russian].
7. Zema, D. A., Bombino, G. S., & Andiloro, S. M. (2012). Zimbone Irrigation of energy crops with urban wastewater: effects on biomass yields, soils and heating values. *Agricultural Water Management*, 115, 55–65. doi: 10.1016/j.agwat.2012.08.009.

8. Norton-Brandao, D. J., Scherrenberg, S. M., & van Llier, J. B. (2013). Reclamation of used urban waters for irrigation purposes. A review of treatment technologies. *Journal of Environmental Management*, 122, 85–98. doi: 10.1016/j.jenvman.2013.03.012.
9. Kunacheva, C., David, C., & Stuckey, D. C. (2014). Analytical methods for soluble microbial products (SMP) and extracellular polymers (ECP) in wastewater treatment systems: A review. *Water Research*, 61, 1–18. doi: 10.1016/j.watres.2014.04.044.
10. Ricart, S., & Rico, A. M. (2019). Assessing technical and social driving factors of water reuse in agriculture: A review on risks, regulation and the yuck factor. *Agricultural Water Management*, 217, 426–439. doi: 10.1016/j.agwat.2019.03.017.
11. Schedrin, V. N. (Ed.). (2017). *Rukovodstvo po kontrolyu i regulirovaniyu pochvennogo plodorodiya oroshaemykh zemel' [Guidelines for the control and regulation of soil fertility of irrigated lands]*. Novocherkassk: RosNIIPM, 137 p. [in Russian].
12. Jimenez, B., & Asano, T. (2004). Acknowledge all approaches: the global outlook on reuse. *Water*, 21, 32–37.
13. Tapia, A., Cornejo-La Torre, M., Santosc, E. S., Aránd, D., & Gallardoe A. (2019). Improvement of chemical quality of percolated leachates by in situ application of aqueous organic wastes on sulfide mine tailings. *Journal of Environmental Management*, 244, 154–160. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.05.040.
14. Smyntek, P. M., Chastel, J., Peer, R., Anthony, E., McCloskey, J., Bach, E., Wagner, R., Bandstra, J., & Strosnider, W. (2017). Assessment of sulphate and iron reduction rates during reactor start-up for passive anaerobic co-treatment of acid mine drainage and sewage. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 18(1), 76–84. doi: 10.1144/GEOCHEM2017-001.
15. Kordakov I. A. (1976). Method of reclamation of ash dumps and tailings. Copyright certificate. *Byulleten' izobreteniy [Bulletin of Inventions]*, 20. Retrieved from <https://patents.su/2-515482-sposob-rekultivacii-zolootvalov-i-khvestokhranilishh.html> [in Russian].
16. Scholz, M. (2016). *Slow Filtration. Wetlands for Water Pollution Control* (pp. 61–68) (2nd ed.). Elsevier.
17. Jenssen, P. D., Krogstad, T., Paruch, A. M., Maehlum, T., Adam, K., Arias, C. A., Heistad, A., Jonsson, L., Hellström, D., Brix, H., Yli-Halla, M., Vråle, L., & Valve M. (2010). Filter bed systems treating domestic wastewater in the Nordic countries – performance and reuse of filter media. *Ecological Engineering*, 36(12), 1651–1659. doi: 10.1016/j.ecoleng.2010.07.004.
18. Danilovich, D. A., Epov, A. N., & Kanunnikova, M. A. (2015). Analysis of the data of the treatment facilities in Russian cities – the basis for technological regulation. *Nailuchshie dostupnye tekhnologii vodosnabzheniya i vodootvedeniya [The Best Available Water Supply and Water Disposal Technologies]*, 3–4, 18–28 [in Russian].
19. Terent'eva, I. A., Kashulin, N. A., & Denisov, D. B. (2017). Estimate of the trophic status of subarctic Imandra Lake. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Murmansk State Technical University]*, 20(1/2), 197–204 [in Russian].
20. Ivanova, L. A., Gorbacheva, T. T., Makarov, D. V., & Rumyantseva, A. V. (2019). Some aspects of physicochemical and biological methods for the conservation of apatite-nepheline tailings in the Far North. *Power Technology and Engineering*, 53(1), 47–50. doi: 10.1007/S10749-019-01033-9.
21. Masloboev, V. A., Svetlov, A. V., Konina, O. T., Mitrofanova, G. V., Turtanov, A. V., & Makarov, D. V. (2018). Selection of binding agents for dust prevention at tailings ponds at apatite-nepheline ore processing plants. *Journal of Mining Science*, 54(2), 329–338. doi: 10.1134/S1062739118023702.
22. Lusi, A. V., Gorbacheva, T. T., & Ivanova, L. A. (2019). Use of clarified municipal wastewater (OCS) and sewage sludge (WWS) as ameliorants for reclamation of ore processing waste dumps (tailings). In *Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopasnost'–2019 [International Scientific and Practical conference: Environmental, Industrial and Energy Security–2019]* (pp. 940–944). L. I. Lukina & N. V. Lyamina (Eds.). Sevastopol: SevGU Publ. [in Russian].
23. Halonen, O., Tulkki, H., & Derome, J. (1983). Nutrient analysis methods. *Metsantutkimuslaitoksen tiedonantoja*, 121, 1–28. Retrieved from <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-0988-6>.
24. Quevauviller, P. (1998). Operationally defined extraction procedures for soil and sediment analysis. I. Standardization. *Trends in Analytical Chemistry*, 17(5), 289–298. doi: 10.1016/S0165-9936(97)00119-2.
25. Jones, D. L. (1998). Organic acids in the rhizosphere – a critical review. *Plant and Soil*, 205, 25–44. doi: 10.1023/A:1004356007312.

26. Evdokimova, G. A., Gershenkop, A. Sh., & Voronina, N. V. (2008). *Mikrobiologicheskie protsessy v sisteme dobychi i pererabotki apatit-nefelinovykh rud s ispol'zovaniem oborotnogo vodosnabzheniya* [Microbiological processes in the system of extraction and processing of apatite-nepheline ores using circulating water supply]. St. Petersburg: Nauka Publ., 102 p. [in Russian].
27. Redkina, V. V., Korneykova, M. V., & Shalygina, R. R. (2019). *Microorganisms of the Technogenic Landscapes: The Case of Nepheline-Containing Sands, the Murmansk Region. Processes and Phenomena on the Boundary Between Biogenic and Abiogenic Nature* (pp. 561–579). Springer. doi: 10.1007/978-3-030-21614-6_30.
28. Kuypers, M. M. M., Marchant, H. K., & Kartul, B. (2018). The microbial nitrogen-cycling network. *Nature Review Microbiology*, 16, 263–276. doi: 10.1038/nrmicro.2018.9.
29. Semenets, E. S., Svistov, P. F., & Talash, A. S. (2017). Chemical composition of atmospheric precipitation in Russian Subarctic. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 328(3), 27–36 [in Russian].
30. Pershina, N. A., Polishchuk, A. I., & Svistov, P. F. (2008). On the acidification of atmospheric precipitation in the Russian Arctic. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A. I. Voeykova* [Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory], 558, 211–232 [in Russian].
31. Haneklaus, S. H., & Schnug, E. (2016). *Phosphorus in Agriculture: 100 % Zero* (pp. 95–125). Dordrecht: Springer. doi: 10.1007/978-94-017-7612-7.
32. Bednarek, W., Dresler, S., & Tkaczyk, P. (2015). Nitrogen fractions in timothy grass (*Phleum pratense* L.) fertilized with different doses of mineral fertilizers. *Journal of Elementology*, 20(1), 49–58. doi: 10.5601/jelem.2014.19.2.633.

Received 06.05.2020

© T. T. Gorbacheva, L. A. Ivanova, A. V. Rumyantseva, V. V. Maksimova, 2020

УДК 504(470)

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-2-172-183

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ТЕРРИТОРИИ СИМФЕРОПОЛЬСКОГО РАЙОНА РЕСПУБЛИКИ КРЫМ

Александр Юрьевич Мельничук

Академия биоресурсов и природопользования КФУ им. В. И. Вернадского, 295492, Россия, г. Симферополь, пгт. Аграрное, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой землеустройства и кадастра, e-mail: omelnichuk61@mail.ru

Ольга Владимировна Закаличная

Академия биоресурсов и природопользования КФУ им. В. И. Вернадского, 295492, Россия, г. Симферополь, пгт. Аграрное, аспирант кафедры землеустройства и кадастра, e-mail: olgazacalik555@mail.ru

В статье рассматриваются аспекты оценки пространственной структуры землепользований и сельскохозяйственных угодий, основанные на расчетах коэффициентов экологической стабильности и индексов неоднородности. Актуальность исследования обусловлена необходимостью получения достоверной информации о сбалансированности использования земельных ресурсов, что является важным условием сохранения природного потенциала агроландшафтов, способности к самовосстановлению и достижению устойчивости территорий. Цель исследования заключается в оценке устойчивости землепользования на примере территории Симферопольского района. Исследуемый район характеризуется выраженной вертикальной зональной поясностью, что привносит дополнительные требования и ограничения к использованию территории. Расчет индексов произведен по методикам оценки стабильности территорий, а также с применением индекса неоднородности Шеннона, пространственное распределение результатов выполнено посредством ГИС-технологий. Результаты исследования свидетельствуют о наибольшем разнообразии структуры сельскохозяйственных угодий и относительно стабильной ситуации в горной области исследуемой территории. Однородными по структуре землепользований и менее экологически стабильными являются территории Широковского, Журавлевского, Первомайского и Николаевского сельских поселений. Установлено, что равнинные области нуждаются в оптимизации структуры землепользования, а земли Предгорных территорий – в применении точных агротехнологий. Полученные результаты могут быть использованы при выработке стратегий управления территориями, совершенствовании структуры земельных угодий и посевных площадей, а также при разработке других мероприятий, направленных на достижение устойчивого развития территорий.

Ключевые слова: агротехнологии, землепользование, структура посевных площадей, устойчивое развитие, экологическая стабильность

Введение

Современный этап развития человеческого общества характеризуется возрастающими потребностями в природных ресурсах и ростом интенсивности их использования. Под природными ресурсами следует понимать: «1) природные объекты и явления, используемые в настоящем, прошлом и будущем для прямого и непрямого потребления, способствующие созданию материальных богатств, воспроизводству трудовых ресурсов, поддержанию условий существования человечества и повышающие качество жизни (ресурсы удобств, эстетические ресурсы, в том числе

феномены природы); 2) тела и силы природы (природные блага), общественная полезность которых положительно или отрицательно изменяется в результате трудовой деятельности человека; используются (или потенциально пригодны для использования) в качестве средств труда (земля, водные пути, вода для орошения)...» [1].

Особое место среди природных ресурсов занимают земельные. Согласно [2] земельными ресурсами являются земли, которые используются или могут быть использованы в отраслях народного хозяйства. Поскольку земля является основой для функционирования практически всех производств, а также

территориальным базисом для размещения и обеспечения жизнедеятельности населения, то этот факт придает земельным ресурсам особую важность. Кроме того, земля имеет качественно незаменимое свойство – плодородие почв, поэтому выступает средством производства в сельском и лесном хозяйстве.

Изучению различных свойств и аспектов использования земель посвящены работы многих исследователей. В научном мире наиболее основательными признаются труды выдающегося ученого в области почвоведения В. В. Докучаева. В работе «К учению о зонах природы. Горизонтальные и вертикальные почвенные зоны» В. В. Докучаев, ссылаясь на отечественных ученых, подчеркивает «...что почвы и грунты есть зеркало, яркое и вполне правдивое отражение, – так сказать, непосредственный результат совокупного, весьма тесного, векового взаимодействия между водой, воздухом, землей (первоначальной, еще не измененной процессами почвообразования материнской горной породы, иначе подпочвы), с одной стороны, растительными и животными организмами, и возрастом страны, с другой, – этими ответными и поныне действующими почвообразователями» [3]. К слову, В. В. Докучаев исследовал почвы Южного берега Крыма, а также окрестностей Севастополя и Симферополя.

Земельные ресурсы с их важной составляющей – почвами, следует рассматривать исходя из того, что почвы как природный компонент ландшафтной сферы вместе с рельефом, горными породами, наземным слоем атмосферы, водами, растительностью и животным миром находятся во взаимосвязи и развитии. От того, насколько мы глубоко знаем закономерности природных процессов и явлений, их взаимосвязи в ландшафтах, зависит не только экономическое развитие, но и степень оптимальности природопользования, сохранения природной среды для будущих поколений.

Чрезмерно интенсивное использование земли в сельском хозяйстве приводит к развитию деградационных процессов и явлений на обширных территориях. Под влиянием активной антропогенной деятельности значительные изменения претерпевают все природные

компоненты ландшафтной сферы. Вследствие роста уровня урбанизации сокращаются площади природных территорий, наблюдается истощение и загрязнение почв, водных источников, атмосферы, что в итоге приводит к необратимым изменениям в природных ландшафтах [4].

В качестве противодействия деградации окружающей среды прогрессивными представителями человечества был предложен курс на устойчивое развитие, который нашел поддержку и воплощение в документах ООН [5, 6], а также документах регионального значения [7]. Сущность устойчивого развития состоит в определении и соблюдении баланса между социально-экономическим развитием и необходимостью сохранения окружающей природной среды для будущих поколений. Идеи устойчивого развития непосредственно относятся и к сфере использования земельных ресурсов.

На современном этапе развития общества при использовании земельных ресурсов в сельском хозяйстве все актуальнее становится проблема допустимого преобразования природных ландшафтов при возрастающих запросах общества на сельскохозяйственную продукцию высокого качества и качество окружающей среды. Решению многочисленных задач этой проблемы обоснованно уделяется внимание авторитетных ученых в области землеустройства, географии, экологии, экономики, почвоведения, мелиорации [4, 8–14]. Однако вопросы региональных и локальных особенностей современного использования земельных ресурсов Крыма в сельскохозяйственном производстве рассмотрены недостаточно и требуют дальнейшего изучения.

Цель нашей работы заключается в оценке экологической устойчивости землепользований посредством расчета коэффициентов экологической стабильности и индексов неоднородности. Согласно цели поставлены следующие задачи исследования: произвести расчеты коэффициентов экологической стабильности и индексов неоднородности территории; сравнить результаты; привести рекомендации для достижения устойчивого землепользования.

Объектом исследования избрана территория Симферопольского района Республики Крым, которая представляет особый интерес в области достижения устойчивого землепользования, как наиболее доступный в транспортном отношении поставщик сельскохозяйственной продукции для населения г. Симферополя. Исследуемый район также характеризуется выраженной вертикальной зональной поясностью, что привносит дополнительные требования и ограничения к использованию территории.

Методы и материалы

Информационную базу работы составили статистические данные Госкомрегистра Республики Крым в части структуры и распределения земельного фонда Симферопольского района, цифровая матрица высот ALOS AW3D и серия спутниковых снимков высокого и сверхвысокого разрешений (Landsat, Sentinel). Расчеты выполнены по сельским поселениям района в программном пакете ArcGis 9.3.

Результаты

За последние десятилетия в области использования земельных ресурсов Симферопольского района Республики Крым произошли серьезные изменения. Состав и соотношение земельных угодий в силу различных факторов не стабильны. Особенно это касается общей структуры земельных угодий (табл. 1). Понятие «структура земельного фонда (структура земель)» в землеустройстве определяется как «совокупность показателей, характеризующих наличие и распределение земель, входящих в состав земельного фонда, по удельному весу (соотношению) занимаемой ими площади» [15].

В структуре сельскохозяйственных угодий по состоянию на 2018 г. пашня занимает 79,00 %; многолетние насаждения – 10,48 %; сенокосы – 0,04 %; пастбища – 10,48 %. Сельскохозяйственная освоенность территории района составляет 58,3 %; распаханность – 43,5 %; лесистость – 15,2 %. В целом приведенные по району показатели не являются экологически критическими. Однако серьезное беспокойство вызывает пространственная локализация распаханых территорий и уменьшение площади эколого-стабилизи-

рующих земель. Так, за последние 16 лет площадь сенокосов уменьшилась на 431,2 га, пастбищ – на 10,9 тыс. га, земель лесного фонда – на 1,1 тыс. га. Зато на 6,9 тыс. га увеличилась площадь под землями промышленности, энергетики, транспорта, связи, радиовещания, телевидения, информатики и иного специального назначения. Исходя из приведенных данных, для более детальной характеристики состояния территории Симферопольского района целесообразно использовать экологические показатели [10, 16–18], к которым относятся коэффициенты экологической стабильности ($K_{эсл1}$ и $K_{эсл2}$) [10, 17].

Для оценки современного состояния землепользований района рассчитан упрощенный коэффициент экологической стабильности $K_{эсл1}$, предложенный в 1995 г. словацкими учеными Е. Клементовой и В. Гейниге и используемый в агроландшафтных исследованиях [17]. Оценка основана на сопоставлении площадей под стабилизирующими (леса, защитные лесные насаждения, заповедники, естественные водоемы и болота, кустарники, пастбища, сенокосы, пашня под многолетними культурами) и дестабилизирующими (площади под застройками и домами, карьеры, овраги, пашня под однолетними культурами) элементами ландшафта:

$$K_{эсл1} = \frac{P_{стаб.}}{P_{дестаб.}}, \quad (1)$$

где $P_{стаб.}$, $P_{дестаб.}$ – площади стабилизирующих и дестабилизирующих угодий.

Для уточнения и детализации результатов расчеты также выполнены по методике, используемой в землеустройстве (авторы Э. Гайссе, И. Рыбарски, Ф. Швегла) [10], согласно которой коэффициент $K_{эсл2}$ рассчитывается по формуле:

$$K_{эсл2} = \frac{\sum K_i \cdot P_i}{\sum P_i} \cdot K_p, \quad (2)$$

где K_i – коэффициент экологической стабильности угодья i -го вида;

P_i – площадь угодья i -го вида;

K_p – коэффициент морфологической стабильности рельефа.

Таблица 1

Динамика трансформации земельного фонда Симферопольского района Республики Крым [19, 20]

Состав земельного фонда	Площадь, га					Отклонение 2018–2002 гг.
	2002 г.	2006 г.	2010 г.	2014 г.	2018 г.	
1	2	3	4	5	6	7
1. Земли сельскохозяйственного назначения, <i>в том числе:</i>	128 683,1	127 864,8	127 155,0	126 587,2	102 149,0	–26 534,1
Сельскохозяйственные угодья:	122 989,1	121 966,4	121 372,0	120 801,0	96 397,3	–26 591,8
пашня	88 632,1	89 922,3	89 496,6	89 441,5	76 157,5	–12 474,6
сенокосы	472,1	413,4	409,0	409,0	40,9	–431,2
пастбища	21 012,8	19 659,8	19 439,7	19 199,8	10 099,6	–10 913,2
многолетние насаждения, <i>в том числе:</i>	12 872,1	11 970,9	12 026,6	11 750,7	10 099,3	–2 772,8
сады	5 752,9	5 398,2	5 202,5	5 161,7	3 687,1	–2 065,8
виноградники	5 980,2	5 433,7	5 704,5	5 710,1	4 753,3	–1 226,9
другие	1 139,0	1 139,0	1 119,7	878,9	1 658,9	+519,9
Под хозяйственными строениями и сооружениями, путями и прогонами	4 598,0	4 652,4	4 625,6	4 591,1	4 556,6	–41,4
Земли, находящиеся в стадии мелиоративного строительства	1 096,0	1 246,0	1 157,4	1 195,1	1 195,1	+99,1
2. Земли населенных пунктов	4 512,5	4 578,4	4 955,4	5 178,1	17 630,7	+13 118,2
3. Земли промышленности, энергетики, транспорта, связи, радиовещания, телевидения, информатики и иного специального назначения, <i>в том числе:</i>	1 786,9	1 838,3	2 070,0	2 219,7	8 664,7	+6 877,8
земли промышленности	59,4	78,6	114,3	133,8	115,8	+56,4
земли транспорта	1 324,7	1 332,0	1 328,5	1 324,2	1 534,1	+209,4
земли технической инфраструктуры, под открытыми разработками	402,8	427,7	627,2	761,7	7 014,8	+6 612,0
4. Земли особо охраняемых территорий и объектов	–	–	–	–	3,7	+3,7
5. Земли лесного фонда, <i>в том числе:</i>	27 791,9	27 859,8	27 844,5	28 008,5	26 679,8	–1 112,1
защитные лесные насаждения	2 927,9	2 555,7	2 544,5	2 536,0	н/д	–
6. Земли водного фонда	1 478,7	1 452,9	1 541,4	1 533,9	1 868,9	+390,2
7. Земли запаса	10 999,8	11 658,8	11 686,6	11 725,5	18 256,1	+7 256,3
Всего земель	175 252,9	175 252,9	175 252,9	175 252,9	175 252,9	0

Коэффициенты экологической стабильности угодий по предложенной методике [10] приняты для застроенных территорий и дорог ($K_i = 0$); пашни ($K_i = 0,14$); виноградников

($K_i = 0,29$); лесополос ($K_i = 0,38$); фруктовых садов, кустарников ($K_i = 0,43$); огородов ($K_i = 0,50$); сенокосов ($K_i = 0,62$); пастбищ

($K_i = 0,68$); прудов ($K_i = 0,79$); лесов естественного происхождения ($K_i = 1,0$). Коэффициент морфологической стабильности рельефа для нестабильных территорий (овраги, оползни, пески) принят равным ($K_p = 0,7$), для остальных территорий ($K_p = 1,0$). Авторы рекомендуют интерпретировать результаты следующим образом [10; 17]: при $K_{эсл2}$ менее 0,33 территория считается экологически нестабильной; 0,34–0,50 – неустойчиво стабильной; 0,51–0,66 – переходит в градацию средней стабильности; более 0,67 – экологически стабильной.

Расчеты выполнены по 21 сельскому поселению Симферопольского района (за исключением Школьненского (обозначение 10 на рис. 1), в котором отсутствуют земли сельско-

хозяйственного назначения). В итоге по методике Э. Гайссе, И. Рыбарски, Ф. Швегла территории 19 сельских поселений относятся к экологически нестабильным, 2 – к неустойчиво стабильным. Для визуализации пространственного распределения коэффициентов проведено согласование диапазонов путем выполнения минимаксной нормализации данных оцениваемых условий. Значения $K_{эсл1}$ и $K_{эсл2}$ сгруппированы в интервальный вариационный ряд, оптимальное количество интервалов определено по формуле Стерджесса [21] и округлено до наименьшего, результаты представлены на рис. 1:

$$m = 1 - 3,322 \cdot \ln(n), \quad (3)$$

где n – численность элементов совокупности (сельских поселений).

Рис. 1. Распределение территории Симферопольского района по коэффициенту экологической стабильности:

а) $K_{эсл1}$; б) $K_{эсл2}$; сельские поселения: 1 – Широковское; 2 – Новоандреевское; 3 – Журавлевское; 4 – Гвардейское; 5 – Первомайское; 6 – Донское; 7 – Родниковское; 8 – Урожайновское; 9 – Скворцовское; 10 – Школьненское; 11 – Укромновское; 12 – Молодежненское; 13 – Николаевское; 14 – Новоселовское; 15 – Перовское; 16 – Мирновское; 17 – Трудовское; 18 – Мазанское; 19 – Кольчугинское; 20 – Пожарское; 21 – Городской округ Симферополь; 22 – Чистенское; 23 – Добровское

Коэффициенты $K_{эсл1}$ и $K_{эсл2}$ представлены элементами выборки объемом $n = 21$ (количество сельских поселений). Несовпадение средних арифметических соответственно (0,386 и 0,138) с медианами выборок (0,25 и 0,27) по-

казывает асимметрию распределения значений относительно среднего.

Кроме того, эксцессы (13,15 и 2,94) свидетельствуют о том, что по краям распределений находится больше значений, чем вокруг среднего (табл. 2).

Таблица 2

Частоты распределения коэффициентов
экологической стабильности

Интервал	< 0,20	0,21– 0,40	0,41– 0,60	0,61– 0,80	> 0,81
Частота $K_{эсл1}$	19	1	–	–	1
Частота $K_{эсл2}$	6	4	8	1	2

Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о ненормальном распределении коэффициентов экологической стабильности. Таким образом, для сложившихся условий Симферопольского района коэффициенты экологической стабильности ($K_{эсл1}$ и $K_{эсл2}$), на наш взгляд, требуют уточнения.

Пространственное распределение коэффициентов экологической стабильности (см. рис. 1) по сельским поселениям Симферопольского района показывает, что задачу допустимого уровня эксплуатации земельных ресурсов необходимо решать в каждом конкретном случае, в зависимости от природных и сложившихся социально-экономических условий.

Урегулировать данные вопросы предлагается путем установления зонально допустимых норм использования земельных ресурсов. Научной основой установления таких норм могут служить законы функционирования экосистем, в частности, закон необходимого биоразнообразия, согласно которому «никакая природная система не может формироваться из идентичных элементов» [1, 22]. Иными словами, снижение разнообразия приводит к упрощению системы и, следовательно, к ее неустойчивости.

Предполагая, что стабильность территории определяется разнообразием, выполним расчет индекса неоднородности структур земельного фонда, сельскохозяйственных угодий и посевных площадей. Наиболее часто при определении меры разнообразия (ландшафтного, видового) в географических и биологических науках используется количественный показатель – индекс разно-

образия (неоднородности) или энтропия Шеннона (H). Под энтропией, согласно теории информации, следует понимать меру неупорядоченности системы и ее элементов, а также неопределенность стратегий ее поведения в рамках среды функционирования [14; 23; 24]:

$$H = -\sum \frac{n_i}{N} \cdot \ln \frac{n_i}{N}, \quad (4)$$

где H – индекс разнообразия, неоднородности (энтропия Шеннона);

n_i – площадь земель (i -й категории, i -го угодья, i -й культуры) в границах оцениваемого массива (сельского поселения);

N – общая площадь оцениваемого массива.

Применение данного показателя связано с его чувствительностью к количеству категорий земельного фонда, равномерности их пространственного распределения, а также с возможностью сопоставления разновременных данных.

Результаты расчетов неоднородности структур земельного фонда и земель сельскохозяйственного назначения представлены на рис. 2. Наивысшей неоднородностью характеризуются территории Добровского (1,19) и Перовского (1,05) сельских поселений, что соответствует результатам, полученным при расчете коэффициентов экологической стабильности ($K_{эсл1}$, $K_{эсл2}$); наименьшей – Журавлевское (0,26), Новоселовское (0,26) и Первомайское (0,29) сельские поселения. Это связано с преобладанием одной категории земельного фонда (в данных случаях – земель сельскохозяйственного назначения).

Аналогичным образом проведена оценка неоднородности структуры сельскохозяйственных угодий, при которой выявлено, что в Журавлевском (0,06), Широковском (0,14) и Николаевском (0,37) сельских поселениях преобладает один вид сельскохозяйственных угодий (более 97 % пашни). Максимальные значения неоднородности (или разнообразия) наблюдаются в Кольчугинском (1,14) и Новоселовском (1,11) сельских поселениях.

Рис. 2. Пространственный анализ территории района по индексу неоднородности структур:
а) земельного фонда; б) сельскохозяйственных угодий

Землепользования сельских поселений, полностью или частично расположенные в физико-географической зоне Крымские горы (15, 23), отличаются наибольшим разнообразием, что подтверждает целесообразность зонального подхода к использованию земель. Наиболее однородными по структуре категорий земель и угодий являются Широковское (1), Журавлевское (3), Первомайское (5) и Николаевское (13) сельские поселения (пашня составляет 86,3 %, 89,9 %, 78,4 % и 82,2 % от общей площади поселения соответственно), что сопоставимо с результатами оценки экологической стабильности ($K_{эсл1}$ и $K_{эсл2}$).

В результате оценки разнообразия структур посевных площадей [14, 23, 24] по сельским поселениям района [25], выявлены территории с минимальным (Укромновское (11), Мирновское (16), Добровское (23), Новоселовское (11) и Журавлевское (1) сельские поселения) и максимальным разнообразием (Родниковское (7), Скворцовское (9), Гвардейское (4), Пожарское (20) сельские поселения) (рис. 3).

Сопоставление оценок разнообразия структур посевных площадей с коэффициентами экологической стабильности ($K_{эсл1}$ и $K_{эсл2}$) показывает наличие противоречий, например, экологически стабильные территории (Добровское сельское поселение) характеризуются незначительным разнообразием структур посевных площадей.

Рис. 3. Пространственный анализ территории района по индексу неоднородности структуры посевных площадей

Для приведения данных показателей к однородным нами предлагается выполнить интегральную оценку территории (I) по фактору неоднородности структур (земельного фонда, сельскохозяйственных угодий и посевных площадей) с учетом коэффициента экологической стабильности $K_{эсл2}$ как более надежного с точки зрения статистики:

$$I = K_{эсл2} \cdot \sum_{i=1}^n H_i \cdot K_i, \quad (5)$$

где H_i – индекс неоднородностей по каждому из факторов (структуры земельного фонда, сельскохозяйственных угодий, посевных площадей);

K_i – нормирующий коэффициент;

n – количество факторов.

Результаты исследования интерполированы по методу «Кригинг» и представлены в виде картограммы зонирования территории

Симферопольского района по интегральной оценке неоднородности структур (земельного фонда, сельскохозяйственных угодий и посевных площадей) с учетом коэффициента экологической стабильности $K_{эсл2}$ (рис. 4).

Рис. 4. Зонирование территории Симферопольского района по показателям интегральной оценки (I)

На территории района исследований нами выделены зоны с такими характеристиками:

1) экологическая нестабильность территории хорошо выражена (интегральная оценка в диапазоне 0–0,20). К этой зоне отнесены: Журавлевское, Широковское, частично Новоандреевское, Николаевское, Гвардейское и Укромновское сельские поселения. В зоне преобладают пахотные угодья, на которых возделываются преимущественно озимые и яровые зерновые культуры. В зоне активно проявляются эрозионные процессы и наблюдается снижение продуктивности почв, что требует применения незамедлительных мероприятий по их восстановлению;

2) экологически нестабильная территория (интегральная оценка 0,21–0,40). В зоне наблюдается преобладание сельскохозяйственных угодий (пашня и многолетние насаждения). На отдельных участках сельскохозяйственных угодий проявляются дефляционные процессы, возникшие вследствие нерациональной структуры землепользования и неудовлетворительного состояния защитных лесных полос. Для поддержания экологических функций ландшафтов требуется

проведение мероприятий, включающих облесение и оптимизацию структуры посевных площадей;

3) условно экологически стабильная территория (интегральная оценка 0,41–0,60). Характеризуется умеренным сельскохозяйственным землепользованием и развитой инженерной инфраструктурой;

4) экологическая стабильность территории хорошо выражена (интегральная оценка 0,61–0,80). Представлена сбалансированным ландшафтом, в котором природно-техногенные объекты функционируют в границах сохранившихся естественных ландшафтов;

5) территория с ярко выраженной экологической стабильностью (интегральная оценка 0,81–1,0). Зона характеризуется высокой облесенностью и низкой интенсивностью сельскохозяйственного землепользования (частично включает территории Добровского и Перовского сельских поселений).

Выводы

Сложившиеся структурно неоднородные условия землепользований района не позво-

ляют выработать однотипные рекомендации для их землеустройства. В данном случае затруднительным является формирование полей и рабочих участков, особенно в Предгорной зоне, из-за преобладания микроформ рельефа и различий в почвенных условиях (содержание гумуса, основных элементов питания, каменистость и т. д.). Проведенный анализ дает основания рекомендовать к внедрению в сельскохозяйственное производство агротехнологии, наиболее полно учитывающие локальные факторы землепользования, например, цифровые технологии точного земледелия.

Выполненное зонирование Симферопольского района позволяет определить территории, которые нуждаются в осуществлении мероприятий, направленных на регулирова-

ние антропогенной нагрузки на территорию и достижение устойчивого сельскохозяйственного землепользования. В каждой из выделенных зон такие мероприятия должны ориентироваться на природно-климатические особенности территории и включать: оптимизацию структуры сельскохозяйственных угодий и посевных площадей; создание или расширение экологического каркаса территории; увеличение площадей особо охраняемых природных территорий и земель лесного фонда.

Результаты, полученные в ходе исследования, могут быть использованы для совершенствования структуры земельных угодий и посевных площадей, а также при разработке других мероприятий, направленных на достижение устойчивого развития территорий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Реймерс Н. Ф. Природопользование : словарь-справочник. – М. : Мысль, 1990. – 637 с.
2. ГОСТ 26640–85. Земли. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 1985. – 11 с.
3. Докучаев В. В. К учению о зонах природы. Горизонтальные и вертикальные почвенные зоны. – СПб. : Типография СПб. Градоначальства, 1899. – 28 с.
4. Чупахин В. М., Андришин М. В. Ландшафты и землеустройство. – М. : Агропромиздат, 1989. – 255 с.
5. World Bank. Sustainable Land Management: Challenges, Opportunities, and Trade-offs. – Washington : World Bank, 2006. – 87 p.
6. Резолюция, принятая Генеральной Ассамблеей 25 сентября 2015 года. Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://undocs.org/ru/A/RES/70/1>.
7. Стратегия социально-экономического развития Республики Крым до 2030 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://simfmo.rk.gov.ru/rus/file/pub/pub_326314.pdf.
8. Айдаров И. П. Пути перехода сельского хозяйства страны к устойчивому развитию // Природообустройство. – 2014. – № 5. – С. 9–12.
9. Ведомственный проект «Цифровое сельское хозяйство». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mcs.ru/upload/iblock/900/900863fae06c026826a9ee43e124d058.pdf>.
10. Волков С. Н. Землеустройство. Т. 2. Землеустроительное проектирование. Внутрихозяйственное землеустройство. – М. : Колос, 2001. – 648 с.
11. Волков С. Н., Шаповалов Д. А. Роль современного землеустройства в научно-техническом обеспечении развития сельского хозяйства // Материалы Всероссийского семинара совещания проректоров по научной работе вузов Минсельхоза России «Участие аграрных вузов в научно-техническом обеспечении развития сельского хозяйства». – Курск : Курская государственная сельскохозяйственная академия им. профессора И. И. Иванова, 2018. – С. 103–116.
12. Кирюшин В. И. Теория адаптивно-ландшафтного земледелия и проектирование агроландшафтов. – М. : КолосС, 2011. – 443 с.
13. Комов Н. В., Чешев А. С. Комплексный подход к планированию и рациональному использованию земельных ресурсов // Экономика и экология территориальных образований. – 2018. – Т. 2, № 1. – С. 6–21.
14. Усольцев В. А. Биоразнообразие в экосистемах: краткий обзор проблемы // Эко-потенциал. – 2019. – № 1 (25). – С. 9–47.
15. Словарь-справочник землеустроителя / Под ред. А. С. Помелова. – Минск : Учеб. центр подгот., повышения квалификации и переподгот. кадров землеустроит. и картографо-геодез. службы, 2004. – 271 с.

16. Rehackova T., Pauditsova E. The methodology of determining of landscape ecological stability coefficient (in Slovak) // *Acta Environmentalica Universitatis Comenianae*. – 2007. – No 15. – P. 26–38.
17. Масютенко Н. П., Чуян Н. А., Бахирев Г. И. Система оценки устойчивости агроландшафтов для формирования экологически сбалансированных агроландшафтов. – Курск : ГНУ ВНИИЗиЗПЭ РАСХН, 2013. – 50 с.
18. Карпова Л. А. Картографическая оценка показателей эколого-хозяйственного баланса с использованием геоинформационных технологий // *Вестник СГУГиТ*. – 2016. – № 4 (36). – С. 122–135.
19. Отчет о наличии земель и распределении их по формам собственности, категориям, угодьям и пользователям Симферопольского района Республики Крым (по состоянию на 01.01.2015–01.01.2019 годы) / Госкомрегистр РК. – Симферополь : [б. и.]. – 2015–2019 гг.
20. Структура, динамика и распределение земельного фонда Симферопольского района Республики Крым (по состоянию на 01.01.2006–01.01.2014 годы) / Респ. комитет по земельным ресурсам. – Симферополь : [б. и.]. – 2006–2014 гг.
21. Ганичева А. В. Прикладная статистика : учеб. пособие. – СПб. : Лань, 2017. – 172 с.
22. Реймерс Н. Ф. Экология (теории, законы, правила, принципы и гипотезы). – М. : Журнал «Россия Молодая», 1994. – 367 с.
23. Bordoloi R., Mote A., Sarkar P. P., Mallikarjuna C. Quantification of land use diversity in the context of mixed land use // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. – 2013. – Vol. 104, No 0. – P. 563–572.
24. Волькенштейн М. В. Энтропия и информация. – М. : Наука, 1986. – 192 с.
25. Сведения о сборе урожая сельскохозяйственных культур в Симферопольском районе Республики Крым (по состоянию на 01.01.2002–01.01.2019 годы) / Симферополь : Администрация Симферопольского района.

Получено 18.03.2020

© А. Ю. Мельничук, О. В. Закаличная, 2020

EVALUATION OF ECOLOGICAL STABILITY OF THE TERRITORY OF SIMFEROPOL DISTRICT OF THE REPUBLIC OF CRIMEA

Aleksandr Y. Melnichuk

Academy of Life and Environmental Sciences V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Agrarnoe, Simferopol, 295492, Russia, D. Sc., Associate Professor, Head of the Department of Land Management and Cadaster, e-mail: omelnichuk61@mail.ru

Olga V. Zakalichnaya

Academy of Life and Environmental Sciences V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Agrarnoe, Simferopol, 295492, Russia, Ph. D. Student, Department of Land Management and Cadaster, e-mail: olgazacalik555@mail.ru

The article considers aspects of evaluation of the spatial structure of land use and agricultural land, based on calculations of environmental stability coefficients and heterogeneity indexes. The relevance of the research is the need to obtain reliable information on the balanced land use, which is a condition for saving the natural capabilities of the agrarian landscape, the ability to self-repair and achieve the stability of the territories. The purpose of research is to assess the sustainability of land use on the example of the territory of Simferopol district. The pronounced vertical zoning of the study area introduces additional requirements and restrictions to the use of the territory. The indices were calculated using the methods for assessing the stability of territories and using the Shannon index. The spatial distribution of results was performed using GIS-technologies. The results of research to indicate the greatest diversity of the structure of agricultural land and a relative stability in the mountainous areas of the studied territory. The territories of Shirokovsky, Zhuravlevsky, Pervomaysky and Nikolaevsky rural settlements are homogeneous in the structure of land use and less environmentally stable. It is stated that the plains need to optimize the land use structure and the land of the Foothills territories need the application of precise agricultural technologies. The results can be used in the development of strategies for managing territories, in the improving the structure of land and crop areas, and in the development of other measures aimed by achieving the sustainable development of territories.

Keywords: agricultural technologies, land use, crop area structure, sustainable development, environmental stability

REFERENCES

1. Reimers, N. F. (1990). *Prirodopolzovanie [Nature management]*. Moscow: Mysl Publ., 637 p. [in Russian].
2. GOST 26640-85 (1985). Lands, terms and definitions. Moscow: Standartinform Publ., 11 p. [in Russian].
3. Dokuchaev, V. V. (1899). *K ucheniyu o zonah prirody. Gorizonttal'nye i vertikal'nye pochvennyye zony [Theory about Natural Zones. Horizontal and Vertical Soil Zones]*. St. Petersburg: Tip. SPb. gradonachal'stva Publ., 28 p. [in Russian].
4. Chupakhin, V. M., & Andriishin, M. V. (1989). *Landshafty i zemleustrojstvo [Landscapes and land management]*. Moscow: Agropromizdat Publ., 255 p. [in Russian].
5. World Bank. *Sustainable Land Management: Challenges, Opportunities, and Trade-offs*. (2006). Washington: World Bank, 87 p.
6. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Retrieved from <https://undocs.org/ru/A/RES/70/1> [in Russian].
7. The 2030 Strategy of socio-economic development of the Republic of Crimea. Retrieved from http://simfmo.rk.gov.ru/rus/file/pub_326314.pdf [in Russian].
8. Aidarov, I. P. (2014). Ways of transition of agriculture to the sustainable development. *Prirodoobustrojstvo [Environmental management]*, 5, 9–12 [in Russian].
9. Departmental Project "Digital agriculture". (n. d.) Retrieved from <http://mcx.ru/upload/iblock/900/900863fae06c026826a9ee43e124d058.pdf> [in Russian].
10. Volkov, S. N. (2001). *Zemleustrojstvo. T. 2. Zemleustroitel'noe proektirovanie. Vnutri-hozyajstvennoe zemleustrojstvo [Land Management. Vol. 2. Land management design. Intra-farm land management]*. Moscow: Kolos Publ., 648 p. [in Russian].
11. Volkov, S. N., & Shapovalov, D. A. (2018). The role of modern land use planing in scientific and technical support of agrikultural development. In *Sbornik materialov Vserossijskogo seminaru soveshchaniya prorektorov po nauchnoj rabote vuzov Minsel'hoza Rossii: Uchastie agrarnyh vuzov v nauchno-tekhnicheskom obespechenii razvitiya sel'skogo hoz'yajstva [Proceedings of the All-Russian Seminar of the Meeting of Vice-Rectors for Scientific Work of Universities of the Ministry of Agriculture of Russia: Participation of Agricultural Universities in Scientific and Technical Support for the Development of Agriculture]* (pp. 103–116). Kursk: Kursk State Agricultural Academy Publ. [in Russian].
12. Kiryushin, V. I. (2011). *Teoriya adaptivno-landshaftnogo zemledeliya i proektirovanie agrolandshaftov [Theory of Adaptive Landscape Agriculture and Design of Agrolandscapes]*. Moscow: KolosS Publ., 443 p. [in Russian].
13. Komov, N. V., & Cheshev, A. S. (2018). Integrated approach to the planning and management of land resources. *Ekonomika i ekologiya territorial'nyh obrazovanij [Economy and Ecology of Territorial Formations]*, 2(1), 6–21 [in Russian].
14. Usoltsev, V. A. (2019). Biodiversity in ecosystems: a brief analysis of the problem. *ECO-potential [ECO-Potential]*, 1(25), 9–47 [in Russian].
15. Pomelov, A. S. (2004). *Slovar'-spravochnik zemleustroitelya [Dictionary surveyor]*. Minsk: Uchebnyy tsentr podgotovki, povysheniya kvalifikatsii i perepodgotovki kadrov zemleustroitel'noy i kartografo-geodezicheskoy sluzhby Publ., 271 p. [in Russian].
16. Rehackova, T. (2007). The methodology of determining of landscape ecological stability coefficient. *Acta Environmentalica Universitatis Comenianae*, 15, 26–38 [in Slovak].
17. Masyutenko, N. P., Chuyan, N. A., & Bahirev, G. I. (2013). *Sistema ocenki ustojchivosti agrolandshaftov dlya formirovaniya ekologicheskii sbalansirovannykh agrolandshaftov [System for assessing the sustainability of agricultural landscapes for the formation of ecologically balanced agricultural landscapes]*. Kursk: All-Russian Research Institute of Arable Farming and Soil Erosion Control Publ., 50 p. [in Russian].
18. Karpova, L. A. (2016). Mapping evaluation indicators environmental and economic balance using GIS technology. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(36), 122–135 [in Russian].

19. Report on the availability of land and their distribution by ownership forms, categories, lands and users of the Simferopol district of the Republic of Crimea (2015–2019). Simferopol: Goskomregistr RK Publ. [in Russian].
20. Structure, dynamics and distribution of the land fund of the Simferopol district of the Republic of Crimea (2006–2014). Simferopol: Resp. Committee of land resources [in Russian].
21. Ganicheva, A. V. (2017). *Prikladnaya statistika [Applied statistics]*. St. Petersburg: Lan' Publ., 172 p. [in Russian].
22. Reimers, N. F. (1994). *Ekologiya (teoriya, zakony, pravila, printsipy i gipotezy) [Ecology (theory, laws, rules, principles and hypotheses)]*. Moscow: Rossiya Molodaya Publ., 367 p. [in Russian].
23. Bordoloi, R., Mote, A., Sarkar, P. P., & Mallikarjuna, C. (2013). Quantification of Land Use Diversity in the Context of Mixed Land Use. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 104(0), 563–572.
24. Vol'kenshtejn, M. V. (1986). *Entropiya i informaciya [Entropy and information]*. Moscow: Nauka Publ., 192 p. [in Russian].
25. Information about the harvest of agricultural crops in the Simferopol district of the Republic of Crimea (2002–2019). Simferopol: Administration of the Simferopol district [in Russian].

Received 18.03.2020

© A. Y. Melnichuk, O. V. Zakalichnaya, 2020

УДК 528.28:528.92

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-184-192

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОХРАННЫХ ЗОН ПУНКТОВ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ

Дарья Васильевна Пархоменко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и территориального планирования, тел. (913)900-19-50, e-mail: dara8@inbox.ru

Александр Викторович Чернов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и территориального планирования, тел. (913)743-09-79, e-mail: avch-1011@mail.ru

Иван Викторович Пархоменко

Управление Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии по Новосибирской области, 630091, Россия, г. Новосибирск, ул. Державина, 28, кандидат технических наук, заместитель руководителя, e-mail: iv_uy@ngs.ru

Одним из ключевых факторов успешного формирования единого геопространства является наличие стабильной координатной основы, закреплённой на местности сетью геодезических пунктов. Анализ современного состояния такой сети на примере Новосибирской области показал, что в результате хозяйственной деятельности граждан и ряда иных факторов за последний год утрачено значительное количество наружных знаков пунктов, что вызывает значительные сложности для нахождения их на местности и дальнейшего использования. Цель статьи заключается в исследовании режима охранной зоны пунктов государственной геодезической сети, государственной нивелирной сети и государственной гравиметрической сети. Научная значимость статьи состоит в определении роли указанной охранной зоны в системе зон с особыми условиями использования территории, а также классификации таких зон. Практическая значимость статьи определена разработанным прогнозом направлений совершенствования режимов охранных зон пунктов государственной геодезической сети, государственной нивелирной сети и государственной гравиметрической сети. Методика исследования включает в себя анализ текущего состояния режима охранной зоны и прогнозирование направления его совершенствования в будущем. Основные выводы статьи указывают на то, что геоинформационные системы играют ключевую роль в предупреждении повреждения и утраты объектов, которые обеспечивают жизнедеятельность человека на территории России; создаются зоны с особыми условиями территории, включая охранные зоны пунктов государственной геодезической сети, государственной нивелирной сети и государственной гравиметрической сети. Своевременное обеспечение их безопасности может гарантировать бесперебойную работу всего государства в целом. Для предотвращения дальнейшей утраты пунктов государственной геодезической сети целесообразно создание единого информационного ресурса (геопортала), отражающего существующие и проектируемые охранные зоны пунктов, в том числе с их представлением в виде 3D-моделей.

Ключевые слова: охранные зоны, пункты государственной геодезической сети, пункты государственной нивелирной сети, пункты государственной гравиметрической сети, зоны с особыми условиями использования территории

Введение

В современном мире наряду с промышленной революцией особую актуальность приобретает гуманизация современного общества, его ориентированность на сохранение окружа-

ющей среды и консолидацию при решении глобальных проблем человечества на международном уровне были созданы организации, деятельность которых направлена на сохранение мира, социальных и культурных ценностей и экосистем, как, например, ООН,

ЮНЕСКО и т. д. В СССР (а позже России) создана система мер защиты обеспечения жизнедеятельности граждан.

Устойчивое региональное развитие в современном мире невозможно без создания системы таких мер.

В данную систему входит создание охранных и защитных зон значимых объектов. В 1917 г. было всего 6 видов таких зон [1], а в настоящее время в России уже 28 [2]. Целью настоящей статьи является исследование режима охранной зоны пунктов государственной геодезической сети, государственной нивелирной сети и государственной гравиметрической сети (далее – государственные сети). Для достижения указанной цели решены задачи:

- проанализированы виды зон с особыми условиями использования территории (ЗОУИТ) в России;
- исследован режим охранных зон государственных сетей в России;
- выполнен прогноз анализ направлений совершенствования режимов охранных зон государственных сетей.

Материалы и методы исследования

1. Анализ видов зон с особыми условиями использования территории (ЗОУИТ) в России.

По-новому представленное в российском законодательстве видение ЗОУИТ имеет прикладной, практический характер. Для того, чтобы систематизировать сведения о зонах, создать теоретическую базу знания о них, необходимо в первую очередь разработать их классификацию. В этом, как и в самом понятии, состоит основа научного знания о ЗОУИТ.

Классификация дает возможность унифицировать понимание сущности зоны для пользователя. Авторы в настоящем исследовании предлагают классификацию видов ЗОУИТ. Зоны с особыми условиями использования территории в России могут быть классифицированы по нескольким основаниям [3] (рис. 1).

Графически классификация зон с особыми условиями использования территорий по контуру установления ограничений отражена на рис. 2: *а* – ЗОУИТ в виде концентрических окружностей; *б* – ЗОУИТ в виде буферной зоны по изломанному контуру; *в* – ЗОУИТ в виде равноудаленной буферной зоны.

Таким образом, в России существуют разнообразные ЗОУИТ, на которых действуют режимы ограничений и запретов, что соответствует мировой тенденции установления режимов использования различных зон, сочетающихся с развитием территории [4, 5].

Рис. 1. Классификация ЗОУИТ в России

Рис. 2. Графические изображения ЗОУИТ:

а) наличие нескольких уровней защиты, установленных законодательно, на каждом из которых имеются различные запреты; б) наличие специального плана территории, на которую необходимо установление зоны; в) наличие единого установленного законодательно режима ограничений, действующего вокруг объекта

2. Исследование режима охранных зон государственных сетей в России.

Охранные зоны государственных сетей, как и сами пункты государственных сетей, в XX в. традиционно могли бы быть отнесены к компонентам обеспечения обороны и безопасности государства. Однако учитывая активное развитие науки, тысячи имеющихся на учете государственных пунктов практически утратили свое стратегическое военное значение и в настоящее время имеют основной целью безопасность эксплуатации гражданских объектов, обеспечивающих жизнедеятельность населения [6]. Их охранные зоны также потеряли стратегическую значимость. Но именно эти пункты принимаются во внимание при создании топографической и кадастровой основы местности, а также при строительстве объектов недвижимости, их реконструкции. Кроме того, они используются также и в специальных видах работ.

Вокруг пунктов опорных межевых сетей ЗОУИТ не создаются, существуют лишь требования к сохранению самого пункта.

В отношении пунктов государственных сетей Российская Федерация предпринимает способы охраны и защиты:

- постоянное совершенствование законодательства в сфере охраны пунктов;
- динамический контроль сохранности органами государственной власти (осуществляют управления Росреестра по регионам);
- контроль сохранности кадастровыми инженерами [7, 8];

– установление охранных зон пунктов государственной сети;

– создание специальной системы допуска к координатам таких пунктов;

– установление юридической ответственности за порчу (уничтожение, повреждение или снос) пунктов государственной сети [9].

С одной стороны, эта информация является закрытой (необходим особый доступ, чтобы получить сведения из федерального фонда пространственных данных), с другой стороны, устанавливаются зоны охраны этих пунктов. Сведения об охранных зонах в соответствии с законодательством России должны отображаться на публичной кадастровой карте, а также в публичных данных Единого государственного реестра недвижимости (ЕГРН). Таким образом, сведения об охранных зонах объектов являются открытыми.

Охранные зоны создаются в отношении всех пунктов государственных сетей, структура которых изображена на рис. 3.

Зоны государственной сети имеют следующие характеристики:

– если пункт установлен в границах контура объекта капитального строительства, сведений о котором нет в ЕГРН, то охрannая зона представляет собой квадрат 4×4 м, центр которого – это центр пункта;

– если пункт установлен в объекте капитального строительства, сведения о котором имеются в ЕГРН, то охрannая зона представляет собой контур этого объекта капитального строительства.

Рис. 3. Виды государственных сетей, в отношении которых создаются ЗОУИТ

Система ограничений включает в себя запреты на использование земельных участков под пунктом или объектом, в котором находится пункт:

- для осуществления видов деятельности, приводящих к повреждению или уничтожению наружных опознавательных знаков пунктов, нарушению неизменности местоположения их центров, уничтожению, перемещению, засыпке или повреждению составных частей пунктов;

- проведение работ, размещение объектов и предметов, которые могут препятствовать доступу к пунктам.

Анализ утраченных пунктов государственной геодезической сети в Новосибирской области в 2018–2019 гг. и установленных охранных зон для примера представлен в табл. 1.

Анализируя данные, приведенные в табл. 1, можно сделать вывод, что наблюдается стабильная тенденция утраты наружных знаков пунктов. Распространенными причинами их утраты являются хозяйственная деятельность человека и вандализм. При отсутствии наружного знака, с учетом особенностей местности и временного фактора, зачастую практически невозможно обнаружить фактическое расположение пункта. В то же время, на кадастровых инженеров возложена ответственность за предоставление информации о состоянии пункта (а также центра и наружного знака). Таким образом, зачастую при утрате наружного знака кадастровый инженер переходит

на другой пункт, не внося сведения об отсутствии/наличии пункта. На наш взгляд, данная особенность не позволяет отразить реальную статистику утраченных пунктов (например, по состоянию на 3 квартал 2019 г. указано отсутствие утраченных полностью пунктов). Также стоит отметить, что в большинстве случаев утраты пунктов и их наружных знаков отсутствовали охранные зоны, которые бы свидетельствовали об особом режиме охраны пункта [10].

Таблица 1

Анализ состояния пунктов государственной геодезической сети и учета их охранных зон в 2018–2019 гг. по Новосибирской области

Показатель	3-й квартал 2018 г.	3-й квартал 2019 г.	Прирост	
			абсолютное значение	относительное значение
Всего пунктов	3 594	3 593	–1	–0,03 %
Утрачено полностью	1	0	–1	–
Утрачены наружные знаки	27	181	154	4,29 %
Поставлено на учет охранных зон	2 458	3 128	670	18,65 %

Кроме того, должен быть установлен единый подход к точности определения координат характерных точек границ охранный зоны госу-

дарственных сетей. Рекомендацией авторов является создание подхода, при котором погрешность в определении местоположения охранной зоны государственных сетей будет составлять не более 0,1 м, независимо от того, на землях какой категории находится этот пункт (в настоящее время они колеблются от 0,1 м в населенных пунктах до 5,0 м на землях лесного фонда, водного фонда и землях запаса) [11].

Таким образом, для сохранения пунктов государственной геодезической сети в России необходимо осуществлять систематическое и полное наблюдение за пунктами этой сети, а также устанавливать их охранные зоны на местности (территориальный) и в публичных источниках информации (геоинформационный метод), а также изменить точность установления охранной зоны государственных сетей [12].

3. Прогнозный анализ направлений совершенствования режимов зон государственных сетей.

Авторы видят возможности совершенствования в следующих направлениях.

1. Проведение систематических разъяснительных работ в средствах массовой информации о необходимости сохранения пунктов и запрете их порчи и уничтожения. Зачастую утрата пунктов и их наружных знаков происходит ввиду из-за осведомленности населения о том, как они выглядят, и их предназначений в совокупности с отсутствием соответствующих информационных табличек.

2. Создание интерактивных карт потенциальных ЗОУИТ [13]. Длительный процесс создания ЗОУИТ (от 4 до 6 месяцев) препятствует тому, чтобы заинтересованные лица были осведомлены о наличии зоны на интересующих их объектах. Именно поэтому идея о создании геоинформационной системы [14] потенциального ограничения территории зонами с особыми условиями использования является качественно новым решением для профилактики утраты государственных сетей. Примерный фрагмент такого геоинформационного источника отображен на рис. 4.

Рис. 4. Фрагмент геоинформационной системы потенциального ограничения ЗОУИТ

На рис. 4 синим цветом показаны границы кадастрового деления территории, коричневым – незастроенная территория, зеленым – охранный зона пункта государственной геодезической сети, голубым – придомовая территория многоквартирных жилых домов.

3. Как видно из режима ограничений, для того, чтобы обеспечить сохранность пункта государственной сети и стабильность его местоположения, запреты в его отношении должны распространяться не только на плос-

кость, но и в объемном пространстве [15]. Эти построения должны выполняться перпендикулярно уровню земли относительно ограничений ЗОУИТ на плоскости. В качестве ограничивающих поверхностей, на наш взгляд, должны быть использованы: снизу – горизонтальная плоскость, на глубине, соответствующей требованиям действующего законодательства о недропользовании; сверху – горизонтальная плоскость, на высоте, предусмотренной требованиями к использованию воз-

душного пространства территории, градостроительства и Воздушного кодекса РФ (графически представлено на рис. 5).

Рис. 5. Пространственное отображение охранной зоны пунктов государственной сети

На рис. 5 синим цветом показаны границы кадастрового деления территории, коричневым – незастроенная территория, зеленым – охранный зона пункта государственной геодезической сети, голубым – придомовая территория многоэтажных жилых домов, красные линии – ребра, описывающие 3D-модель охранной зоны пункта ГГС [16].

Таким образом, охрана пунктов государственной сети состоит в первую очередь в профилактике их утраты и повреждения. Совершенствование режимов зон государственных сетей должно брать свое начало в геоинформационном ресурсе.

Результаты исследования и их обсуждение

В качестве результатов исследования авторами:

- предложена единая классификация ЗОУИТ, которая унифицирует научное знание о них;
- рекомендуется пересмотреть подход к охраняемым зонам геодезических сетей: следует изменить точность установления координат характерных точек границ охранной зоны государственных сетей до погрешности в 0,1 м, независимо от категории земель, на которых находится этот пункт, а также осу-

ществлять системное наблюдение за пунктами государственной геодезической сети с использованием территориального и геоинформационного метода;

- предложены методы совершенствования режимов зон государственных сетей: создание потенциальных ЗОУИТ и формирование их трехмерных моделей в соответствии с предложенным вариантом.

Результаты исследования основаны на возможностях применения геоинформационных технологий для создания зон охраны сетей, предназначенных для выполнения геодезических и картографических работ и обеспечения режимов их сохранности.

Выводы

В результате исследования получены следующие выводы:

- в России существуют разнообразные ЗОУИТ, на которых действуют режимы ограничений и запретов, что соответствует мировой тенденции установления режимов использования окружающей среды, сочетающейся с развитием территории;
- в России осуществляется систематическое и полное наблюдение за пунктами государственной геодезической сети, устанавливаются охранные зоны, которые представляют собой территориальный и геоинформационный способ сохранения пунктов государственной сети и их точности;
- охрана пунктов государственной сети заключается в первую очередь в профилактике их утраты и повреждения. Совершенствование режимов зон государственных сетей должно брать свое начало в геоинформационном ресурсе.

По мнению авторов, охрана пунктов всегда связана с информированием, предупреждением и наказанием. Она может осуществляться органами власти, заинтересованными в безопасности таких объектов, и правоохранительными органами.

Геоинформационные системы играют ключевую роль в предупреждении повреждения и утраты объектов, обеспечивающих жизнедеятельность человека на территории России. В этом же контексте созда-

ются зоны с особыми условиями территории, включая охранные зоны пунктов государственной геодезической сети, государственной нивелирной сети и государствен-

ной гравиметрической сети. Своевременное обеспечение их безопасности может гарантировать бесперебойную работу всего государства в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Золотова О. А. Правовой режим земель охранных зон : автореф. ... канд. юр. наук. – М., 2013. – 26 с.
2. Земельный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/ (дата обращения: 17.11.2019).
3. Лебедев П. П., Сизов А. П., Лукьянова Т. С., Гуров А. Ф. Геонформационный ресурс региона потенциальные земельно-правовые ограничения территории // Московский экономический журнал. – 2018. – № 5(1). – С. 86–92.
4. Abdul Rahoof K. K. Protected Areas: the Past, Present, and Future of Conservation [Electronic resource]. – (2018). – Mode of access: <https://earth.org/protected-areas-the-past-present-and-future-of-conservation/> (дата обращения: 17.11.2019).
5. Databasin.org [Electronic resource]. – Mode of access: databasin.org/maps/new#datasets=f9505b689c24f81802598a7225ee6fd (дата обращения: 17.11.2019).
6. Пархоменко И. В., Зайцева Н. В. О динамике развития режимов охранных зон геодезических пунктов и их установлении (на примере Новосибирской области) // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 5, № 1. – С. 263–273.
7. Аврунев Е. И. Использование активных базовых станций при выполнении кадастровых работ в отношении объектов недвижимости // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 1. – С. 135–145.
8. Аврунев Е. И., Козина М. В., Попов В. К. Исследование факторов стоимости земель урбанизированных территорий // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 130–143.
9. Чилингер Л. Н. Методический подход к установлению границ зон с особым водным режимом: обоснование и технологическая схема реализации // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 222–237.
10. Ширина Н. В., Кононова О. Ю. Актуальность проблемы учета зон с особыми условиями использования территории // Вестник Белгородского государственного технологического университета. – 2014. – № 2. – С. 135–138.
11. Непоклонов В. Б., Хабарова И. А., Хабаров Д. А., Дручинин С. С. Об эффективности государственного кадастрового учета зон с особыми условиями использования территорий // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 200–210.
12. Корнейчук А. И., Семенов В. И. Территориальный план развития как виртуальная реальность // Геодезия и картография. – 2017. – № 10. – С. 40–49.
13. Лебедев П. П. ГИС потенциальных земельно-правовых ограничений территории // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2015. – № 2. – С. 59–63.
14. Дубровский А. В., Ершов А. В. Элементы геоинформационного обеспечения инвентаризационных работ // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 100–112.
15. Аврунев Е. И., Карпик А. П., Варламов А. А. Совершенствование методики контроля качества спутникового позиционирования при создании геоинформационного пространства территориального образования // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 4/С. – С. 185–188.
16. Лисицкий Д. В. Картографическое отображение трехмерных моделей местности // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 98–102.

Получено 23.04.2020

© Д. В. Пархоменко, А. В. Чернов, И. В. Пархоменко, 2020

USE OF GIS POSSIBILITIES FOR CREATION OF NETWORK PROTECTION ZONES

Daria V. Parkhomenko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Cadastre and Territorial Planning, phone: (913)900-19-50, e-mail: dara8@inbox.ru

Alexandr V. Chernov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Cadastre and Territorial Planning, phone: (913)743-09-79, e-mail: avch-1011@mail.ru

Ivan V. Parkhomenko

Department of the Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography in the Novosibirsk Region, 28b Derzhavina St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Deputy Head, e-mail: iv_uy@ngs.ru

The presence of a stable coordinate basis, fixed on the ground by a network of geodetic points is one of the key factors in the single geospace successful formation. Current state of the Novosibirsk region network analysis has shown that a significant amount of outdoor signs points were lost due to the citizens' economical activities and a number of other factors as well. That has caused significant difficulties in using such points. The purpose of this paper is to study state geodetic network, state levelling network and state gravimetric network points' security regime. The scientific significance of this paper is seen as a way to determine the role of the specified security zones in the special territory usage conditions system, as well as the classification of such zones. The practical significance of the article is to forecast possible ways of improving state geodetic network, state levelling network and state gravimetric network points' security regime. The research methodology includes the current security zone regime state analysis as well as forecasting the possible way of its improvement in the future. The main conclusions of this paper indicate that geoinformation systems play a key role in preventing damage and loss of objects which provide human activity on the Russian territory: zones with special conditions are created, which include state geodetic network, state leveling network and state gravimetric network protection zones. Timely provision of their security can guarantee the smooth operation of the entire state as a whole. To prevent of state geodetic network points' further loss, it is necessary to create a united information resource (geoportal), which would reflect the existing and projected security zones using 3D representation.

Keywords: security zones, state geodetic network points, state leveling network points, state gravimetric network points, special condition usage zones

REFERENCES

1. Zolotova, O. A. (2013). Legal regime of protected zones. *Extended abstract of candidate's thesis*. Moscow, 26 p. [in Russian].
2. The Land Code of the Russian Federation. Retrieved from http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/ (accessed 17.11.2019).
3. Lebedev, P. P., Sizov, A. P., Luk'yanova, T. S., & Gurov, A. F. (2018). Geoinformational regional resource: potential land and legal territory restrictions. *Moskovskii ekonomicheskii zhurnal [Moscow Economic Journal]*, 5(1), 86–92 [in Russian].
4. Abdul Rahoof, K. K. (2018). Protected Areas: the Past, Present, and Future of Conversation. Retrieved from <https://earth.org/protected-areas-the-past-present-and-future-of-conservation/> (accessed 17.11.2019).
5. Databasin.org. (n. d.). Retrieved from databasin.org/maps/new#datasets=fd9505b689c24f81802598a7225ee6fd (accessed 17.11.2019).
6. Parkhomenko, I. V., & Zayceva, N. V. (2020). Geodetic station protective zone order development and establishment in novosibirsk region. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 263–273 [in Russian].
7. Avrunev, E. I. (2019). Active base stations usage in the real estate-related cadastral works implementation. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(1), 135–145 [in Russian].
8. Avrunev, E. I., Kozina, M. V., & Popov, V. K. (2018). Investigation of the cost factors of land in urbanized areas. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(2), 130–143 [in Russian].
9. Chilingir, L. N. (2019). Methodological approach to determination of boundaries for the zones with special water regime: substantiation and technological realization scheme. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(3), 222–237 [in Russian].
10. Shirina, N. V., & Kononova, O. Yu. (2014). The relevance of the problem of taking into account areas with special conditions of territory use. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Belgorod State Technological University]*, 2, 135–138 [in Russian].

11. Nepoklonov V. B., Khabarova I. A., Khabarov D. A., & Druchinin S. S. (2018). About efficiency of state cadastral registration of zones with special land use conditions. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 200–210 [in Russian].
12. Korneichuk, A. I., & Semenov, V. I. (2017). The territorial development plan as a virtual reality. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 10, 40–49 [in Russian].
13. Lebedev, P. P. (2015). GIS and potential land and legal territory restrictions. *Zemleustroistvo, kadastr i monitoring zemel' [Land Management, Cadastre and Land Monitoring]*, 2, 59–63 [in Russian].
14. Dubrovskiy, A. V., & Ershov, A. V. (2017). Elements of inventory works geoinformation support. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(4), 100–112 [in Russian].
15. Avrunev, E. I., Karpik, A. P., & Varlamov, A. A. (2014). Improvement of satellite positioning quality control methods in the creation of territorial education geographic information space. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 4/C, 185–188 [in Russian].
16. Lisitsky, D. V. (2012). Mapping of three-dimensional terrain models. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i kartografiya [Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 2/1, 98–102 [in Russian].

Received 23.04.2020

© D. V. Parkhomenko, A. V. Chernov, I. V. Parkhomenko, 2020

УДК 332.62

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-193-204

КОРРЕКТИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ГОСУДАРСТВЕННОЙ КАДАСТРОВОЙ ОЦЕНКИ ЗЕМЕЛЬ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

Татьяна Александровна Соколова

ООО «Ресурсы Сибири», 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Демакова, 27, оценщик, тел. (913)920-42-80, e-mail: resursysibiri@yandex.ru.

Виктор Николаевич Москвин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор кафедры кадастра и территориального планирования, тел. (383)344-31-73, e-mail: mosk46@ngs.ru

Современная система государственной кадастровой оценки (ГКО) в РФ предназначена для массовой оценки объектов недвижимости – для оценки групп объектов, что не позволяет обеспечить должный уровень достоверности кадастровой стоимости (КС) для каждого отдельно взятого объекта, подлежащего кадастровой оценке.

В этой связи особую актуальность приобретает задача разработки научно-методического обеспечения корректирования результатов ГКО, полученных методами массовой оценки. В первую очередь, это касается земельных участков категории «земли населенных пунктов (ЗНП)» – объектов, наиболее вовлеченных в хозяйственный оборот страны.

Данная тема стала основным содержанием настоящей статьи. Представленное в статье научно-методическое обеспечение корректирования результатов ГКО, основанное на экспертно-аналитическом методе оценки – методе сравнения продаж (МСП), новом технологическом решении учета фактора ВРИ при оценке КС, а также принципе соблюдения баланса публичных и частных интересов, – позволяет корректировать результаты ГКО ЗНП, повышая их достоверность в пределах соблюдения баланса интересов государства и пользователей земли, что подтверждается представленными в статье результатами апробации.

Разработка данного научно-методического обеспечения проводилась в соответствии с правовой и методической базами системы ГКО РФ с использованием методов принятия решений: анализа иерархий и экспертных оценок.

Ключевые слова: государственная кадастровая оценка, кадастровая стоимость, земли населенных пунктов, фактор кадастровой стоимости, вид разрешенного использования

Введение

Действующая в настоящее время система ГКО, регулируемая [1, 2], предназначена для массовой оценки объектов недвижимости и не обеспечивает равнозначную степень достоверности КС для *каждого отдельно взятого объекта*, подлежащего кадастровой оценке на всех обширных территориях РФ, что в полной мере подтверждается статистикой оспаривания результатов ГКО.

Согласно данным Росреестра [3] за период с 01.01.2019 по 30.12.2019 в созданные при территориальных органах Росреестра комиссии по рассмотрению споров о результатах определения кадастровой стоимости посту-

пило 41 594 заявления о пересмотре результатов определения КС в отношении 68 997 объектов недвижимости. За тот же период в судах инициировано 22 373 спора о величине КС, внесенной в государственный кадастр недвижимости, в отношении 40 542 объектов недвижимости. В подавляющем большинстве случаев заявления подаются в отношении результатов определения КС земельных участков.

Недостоверность результатов ГКО приводит к вовлечению граждан и юридических лиц в процедуры оспаривания КС, что в конечном итоге способствует нарушению бюджетов различных уровней в части налоговых и иных платежей, определенному социаль-

ному напряжению. Такое положение системы ГКО РФ требует корректирования ее результатов с целью повышения достоверности КС, определенной в рамках ГКО.

Особую актуальность решение данной задачи приобретает для земель населенных пунктов – земель, главным образом определяющих экономические и социальные интересы граждан, бизнеса и государства. Использование земель данной категории служит основной составляющей пополнения бюджета РФ на всех его уровнях.

Предлагаемое в статье научно-методическое обеспечение корректирования результатов ГКО ЗНП – имеет важное экономическое и социальное значение, поскольку позволяет посредством повышения достоверности результатов ГКО обеспечить снижение социальной напряженности, неизбежно возникающей вследствие использования в управлении земельными ресурсами недостоверных значений КС, повысить уровень эффективности государственной системы землепользования, поднять качество научно-методической основы института ГКО РФ.

Предлагаемое в данной статье научно-методическое обеспечение корректирования результатов ГКО ЗНП является результатом исследований авторов в области земельно-оценочных работ, изложенных в [4–11].

Методология

Вопросам, связанным с повышением достоверности кадастровой оценки за счет обоснованного выбора факторов КС ЗНП, корректного определения их значений для расчетных моделей КС, применяемых в рамках ГКО, посвящены работы многих авторов, в том числе [12–17].

Однако, несмотря на ряд успешных разработок, осуществленных в данном направлении, до сих пор не разработано методико-технологическое решение корректирования результатов ГКО ЗНП, позволяющее заинтересованным лицам устранять ошибки ГКО за счет должного учета тех факторов КС, которые, оказывая существенное влияние на величину КС, не находят корректного отражения при проведении указанной оценки. В первую

очередь это касается основополагающего фактора КС ЗНП – фактора «вид разрешенного использования (ВРИ)», который учитывается в рамках ГКО лишь на качественном уровне [2].

Одной из основных и неизбежных причин недостаточной достоверности результатов ГКО ЗНП является применение методов массовой оценки, которые предназначены для оценки групп объектов недвижимости и не позволяют получать достоверные результаты КС для *каждого отдельно взятого* объекта недвижимости, подлежащего ГКО.

Анализ способов и методов, применяемых в рамках ГКО [2], позволяет прийти к выводу о том, что для корректирования результатов ГКО ЗНП, наиболее эффективным способом, обеспечивающим устранение ошибок ГКО и получение достоверных значений КС, является индивидуальный способ оценки, реализуемый методом прямого сравнения продаж (МСП).

МСП является классическим методом оценки рыночной стоимости, широко используемым в мировой и отечественной практике оценки земельных участков в условиях ограниченности рыночных данных, необходимых для применения статистических (массовых) методов оценки. МСП является по своей сути экспертно-аналитическим методом, ориентированным на формализацию мнений экспертов о зависимости стоимости объекта оценки от совокупности влияющих на нее факторов. Метод опирается на анализ цен небольшого числа рыночных сделок с объектами сравнения. При этом объекты сравнения называются объектами-аналогами и отбираются по признаку наибольшей близости к объекту оценки по факторам стоимости – факторам сравнения. Имеющиеся же различия между оцениваемым объектом и объектами-аналогами сглаживаются путем проведения корректировок по каждому фактору каждого объекта-аналога. Стоимость земельного участка рассчитывается как среднее или средневзвешенное значение из скорректированных стоимостей объектов-аналогов.

Применение МСП для корректирования результатов ГКО ЗНП позволяет оценщику провести более глубокий анализ и более

точно учесть те особенности оцениваемых объектов, состояние рынка и социально-экономических факторов, которые, оказывая существенное влияние на формирование величины КС объекта, подлежащего кадастровой оценки, не могут быть учтены при проведении ГКО методами массовой оценки.

Применение МСП также позволяет осуществить количественный учет наиболее значимого фактора КС ЗНП – фактора ВРИ, что в свою очередь, дополнительно обеспечивает повышение достоверности КС ЗНП.

Метод описан в многочисленных отечественных источниках, в том числе в [18]. Модель расчета КС оцениваемого объекта с применением МСП, можно представить формулой

$$\Pi_o = \frac{\sum_{i=1}^n \Pi_{ai} \prod_{j=1}^m \frac{k_{oj}}{k_{aij}}}{n},$$

где Π_o – цена оцениваемого объекта (руб./кв. м);

Π_{ai} – цена продажи i -го аналога (руб./кв. м);

k_{oj} – значение j -го фактора сравнения объекта оценки;

k_{aij} – значение j -го фактора сравнения i -го объекта-аналога;

n – количество аналогов;

m – количество факторов сравнения.

Результаты: научно-методическое обеспечение корректирования результатов ГКО ЗНП

Сегодня законодательство РФ позволяет заинтересованным лицам разрешить проблему недостоверности КС путем использования процедуры пересмотра результатов ГКО в спорном порядке. Данная процедура включена в современную систему ГКО РФ в качестве ее неотъемлемого элемента (рис. 1) [1].

Рис. 1. Система ГКО в РФ

Вместе с тем, до сих пор лица, заинтересованные в пересмотре КС, не обеспечены методической базой корректирования результатов ГКО, в том числе – для ЗНП.

Предлагаемое научно-методическое обеспечение корректирования результатов ГКО ЗНП позволяет корректировать результаты ГКО ЗНП – получать более достоверные значения КС взамен ранее определенных в рамках ГКО, обеспечивая при этом баланс интересов государства и пользователей земли.

Данное научно-методическое обеспечение корректирования результатов ГКО ЗНП, включающее: методику корректирования результатов ГКО ЗНП (Методика), способ количественного учета фактора ВРИ (Способ) и приложение к Способу, предназначенное для количественного учета фактора ВРИ: «производственная деятельность (ПД)» ЗНП г. Новосибирска (Приложение к Способу) – схематично представлено на рис. 2.

Определение КС, в соответствии с предлагаемым научно-методическим обеспечением корректирования ЗНП основано на общих принципах и правилах оценки КС в РФ, установленных в [1, 2, 19–25], требованиях земельного и градостроительного законодательства РФ и г. Новосибирска [26–29]. При разработке данного научно-методического обеспечения также использовались Метод анализа иерархий (МАИ) [30] и результаты аналитических исследований экспертных оценок индексов рынка недвижимости РФ, опубликованные в источниках [31–34].

Предлагаемая Методика корректирования результатов ГКО ЗНП – это поэтапное руководство оценочных работ по определению КС земельного участка, относящегося к категории ЗНП, для дальнейшего ее утверждения в порядке, предусмотренном главой 22 [1] – в спорном порядке.

Несмотря на то, что определение КС, в соответствии с Методикой, основано на общих принципах и правилах оценки КС земельных участков, предусмотренных в РФ, каждый из этапов Методики имеет свои отличительные особенности, обусловленные ее назначением: КС, определяемая в соответствии с *Методикой*, – утверждается в особом (в спорном) порядке.

При этом основными отличительными особенностями предлагаемой методики являются: соблюдение при оценке КС баланса публичных и частных интересов, экспертно-аналитический метод оценки и количественный учет основополагающего фактора КС ЗНП – фактора ВРИ.

Этап 0. На предварительном этапе Методики оценщик должен определить возможность и целесообразность пересмотра КС. Для этих целей необходимо определить надлежащую дату оценки КС, причины недоверности КС и способы их устранения, определить интервал корректирования КС, соответствующий соблюдению баланса публичных и частных интересов. Решение данной задачи осуществляется посредством анализа правоустанавливающих и технических документов оцениваемого объекта, анализа факторов КС оцениваемого объекта и значений данных факторов на дату оценки.

Этап 1. К принципиальным особенностям, которые следует учесть при заключении договора на оценку КС, относятся: согласование с заказчиком оценки даты оценки и критерия соблюдения принципа баланса публичных и частных интересов. В случае проведения оценки на ненадлежащую дату или без соблюдения государственных интересов, вновь определенная КС не будет утверждена для дальнейшего использования в РФ.

На **Этапе 2** оценщик осуществляет осмотр объекта оценки, сбор и анализ информации, документов, необходимых для проведения оценки и составления отчета. Трудность и особенность данного этапа заключается в том, что оценка будет проводиться на дату в прошлом.

Этап 3. Принципиальной особенностью оценки КС, в соответствии с предлагаемой Методикой, является применение расчетной модели КС, реализуемой экспертно-аналитическим методом оценки – МСП.

В рамках Методики для оценки КС ЗНП с использованием МСП отбор аналогов, их сравнение с объектом оценки предлагается проводить по таким факторам КС, как «Вид права», «Условия финансирования», «Условия продажи», «Дата экспозиции», «Местоположение», «Наличие строений», «Возможность подключения к базовым коммуникациям» и «ВРИ».

Рис. 2. Методическое обеспечение корректирования результатов ГКО ЗНП

Учет фактора ВРИ в рамках Методики осуществляется на количественном уровне с использованием технологического решения количественного учета фактора ВРИ, реализованного в Способе и Приложении к Способу, предназначенном для оценки ЗНП г. Новосибирска производственного назначения. Подробное изложение Способа и Приложения к Способу представлено в работе [11].

Особенностью *Этапа 4* является необходимость составления оценочного отчета по

определению КС не только на бумажном носителе, но и в электронном виде, который подписывается усиленной электронной подписью (ЭЦП) оценщика, выполнившего оценку и юридического лица, с которым у оценщика заключен трудовой или гражданский договор.

Результаты апробации предлагаемого научно-методического обеспечения корректирования результатов ГКО ЗНП, полученные в период 2014–2019 гг., представлены в таблице.

Результаты корректирования КС ЗНП

№ п/п	Кадастровый номер	КС1 ¹	КС2 ²	Оценочный отчет
1	54:35:051190:4	95 054 145,60	48 306 849,0	Отчет № 19/04/18/12-РС от 22.06.18
2	54:35:091280:71	106 145 307,27	58 270 000	Отчет № 29/10/25-РС от 22.11.2018
3	54:35:052805:208	45 765 763,44	32 241 743	Отчет № 02/03/18/8-1-РС от 10.09.2018
4	54:35:052805:209	2 701 320	1 899 600	Отчет № 02/03/18/9-1-РС от 10.09.2018
5	54:35:091280:57	10 442 994,18	7 418 287,0	Отчет № 29/06/17/51-3-РС от 09.11.2017
6	54:35:091280:35	29 104 662,48	20 401 597,68	Отчет № 29/06/17/51-РС от 30.09.17
7	54:35:091280:34	6 283 390,0	4 404 490,0	Отчет № 29/06/17/51-1-РС от 26.10.17
8	54:35:091280:42	15 325 188,2131	10 742 551	Отчет № 29/06/17/51-2-РС от 26.10.17
9	54:35:052805:50	5 478 806,45	3 893 475,00	Отчет № 17/11/16/71-РС от 25.01.2017
10	54:35:052805:118	4 896 579,52	3 529 234	Отчет № 17/11/16/68 от 12.04.17
11	54:35:052805:121	14 280 978,40	9 965 155	Отчет № 17/11/16/68 от 12.04.17
12	54:35:052805:123	3 831 331,68	22 913 472	Отчет № 17/11/16/68 от 12.04.17
13	54:35:052805:124	2 281 714,96	1 698 363	Отчет № 17/11/16/68 от 12.04.17
14	54:35:052805:125	7 262 949,04	5 190 511	Отчет № 17/11/16/68 от 12.04.17
15	54:35:052805:129	3 653 985,52	2 641 920	Отчет № 17/11/16/68 от 12.04.17
16	54:35:052805:131	12 681 796,96	8 887 145	Отчет № 17/11/16/68 от 12.04.17
17	54:35:052805: 132	12 325 222,72	8 643 219	Отчет № 17/11/16/68 от 12.04.17
18	54:35:052805: 133	4 707 500,32	3 415 818	Отчет № 17/11/16/68 от 12.04.17
19	54:35:052805:136	7 13 148,48	5 52 939	Отчет № 17/11/16/68 от 12.04.17
20	54:35:052805:137	2 011 582,96	1 502 454	Отчет № 17/11/16/68 от 12.04.17
21	54:35:052805:138	2 155 653,36	1 607 739	Отчет № 17/11/16/68 от 12.04.17
22	54:35:052805:146	2 542 842,56	1 863 840	Отчет № 17/11/16/69-РС от 09.01.2017
23	54:35:052805:148	5 256 768,72	3 853 080	Отчет № 17/11/16/69-РС от 09.01.2017
24	54:35:052805:149	2 191 670,96	1 606 440	Отчет № 17/11/16/69-РС от 09.01.2017
25	54:35:052805:196	3 227 176,96	2 332 216	Отчет № 17/11/16/70-РС от 22.02.2017
26	54:35:091280:6	6 713 461,51	4 857 850	Отчет № 10/10/16/62/1-РС от 17.11.2016
27	54:35:012668:782	4 686 913,20	3 055 926	Отчет № 16/10/15/46 от 16.11.2015
28	54:13:010101:0079	12 938 223,99	1 701 050	Отчет № 01/12/14/97 от 15.12.2014
29	54:35:012605:12	24 156 153,00	5 647 418,00	Отчет № 26/01/15/04-РС от 04.02.2015
30	54:35:062530:323	155 120 059,40	111 739 879,00	Отчет № 06/07/15/35-РС от 20.07.2015
31	54:19:081301:1028	96 441 492,24	7 789 886,00	Отчет № 16/05/15/22 от 16.05.2015

Продолжение таблицы

№ п/п	Кадастровый номер	КС1 ¹	КС2 ²	Оценочный отчет
32	54:35:091280:2014	27 584 082,10	20 007 073,00	Отчет № 3/04/15/10-РС от 27.07.2015
33	54:35:091635:8	24 621 133,12	11 012 189,00	Отчет № 06/03/14/7-РС от 19.03.2014
34	54:35:014250:30	18 846 415,80	7 481 127	Отчет № 10/04/14/18-РС от 24.04.2014
35	54:35:091865:0011	35 985 279,20	13 399 391,00	Отчет № 07/05/14/21-РС от 07.05.2014
36	54:35:062530:330	11 535 016,36	5 289 136,00	Отчет №10/04/14/19-РС от 20.04.2014
37	54:35:012668:174	29 948 220,17	1 251 785,00	Отчет 09/06/14/26-РС от 09.06.2014
38	54:35:012668:42	34 075 936,56	3 882 154,00	Отчет 09/06/14/26-РС от 09.06.2014
39	54:35:012668:378	13 318 926,0	5 922 597,00	Отчет 09/06/14/26-РС от 09.06.2014
40	54:35:051350:44	36 307 973,85	12 777 103,00	Отчет №16/07/14/35-РС от 16.07.2014
41	54:35:092450:21	19 394 250,25	2 040 000,00	Отчет № 19/07/14/40-РС от 19.07.2014
42	54:35:092450:15	10 244 070,86	2 479 997	Отчет № 19/07/14/41-РС от 19.07.2014
43	54:35:091870:17	44 499 137,92	6 321 632	Отчет № 19/07/14/42-РС от 28.07.2014
44	54:35:092450:75	37 321 399,83	14 045 201	Отчет № 19/07/14/42-РС от 28.07.2014
45	54:35:092450:65	3 512 813,92	1 342 972	Отчет № 19/07/14/42-РС от 28.07.2014
46	54:35:092450:42.	54 75 046,50	2 148 963,00	Отчет № 19/07/14/42-РС от 28.07.2014
47	54:07:041501:1698	4 456 470	1 17 660,00	Отчет № 03/06/14/31-РС от 17.06.2014
48	54:35:084700:43	34326781,67	12 166 497,54	Отчет № 10/10/14/74-РС от 30.10.2014 ООО «Альянс»
49	54:35:091050:113	36 074 856,95	4 556 405,00	Отчет № 03/06/14/29-РС от 20.06.2014
50	54:35:091050:115	28 173 362,25	3 953 810,00	Отчет № 04/07/14/34-РС от 04.07.2014

Примечания:

¹ Кадастровая стоимость, установленная по результатам ГКО.² Кадастровая стоимость, определенная в соответствии с предлагаемым методическим обеспечением.

Заключение

Результаты апробации разработанного автором научно-методического обеспечения корректирования результатов ГКО ЗНП, осуществленной в период 2014–2019 гг. в рамках переоценок в спорном порядке КС земельных участков г. Новосибирска, представленные в таблице, позволяют сделать следующие выводы.

Предлагаемое научно-методическое обеспечение, основанное на экспертно-аналитическом методе оценки – методе прямого сравнения продаж, технологическом решении задачи количественного учета фактора ВРИ –

одного из наиболее значимых в КС ЗНП, является эффективным инструментарием, обеспечивающим повышение достоверности результатов ГКО ЗНП до уровня сохранения баланса интересов государства и пользователей земли.

Использование представленного обеспечения для корректирования результатов ГКО ЗНП позволяет устранять ошибки массовой кадастровой оценки, допущенные в ходе ГКО ЗНП, – учитывать те значимые факторы КС и в первую очередь фактор ВРИ, которые, оказывая существенное влияние на величину КС, не учитываются в рамках ГКО РФ должным образом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О государственной кадастровой деятельности в Российской Федерации [Электронный ресурс] : федер. закон от 03.07.2016 № 237-ФЗ. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. Методические указания «О государственной кадастровой оценке» [Электронный ресурс] : приказ Министерства экономического развития в РФ от 12.05.2017 № 226. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

3. Официальный сайт Росреестра РФ [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-информационной системы «Яндекс».
4. Москвин В. Н., Бойков К. С., Новоселов Ю. А., Соколова Т. А. Оценка кадастровой и рыночной стоимости объектов недвижимости экспертными методами // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 4/С. – С. 189–194.
5. Москвин В. Н., Соколова Т. А., Беристенов А. Т. Специфика экспертной оценки и переоценки кадастровой и рыночной стоимости объектов недвижимости // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5/С. – С. 113–118.
6. Москвин В. Н., Соколова Т. А. Проблемы и перспективы переоценки кадастровой стоимости земельных участков в судебном порядке // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 113–118.
7. Москвин В. Н., Соколова Т. А. Проблемы и перспективы переоценки кадастровой стоимости земельных участков в судебном порядке // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 3. – С. 157–166.
8. Москвин В. Н., Жаров А. В., Соколова Т. А., Ланшакова Н. В. Специфика оценки кадастровой и рыночной стоимости объектов жилого и нежилого фондов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 179–187.
9. Москвин В. Н., Соколова Т. А. Методика экспертной оценки земель населенных пунктов производственного назначения для оспаривания их кадастровой стоимости в комиссии Росреестра и в суде // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 185–199.
10. Москвин В. Н., Соколова Т. А. Оспаривание кадастровой стоимости земель населенных пунктов производственного назначения // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 2. – С. 134–147.
11. Соколова Т. А. Учет фактора «вид разрешенного использования» при экспертной оценке кадастровой стоимости земель населенных пунктов // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Вып. 1 (24). – С. 220–236.
12. Власов А. Д., Жарников В. Б. Методологические основы определения рыночной и кадастровой стоимости застроенных земельных участков населенных пунктов // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 1. – С. 158–173.
13. Дубровский А. В., Подрядчикова Е. Д. К вопросу совершенствования системы оценки недвижимого имущества на основе расчета показателя социальной комфортности // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 4/С. – С. 153–157.
14. Дубровский А. В., Попп Е. А. Особенности формирования рыночной стоимости жилой недвижимости в городах разных классификационных групп // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 2. – С. 112–117.
15. Тригубец О. А., Киселев В. А. О необходимости учета зон геодинамически активных разломов при кадастровой оценке земель населенных пунктов // Записки Горного института. – Т. 199. – СПб. : Санкт-Петербургский горный университет, 2012. – С. 320–324.
16. Чернецкая Ю. В. Кадастровая оценка земельных участков индивидуальной жилой застройки земель населенных пунктов с учетом обременений и ограничений : автореферат дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2014. – 143 с.
17. Шабаетова Ю. И. Кадастровая оценка земель индивидуальной жилой застройки с учетом дифференциации городской территории по престижности : автореферат дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2015. – 159 с.
18. Медведева О. Е. Методические рекомендации по оценке стоимости земли. – М., 2004. Методика утверждена и введена в действие Методическим советом АНО «Союзэкспертиза» ТПП РФ, Протокол № 1 от 12.11.2004 г. Информация о методике внесена в базу данных АНО «Союзэкспертиза» ТПП РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ocenchik.ru/site/met/medvedeva.rar>.

19. Об оценочной деятельности в Российской Федерации [Электронный ресурс] : федер. закон от 29.07.1998 № 135-ФЗ. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
20. Федеральный стандарт оценки «Общие понятия оценки, подходы и требования к проведению оценки (ФСО № 1)» [Электронный ресурс] : приказ Министерства экономического развития Российской Федерации от 20.05.2015 № 297. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
21. Федеральный стандарт оценки «Цель оценки и виды стоимости (ФСО № 2)» [Электронный ресурс] : приказ Министерства экономического развития Российской Федерации от 20.05.2015 № 298. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
22. Федеральный стандарт оценки «Требования к отчету об оценке (ФСО № 3)» [Электронный ресурс] : приказ Министерства экономического развития Российской Федерации от 20.05.2015 № 299. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
23. Федеральный стандарт оценки «Оценка недвижимости (ФСО № 7)» [Электронный ресурс] : приказ Министерства экономического развития Российской Федерации от 25.09.2014 № 611. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
24. Федеральный стандарт оценки «Определение кадастровой стоимости (ФСО № 4)» [Электронный ресурс] : приказ Министерства экономического развития Российской Федерации от 22.10.2010 № 508. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
25. Методические указания по государственной кадастровой оценке земель населенных пунктов [Электронный ресурс] : приказ Министерства экономического развития и торговли РФ от 15.02.2007 № 39. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
26. Об утверждении классификаторов видов разрешенного использования земельных участков [Электронный ресурс] : приказ Минэкономразвития России от 01.09.2014 № 540. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
27. Земельный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс] : федер. закон от 25.10.2001 № 136-ФЗ. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
28. Градостроительный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс] : федер. закон от 29.12.2004 № 190-ФЗ. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
29. Правила землепользования и застройки г. Новосибирска, утв. Решением Совета депутатов г. Новосибирска от 24 июня 2009 г. № 1288 в ред. 24.06.2009 № 1288 [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
30. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М. : Радио и связь, 1993. – 278 с.
31. Вольнова В. А. Обзор вариантов расчета корректировок при оценке недвижимости сравнительным подходом. – Новосибирск : СГУВТ, 2015. – 53 с.
32. VescoGroup. Факторы, влияющие на цену земли под логистику [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vesco.ru/statji/factory-vliyayushhie-na-stoimost-zemli/>.
33. Справочник оценщика недвижимости. Т. 3: Корректирующие коэффициенты для оценки земельных участков / под ред. Лейфера. – Нижний Новгород : ЗАО «Приволжский центр финансового консалтинга и оценки», 2014. – 25 с.
34. Экспертная оценка индексов рынка Новосибирской области IV квартала 2014 г. Некоммерческое партнерство «Новосибирская Региональная Коллегия Оценщиков». – Новосибирск : Изд-во НП «Новосибирская РКО», 2014.

Получено 21.04.2020

© Т. А. Соколова, В. Н. Москвин, 2020

CORRECTING THE STATE CADASTRAL ASSESSMENT RESULTS OF LOCAL RESIDENTIAL LANDS

Tatiana A. Sokolova

LLC "Resources of Siberia", 15, Demakova St., Novosibirsk, 630128, Russia, Appraiser, phone: (913)920-42-80, e-mail: resursysibiri@yandex.ru

Victor N. Moskvina

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Department of Cadastre and Territorial Planning, phone: (383)344-31-73, e-mail: mosk46@ngs.ru

The modern system of state cadastral assessment (SCA) in Russia is designed for mass valuation of real estate – to evaluate groups of objects, which does not allow to ensure the proper reliable level of cadastral value (CV) for each individual object which is the subject to cadastral assessment. In this regard, the task of developing scientific and methodical support for correcting the results of the SCA obtained by mass assessment methods becomes particularly relevant. First of all, this applies to land plots of the category "residential lands" (RL) – objects that are most involved in the economic turnover of the country. This topic has become the main content of this article. The scientific and methodological provision of correcting the results of the SCA, based on the expert analytical method of evaluation - the sales comparison method (SCM), the new technological decision of accounting for the factor of VIR in the assessment of the CV, as well as the principle of compliance with the balance of public and private interests – allows to correct the results of the SCA of RL, increasing their reliability within the balance of interests of the state and land users, which is confirmed by the results of the article. The development of this scientific and methodical provision was carried out in accordance with the legal and methodical frameworks of the Russian SCA RF system using decision-making methods: analysis of hierarchies and expert assessments.

Keywords: state cadastral assessment, cadastral value, land settlements, cadastral value factor, type of authorized use

REFERENCES

1. Federal Law of 03.07.2016 No. 237–FZ. On the state cadastral activity in the Russian Federation. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
2. Order of the Ministry of Economic Development in the Russian Federation of December 05, 2017 No. 226. Methodological instructions "On the state cadastral assessment". Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
3. Official site of the Russian State Register. (n. d.). Retrieved from Yandex reference information system.
4. Moskvina, V. N., Boykov, K. S., Novoselov, Yu. A., & Sokolova, T. A. (2014). Evaluation of the cadastral and market value of real estate objects by expert methods. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 4/S, 189–194 [in Russian].
5. Moskvina, V. N., Sokolova, T. A., & Beristenov, A. T. (2015). Specificity of expert assessment and revaluation of the cadastral and market value of real estate. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 5/S, 113–118 [in Russian].
6. Moskvina, V. N., & Sokolova, T. A. (2015). Problems and prospects of revaluation of the cadastral value of land plots in court. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(29), 113–118 [in Russian].
7. Moskvina, V. N., & Sokolova, T. A. (2015). Problems and prospects of revaluation of the cadastral value of land plots in court. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2015: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 3. Ekonomicheskoe razvitie Sibiri i Dal'nego Vostoka. Ekonomika prirodnopol'zovaniia, zemleustroistvo, lesoustroistvo, upravlenii e nedvizhimost'iu [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2015: International Scientific Conference: Vol. 3. Economic Development of Siberia and the Far East. Environmental Economics, Land Management, Forestry Management and Property Management]* (pp. 157–166). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
8. Moskvina, V. N., Zharov, A. V., Sokolova, T. A., & Lanshakova, N. V. (2016). The specifics of assessing the kadastrov and market value of residential and non-residential funds. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Ekonomicheskoe razvitie Sibiri i Dal'nego Vostoka. Ekonomika prirodnopol'zovaniia, zemleustroistvo, lesoustroistvo, upravlenii e nedvizhimost'iu [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: Vol. 2. Economic Development of Siberia and the Far East. Environmental Economics, Land Management, Forestry Management and Property Management]* (pp. 179–187). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

9. Moskvina, V. N., & Sokolova, T. A. (2018). Methodology of expert assessment of industrial settlement lands for judicial disputes over their cost in Rosregister Committee and in court. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(2), 185–199 [in Russian].
10. Moskvina, V. N., & Sokolova, T. A. (2018). Challenging the cadastral value of land for industrial purposes. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2018: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Ekonomicheskoe razvitie Sibiri i Dal'nego Vostoka. Ekonomika prirodopol'zovaniia, zemleustroistvo, lesoustroistvo, upravlenii e nedvizhimost'iu [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2018: International Scientific Conference: Vol. 2. Economic Development of Siberia and the Far East. Environmental Economics, Land Management, Forestry Management and Property Management]* (pp. 134–147). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
11. Sokolova, T. A. (2019). Account of the "Type of permitted use" factor under evaluation of the cadastral value of the human settlement. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(24), 220–236 [in Russian].
12. Vlasov, A. D., & Zharnikov, V. B. (2019). Methodological basis for the definition of market and cadastral value of land plots of settlements. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(1), 158–173 [in Russian].
13. Dubrovsky, A. V., & Podryadchikova, E. D. (2014). On the issue of improving the real estate appraisal system based on the calculation of the indicator of social comfort. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 4/S, 153–157 [in Russian].
14. Dubrovsky, A. V., & Popp, E. A. (2018). Features of the formation of the market value of residential real estate in cities of different classification groups. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2018: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Ekonomicheskoe razvitie Sibiri i Dal'nego Vostoka. Ekonomika prirodopol'zovaniia, zemleustroistvo, lesoustroistvo, upravlenii e nedvizhimost'iu [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2018: International Scientific Conference: Vol. 2. Economic Development of Siberia and the Far East. Environmental Economics, Land Management, Forestry Management and Property Management]* (pp. 112–117). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
15. Trigubets, O. A., & Kiselev, V. A. (2012). On the need to take into account the zones of geodynamically active faults in the cadastral assessment of the lands of settlements. *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 199, 320–324 [in Russian].
16. Chernetskaya, Yu. V. (2014). Cadastral valuation of land plots of individual residential development of land in settlements, taking into account encumbrances and restrictions. *Extended abstract of candidate's thesis*. Saint Petersburg, 143 p. [in Russian].
17. Shabaeva, Yu. I. (2015). Cadastral valuation of land for individual residential development, taking into account the differentiation of the urban area by prestige. *Extended abstract of candidate's thesis*. Saint Petersburg, 159 p. [in Russian].
18. Medvedeva, O. E. (2004). Guidelines for assessing the value of land. Moscow. Retrieved from <http://www.ocenchik.ru/site/met/medvedeva.rar> [in Russian].
19. Federal Law of July 29, 1998 No. 135–FZ. On the appraisal activity in the Russian Federation. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
20. Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation of May 20, 2015 No. 297. On the approval of the Federal Standard of Evaluation "General concepts of assessment, approaches and requirements for evaluation (FSO No. 1)". Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
21. Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation of May 20, 2015 No. 298. Federal valuation standard "The purpose of valuation and types of value (FSO No. 2)". Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
22. Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation of May 20, 2015 No. 299. Federal assessment standard "Requirements for the assessment report (FSO No. 3)". Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
23. Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation of September 25, 2014. Federal appraisal standard "Real estate appraisal (FSO No. 7)". Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
24. Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation of October 22, 2010 No. 508. Federal valuation standard "Determination of cadastral value (FSO No. 4)". Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
25. Order of the Ministry of Economic Development and Trade of the Russian Federation No. 39 of February 15, 2007. On approval of methodical instructions on state cadastral valuation of the lands of settlements. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].

26. Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation of September 01, 2014 No. 540. On approval of classifiers of types of permitted use of land plots. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
27. Federal Law of October 25, 2001 No. 136-FZ. The Land Code of the Russian Federation. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
28. Federal Law of December 29, 2004 No. 190-FZ. Town-planning code of the Russian Federation. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
29. Decision of the Council of Deputies of the city of Novosibirsk of June 24, 2009 No. 1288 (as amended June 24, 2009 No. 1288). Rules for land use and development of Novosibirsk, approved. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
30. Saati, T. L. (1993). *Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy [Decision making. Hierarchy analysis method]*. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 278 p. [in Russian].
31. Vol'nova, V. A. (2015). *Obzor variantov rascheta korrektirovok pri otsenki nedvizhimosti sravnitel'nyy podkhodom [An overview of options for calculating adjustments for real estate valuation using a comparative approach]*. Novosibirsk: SGUVT Publ., 53 p. [in Russian].
32. VescoGroup (n. d.). Factors affecting the price of land for logistics. Retrieved from <http://vesco.ru/statji/factory-vliyayushhie-na-stoimost-zemli/> [in Russian].
33. Leifer. (Ed.). (2014). *Spravochnik otsenshchika nedvizhimosti: T. 3, Korrektiruyushchie koeffitsienty dlya otsenki zemel'nykh uchastkov [Real estate appraiser reference book: T. 3, Corrective factors for the assessment of land plots]*. Nizhny Novgorod: ZAO "Privolzhskiy tsentr finansovogo konsaltinga i otsenki" Publ., 25 p. [in Russian].
34. *Ekspertnaya otsenka indeksov rynka Novosibirskoy oblasti IV kvartala 2014 g. Nekommercheskoe partnerstvo "Novosibirskaya Regional'naya Kollegiya Otsenshchikov" [Expert assessment of the market indices of the Novosibirsk region for the IV quarter of 2014. Non-profit partnership "Novosibirsk Regional Board of Appraisers"]*. (2014). Novosibirsk: NP "Novosibirskaya RKO" Publ. [in Russian].

Received 21.04.2020

© T. A. Sokolova, V. N. Moskvina, 2020

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 681.7

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-205-212

КОМПЕНСАЦИЯ АСТИГМАТИЗМА В БЛОКЕ ВРЕМЕННОГО РАСШИРЕНИЯ ИМПУЛЬСА КАНАЛА НАКАЧКИ МОЩНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ

Алексей Викторович Лаптев

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 15Б, младший научный сотрудник, e-mail: alex_laptev@ngs.ru

Глеб Владимирович Купцов

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 15Б; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, младший научный сотрудник, e-mail: kuptsov.gleb@gmail.com

Владимир Анатольевич Петров

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 15Б; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, младший научный сотрудник, e-mail: petrov.nstu@gmail.com

Виктор Валерьевич Петров

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 15Б; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: vpetv@laser.nsc.ru

Для эффективного лазерного усиления и предотвращения пробоя оптических элементов в лазерных системах, использующих принцип усиления чирпированных импульсов, необходимо компенсировать искажения волнового фронта излучения, вызванные астигматизмом дифракционных решеток стретчера. На основе теории распространения гауссова пучка в пространстве и оптических элементах системы проведено моделирование двухлинзового телескопа для определения оптимального расстояния между линзами и значения углов их поворота, дано сравнение с экспериментальными данными. Полученные результаты могут быть использованы для снижения влияния эффекта астигматизма на качество пространственного профиля излучения при создании лазерных систем с элементами, вносящими значительный астигматизм.

Ключевые слова: мощный лазер, лазерный усилитель, компенсация астигматизма, диодная накачка, волновой фронт, гауссовы пучки, стретчер

Введение

Развитие современных лазерных систем с высокой пиковой и средней мощностью на

основе сред, активированных трехвалентными ионами иттербия, накачиваемых узкополосным излучением диодных лазеров, позволили достичь энергии импульсов на уровне

100 мДж и 1 Дж для импульсов наносекундной и пикосекундной длительности при частоте следования 1 кГц и 500 Гц, соответственно [1, 2]. Преимуществом этих сред по сравнению с другими лазерными средами является большее время жизни верхнего лазерного уровня, что позволяет масштабировать энергию импульса при меньшем уровне накачки, а также низкий квантовый дефект (менее 1 %). Такие системы создаются для научных исследований по ускорению протонов и ионов [3], для создания компактных источников когерентного излучения в дальнем ультрафиолетовом диапазоне и рентгеновской области [4–6], для генерации ультракоротких импульсов в ультрафиолетовом и среднем инфракрасном диапазонах спектра [7, 8], для медицинских целей [9].

При генерации ультракоротких импульсов, как правило, в схеме лазера используются пара призм для компенсации дисперсии групповых скоростей и конфигурации резонатора с остаточным астигматизмом пучка на выходном зеркале. Для увеличения мощности ультракоротких импульсов широко применяется метод усиления чирпированных импульсов. Этот метод подразумевает усиление импульсов, предварительно модулированных по фазе в оптическом блоке временного расширения импульса – стретчере. При больших пиковых мощностях импульсов используют стретчеры на дифракционных решетках, которые определяют величину астигматичности излучения, поступающего в усилительные лазерные каскады. Для эффективного лазерного усиления излучения и предотвращения пробоя оптических элементов является актуальной задача компенсаций искажений волнового фронта, вызванных астигматизмом решеток. Теме компенсации астигматизма в лазерных системах, обусловленного решеточным стретчером или компрессором, посвящено не так много работ, и исследования в этой области остаются актуальными. Компенсация астигматизма в лазерном резонаторе, в котором активный элемент расположен под углом Брюстера, а также в лазерном резонаторе с синхронизацией мод, в котором активный элемент расположен по нормали, исследованы в работах [10–15].

В Институте лазерной физики разрабатывается лазерная система с высокой средней и пиковой мощностью, на основе сред, активированных иттербием, генерирующая импульсы с частотой следования 1 кГц [16–19].

Структурно система состоит из задающего генератора (ЗГ) на лазерной керамике Yb:YAG при температуре жидкого азота, блока временного расширения импульсов (БРИ) на дифракционных голографических решетках и двухлинзового телескопа, блока предварительного усиления на основе регенеративного усилителя (РУ) на кристалле Yb:KYW. Затем следует блок спектрального уширения импульса, далее излучение разделяется на два параллельных канала: параметрического усиления и накачки, в котором масштабируется энергия импульса по принципу лазерного усиления. Канал параметрического усиления включает параметрический усилитель и компрессор. Канал накачки состоит из шестипроходного усилителя при комнатной температуре активных элементов и криогенного многопроходного усилителя на кристаллах Yb:YAG. Ожидаемые выходные энергетические параметры импульса в канале накачки 300 мДж.

Методы

Пространственные параметры пучка после БРИ определяются взаимным расположением дифракционных решеток в пространстве и параметрами линзового телескопа. В свою очередь, расположение решеток определяется из требований к временному профилю импульсов на входе в РУ. Проведенные расчеты показали, что для достижения требуемой длительности в 400 пс по уровню $\frac{1}{2}$ на входе в РУ расстояние между ЗГ и БРИ должно составлять 1,5 м, угол падения на первую дифракционную решетку 62° , расстояние между решетками по перпендикуляру 2 м, расстояние от второй решетки до возвратного зеркала (рис. 1) по дифрагированному лучу – 4 м. Обе решетки являются идентичными и имеют период $1/1\ 700$ мм.

Излучение на выходе ЗГ обладает слабым астигматизмом, обусловленным конфигурацией резонатора и активным элементом, рас-

положенным под углом Брюстера. Необходимо отметить, что параметр качества пучка M^2 на выходе из ЗГ равен 1,5 и 1,7 для С (вертикальной) и Т (горизонтальной) плоскостей, соответственно. После прохождения стретчера в БРИ астигматизм пучка становится выраженным и приводит к невозможности сформировать пятно в активном элементе усилителя с площадью, обеспечивающей достаточный

коэффициент лазерного усиления. Для компенсации как внутриврезонаторного астигматизма в ЗГ, так и астигматизма, возникающего в излучении при прохождении стретчера в БРИ, предложено использовать телескоп, состоящий из двух фокусирующих сферических линз L_1 и L_2 , расположенный после стретчера перед РУ. Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Рис. 1. Схема эксперимента:

1 – задающий генератор; 2 – блок временного расширения импульса (D_1 и D_2 – дифракционные решетки; В – возвратное зеркало); 3 – двухлинзовый телескоп

Возвратное зеркало обеспечивает второй обход излучения через решетки посредством смещения луча по высоте.

С помощью теории параксиального приближения распространения гауссова пучка в пространстве, дифракции на голографических решетках и прохождения через тонкую линзу определялась ABCD матрица прохода излучения от задающего генератора до регенеративного усилителя.

Комплексный параметр q гауссова пучка определяется формулой [20]

$$q = \frac{1}{R} - j \cdot \frac{\lambda \cdot M^2}{\pi \cdot W^2}, \quad (1)$$

где R – радиус кривизны волнового фронта; λ – длина волны; W – радиус пучка; M^2 – параметр качества лазерного пучка.

Если обозначить q_1 – комплексный параметр пучка после ЗГ, а q_2 – перед РУ, тогда

$$q_2 = \frac{A \cdot q_1 + B}{C \cdot q_1 + D}, \quad (2)$$

где A, B, C, D – элементы матрицы обхода через оптическую систему.

Приравнивая действительную и мнимую часть выражений (1) и (2), получаем выражения для R_2 и W_2

$$R_2 = \frac{D^2 - C^2 \cdot q_1^2}{B \cdot D - A \cdot C \cdot q_1^2}; \quad (3)$$

$$W_2 = \frac{-j \cdot \lambda \cdot (D^2 - C^2 \cdot q_1^2)}{\pi \cdot q_1}. \quad (4)$$

Обозначив расстояние между линзами компенсирующего телескопа L_1 и расстояние до положения перетяжки после телескопа L_2 , из выражения (3), установив уравнение $1/R_2 = 0$, определим положение перетяжки после телескопа, как функцию расстояния между линзами, далее из (4) – радиус пучка в перетяжке, для сагиттальной (С) и тангенциальной (Т) плоскости. Т-плоскость – это плоскость, содержащая оси пучка и нормаль к поверхности; С-плоскость перпендикулярна Т-плоскости.

На рис. 2 представлены зависимости положения перетяжки от телескопа и их диаметр для С- и Т-плоскости как функции расстояния между линзами телескопа, для нормального падения излучения на линзу L_1 ($f_1 = 636$ мм) и наклонного падения на линзу L_2 ($f_2 = 171$ мм) в Т-плоскости ($4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ$).

Рис. 2. Рассчитанные зависимости параметров перетяжки пучка после телескопа от расстояния между линзами:
а) положение перетяжки; б) радиус перетяжки

На рис. 2 кривые для различных углов падения на линзу L_2 в Т-плоскости обозначены А) 4°; Б) 6°; В) 8°; Г) 10°, соответственно.

Из рис. 2, а – А и рис. 2, б – А следует, что при нормальном падении излучения на линзу L_1 и наклонном падении на линзу L_2 в Т-плоскости (4°), можно определить такое расстояние между линзами, чтобы положение перетяжек для С- и Т-плоскостей совпали, при этом имеется возможность сфокусировать пучок в требуемый диаметр около 3 мм.

Эксперимент

Для параметров системы, указанных в разделе «Методы», диаметр пучка после двойного прохода через стретчер составляет примерно 10 мм по уровню $\frac{1}{2}$. Для последующего усиления импульса в регенеративном усилителе необходимо, чтобы диаметр входного пучка был не более 3 мм по уровню $\frac{1}{2}$. Первая линза L_1 телескопа расположена на расстоянии 3 м от дифракционной решетки D_1 , а вторая линза L_2 , расположенная на подвижке с микровинтом, находилась на расстоянии 83 см от L_1 . Следует отметить, что поворотом линзы L_1 в двух плоскостях можно достичь компенсации астигматизма перед второй линзой L_2 , однако это не обеспечивает компенсацию астигматизма после телескопа, так как параметр M^2 и диаметры пучка в перетяжке,

расположенной внутри телескопа, принимают разные значения.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости положения перетяжек (а) и их диаметров (б) после телескопа как функция смещения линзы L_2 вдоль оси луча, для С- и Т-плоскостей, падение излучения на первую линзу соответствует нормальному, углы падения на вторую линзу для С- и Т-плоскостей 0° и 4°, соответственно. Диаметр пучка определялся с помощью CCD камеры, точность определения диаметра составляет ± 14 мкм.

Экспериментально определено, положение линзы L_2 относительно линзы L_1 (около 11,5 мм), при котором положение перетяжек в С- и Т-плоскостях совпадает с абсолютной погрешностью не более 2 см, величины диаметров пучка 1,15 и 1,29 мм для С- и Т-плоскостей, соответственно. Различия в расчетных и экспериментальных данных, представленных на рис. 2 (а, б) А и рис. 3 (а, б), определяются: во-первых, большим размером пучка на линзе L_1 (диаметр пучка около 10 мм по уровню $\frac{1}{2}$), что затрудняет установить ее по нормали к лучу с достаточной точностью, во-вторых, точностью установки расстояний между линзами телескопа, которая составляет около 5 мм, в-третьих, точностью определения положения перетяжки после телескопа, составляющей примерно 5 % от величины конфокального параметра.

Рис. 3. Экспериментальные зависимости параметров перетяжки пучка после телескопа как функция смещения положения линзы L_2 вдоль оси луча.

Квадраты и треугольники обозначают С- и Т-плоскости, соответственно:

а) положение перетяжки; б) диаметр перетяжки

Результаты и заключение

Предложен метод по компенсации астигматизма с помощью двухлинзового телескопа на основе теории распространения гауссова пучка в пространстве и оптических элементах, проведено моделирование двухлинзового телескопа для определения оптимального расстояния между линзами и значений углов их поворота в двух плоскостях. Полученные данные согласуются с экспериментальными результатами. Проведена ком-

пенсация астигматизма в блоке временного расширения импульса в канале накачки лазерной системы с высокой средней и пиковой мощностью для эффективного лазерного усиления излучения и предотвращения пробоя оптических элементов.

Полученные результаты могут быть использованы для снижения влияния эффекта астигматизма на качество пространственного профиля излучения при создании лазерных систем с элементами, вносящими значительный астигматизм.

Работа поддержана программой Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их взаимодействие с веществом» (№ АААА-А18-118040290036-4), частично проектами РФФИ (20-02-00529-а) и РФФИ-Новосибирской области (19-42-543007), Минобрнауки РФ (№ АААА-А17-117030310296-7).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Larionov M., Neuhaus J. Regenerative thin disk amplifier with a pulse energy of 120 mJ at 1 kHz // Advanced Solid State Lasers OSA. – 2014 – ATh2A.51. doi: <https://doi.org/10.1364/ASSL.2014.ATh2A.51>.
2. Baumgarten C. et al. 1 J, 0.5 kHz repetition rate picosecond laser // Optics Letters. – 2016. – Vol. 41 (14). – P. 3339–3342. doi: <http://dx.doi.org/10.1364/OL.41.003339>.
3. Funchs J. et al. Review of high-brightness proton & ion acceleration using pulsed lasers // Proceedings of HB2006. – 2016. – THAY04. – P. 319–323.
4. Reagan B. A., Berrill M., Wernsing K. A., Baumgarten C., Woolston M., Rocca J. J. High-average-power, 100-Hz-repetition-rate, tabletop soft-x-ray lasers at sub-15-nm wavelengths // Phys. Rev. A. – 2014. – Vol. 89. – P. 53820. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.89.053820>.
5. Alessi D., Martz D. H., Wang Y., Berrill M., Luther B. M., Rocca J. J. Gain-saturated 10.9 nm tabletop laser operating at 1 Hz repetition rate // Opt. Lett. – 2010. – Vol. 35. – P. 414–416. doi: <https://doi.org/10.1364/OL.35.000414>.

6. Pupeza I. S. et al. Compact high-repetition-rate source of coherent 100 eV radiation // *Nat. Photonics* – 2013. – Vol. 7. – P. 608–612. doi: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.156>.
7. Fattahi H. et al. Third-generation femtosecond technology // *Optica*. – 2014. – Vol. 1. – P. 45–63. doi: <https://doi.org/10.1364/OPTICA.1.000045>.
8. Schmidt B. E. et al. Frequency domain optical parametric amplification // *Nat. Commun.* – 2014. – Vol. 5. – P. 1–8. doi: <https://doi.org/10.1038/ncomms4643>.
9. Zeil K. et al. Dose-controlled irradiation of cancer cells with laser-accelerated proton pulses // *Appl. Phys. B*. – 2013. – Vol. 110 (4). – P. 437–444. doi: [10.1007/s00340-012-5275-3](https://doi.org/10.1007/s00340-012-5275-3).
10. Kogelnik H. W., Ippen E. P., Dienes A., Shank C. V. Astigmatically compensated cavities for cw dye lasers // *IEEE J. Quant. Elect.* – 1972 – Vol. 8 (3). – P. 373–379. doi: [10.1109/JQE.1972.1076964](https://doi.org/10.1109/JQE.1972.1076964).
11. Qiao W., Xiaojun Z., Yonggang W., Liqun S., Hanben N. A simple method for astigmatic compensation of folded resonator without Brewster window // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22 (3). – P. 2309–2316. doi: [10.1364/OE.22.002309](https://doi.org/10.1364/OE.22.002309).
12. Korner J., Hein J., Kaluza M. C. Compact aberration-free relay-imaging multi-pass layouts for high-energy laser amplifiers // *Applied Sciences*. – 2016. – Vol. 6 (353). – P. 1–18. doi: [10.3390/app6110353](https://doi.org/10.3390/app6110353).
13. Li K., Dienes A., Whinnery J. R. Stability and astigmatic compensation analysis of five-mirror cavity for mode-locked dye lasers // *Applied Optics*. – 1981. – Vol. 20 (3). – P. 407–411. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.20.000407>.
14. Li K. Stability and astigmatic analysis of a six-mirror ring cavity for mode-locked dye lasers // *Applied Optics*. – 1982. – Vol. 21 (5). – P. 967–970. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.21.000967>.
15. Cojocaru E., Julea T., Herisanu N. Stability and astigmatic compensation analysis of five- and six- or seven-mirror cavities for mode-locked dye lasers // *Applied Optics*. – 1989. – Vol. 28 (13). – P. 2577–2580. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.28.002577>.
16. Petrov V. V., Laptev A. V., Kuptsov G. V., Petrov V. A., Kirpichnikov A. V., Pestryakov E. V. The evolution of cryogenically cooled pump channel of high-intensity laser system with 1 kHz repetition rate // *Proceedings of SPIE*. – 2018. – Vol. 10614. – P. 1061419. doi: [10.1117/12.2303503](https://doi.org/10.1117/12.2303503).
17. Kuptsov G. V., Petrov V. V., Petrov V. A., Laptev A. V., Kirpichnikov A. V., Pestryakov E. V. The multidisk diode-pumped high power Yb:YAG laser amplifier of high-intensity laser system with 1 kHz repetition rate // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 999. – 2018. – Vol. 012008. – P. 1–5. doi: [10.1088/1742-6596/999/1/012008](https://doi.org/10.1088/1742-6596/999/1/012008).
18. Купцов Г. В., Лаптев А. В., Петров В. А., Петров В. В., Пестряков Е. В. Исследование особенностей тепловой линзы в активном элементе лазерного усилителя при мощной диодной накачке // *Вестник СГУГиТ*. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 220–228. doi: [10.33764/2411-1759-2019-24-2-220-228](https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-2-220-228).
19. Петров В. В., Петров В. А., Купцов Г. В., Лаптев А. В., Кирпичников А. В., Пестряков Е. В. Моделирование процесса лазерного усиления с учетом зависимости теплофизических и лазерных характеристик среды от распределения температуры в активном элементе Yb:YAG // *Квантовая электроника*. – 2020 – Т. 50 (4). – С. 315–320. doi: [http://dx.doi.org/10.1070/QEL17308](https://doi.org/10.1070/QEL17308).
20. Kogelnik H., Li T. Laser beams and resonators // *Applied Optics*. – 1966. – Vol. 5 (10). – P. 1550–1567. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.5.001550>.

Получено 06.07.2020

© А. В. Лантев, Г. В. Купцов, В. А. Петров, В. В. Петров, 2020

ASTIGMATISM COMPENSATION IN BLOCK OF TEMPORAL BROADENING OF PULSE FOR PUMP CHANNEL OF HIGH POWER LASER SYSTEM

Alexei V. Laptev

Institute of Laser Physics SB RAS, 15B, Akademika Lavrentyev's Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, e-mail: alex_laptev@ngs.ru

Gleb V. Kuptsov

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia; Institute of Laser Physics SB RAS, 15B, Akademika Lavrentyev's Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, e-mail: kuptsov.gleb@gmail.com

Vladimir A. Petrov

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia; Institute of Laser Physics SB RAS, 15B, Akademika Lavrentyev's Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, e-mail: petrov.nstu@gmail.com

Victor V. Petrov

Institute of Laser Physics SB RAS, 15B, Akademika Lavrentyev's Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia; Novosibirsk State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D, Senior Researcher, e-mail: vpetv@laser.nsc.ru

A high peak and high average power femtosecond laser system based on media doped with Yb^{3+} ions is being developed at the Institute of Laser Physics of the SB RAS. For efficient laser amplification and to avoid optical damage is actually to compensate wave front distortion caused by grating astigmatism in pump channel. Based on theory of propagation of gaussian beam in space and through optical elements the calculation of optimal parameters of two lenses telescope and comparison with experimental data has been performed. The obtained results can be used for decrease of astigmatic effect on beam profile quality in design of laser systems with elements involving astigmatism.

Keywords: high power laser, laser amplifier, compensation of astigmatism, diode pump, wavefront, gaussian beams, stretcher

REFERENCES

1. Larionov, M., & Neuhaus, J. (2014). Regenerative thin disk amplifier with a pulse energy of 120 mJ at 1 kHz. *Advanced Solid State Lasers OSA*, ATh2A.51. doi: <https://doi.org/10.1364/ASSL.2014.ATh2A.51>.
2. Baumgarten, C., & et al. (2016). 1 J, 0.5 kHz repetition rate picosecond laser. *Optics Letters*, 41(14), 3339–3342. doi: <http://dx.doi.org/10.1364/OL.41.003339>.
3. Funchs, J., & et al. (2016). Review of high-brightness proton & ion acceleration using pulsed lasers. *Proceedings of HB2006*, THAY04, 319–323.
4. Reagan, B. A., Berrill, M., Wernsing, K. A., Baumgarten, C., Woolston, M., & Rocca, J. J. (2014). High-average-power, 100-Hz-repetition-rate, tabletop soft-x-ray lasers at sub-15-nm wavelengths. *Phys. Rev. A*, 89, P. 53820. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.89.053820>.
5. Alessi, D., Martz, D. H., Wang, Y., Berrill, M., Luther, B. M., & Rocca, J. J. (2010). Gain-saturated 10.9 nm tabletop laser operating at 1 Hz repetition rate. *Opt. Lett.*, 35, 414–416. doi: <https://doi.org/10.1364/OL.35.000414>.
6. Pupeza, I. S., & et al. (2013). Compact high-repetition-rate source of coherent 100 eV radiation. *Nat. Photonics*, 7, 608–612. doi: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.156>.
7. Fattahi, H., & et al. (2014). Third-generation femtosecond technology. *Optica*, 1, 45–63. doi: <https://doi.org/10.1364/OPTICA.1.000045>.
8. Schmidt, B. E., & et al. (2014). Frequency domain optical parametric amplification. *Nat. Commun.*, 5, 1–8. doi: <https://doi.org/10.1038/ncomms4643>.
9. Zeil, K., et al. (2013). Dose-controlled irradiation of cancer cells with laser-accelerated proton pulses. *Appl. Phys. B*, 110(4), 437–444. doi: 10.1007/s00340-012-5275-3.
10. Kogelnik, H. W., Ippen, E. P., Dienes, A., & Shank, C. V. (1972). Astigmatically compensated cavities for cw dye lasers. *IEEE J. Quant. Elect.*, 8(3), 373–379. doi: 10.1109/JQE.1972.1076964.
11. Qiao, W., Xiaojun, Z., Yonggang, W., Liqun, S., & Hanben N. (2014). A simple method for astigmatic compensation of folded resonator without Brewster window. *Optics Express*, 22(3), 2309–2316. doi: 10.1364/OE.22.002309.
12. Korner, J., Hein, J., & Kaluza, M. C. (2016). Compact aberration-free relay-imaging multi-pass layouts for high-energy laser amplifiers. *Applied Sciences*, 6(353), 1–18. doi: 10.3390/app6110353.
13. Li, K., Dienes, A., & Whinnery, J. R. (1981). Stability and astigmatic compensation analysis of five-mirror cavity for mode-locked dye lasers. *Applied Optics*, 2(3), 407–411. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.20.000407>.
14. Li, K. (1982). Stability and astigmatic analysis of a six-mirror ring cavity for mode-locked dye lasers. *Applied Optics*, 21(5), 967–970. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.21.000967>.

15. Cojocaru, E., Julea, T., & Herisanu, N. (1989). Stability and astigmatic compensation analysis of five- and six- or seven-mirror cavities for mode-locked dye lasers. *Applied Optics*, 28(13), 2577–2580. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.28.002577>.
16. Petrov, V. V., Laptev, A. V., Kuptsov, G. V., Petrov, V. A., Kirpichnikov, & A. V., Pestryakov, E. V. (2018). The evolution of cryogenically cooled pump channel of high-intensity laser system with 1 kHz repetition rate. *Proceedings of SPIE*, 10614, P. 1061419. doi: 10.1117/12.2303503.
17. Kuptsov, G. V., Petrov, V. V., Petrov, V. A., Laptev, A. V., Kirpichnikov, A. V., & Pestryakov, E. V. (2018). The multidisk diode-pumped high power Yb:YAG laser amplifier of high-intensity laser system with 1 kHz repetition rate. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 999, 012008, 1–5. doi: 10.1088/1742-6596/999/1/012008.
18. Kuptsov, G. V., Laptev, A. V., Petrov, V. A., Petrov, V. V., & Pestryakov, E. V. (2019). The investigation of thermal lens properties in the active element of laser amplifier with high power diode pump. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 220–228. doi: 10.33764/2411-1759-2019-24-2-220-228.
19. Petrov, V. V., Petrov, V. A., Kuptsov, G. V., Laptev, A. V., Kirpichnikov, A. V., & Pestryakov, E. V. (2020). Modelling of the laser amplification process with allowance for the effect of the temperature distribution in an Yb:YAG gain element on the thermophysical and lasing characteristics of the medium. *Quantum Electronics*, 50(4), 315–320. doi: <http://dx.doi.org/10.1070/QEL17308>.
20. Kogelnik, H., & Li, T. (1966). Laser beams and resonators. *Applied Optics*, 5(10), 1550–1567. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.5.001550>.

Received 06.07.2020

© A. V. Laptev, G. V. Kuptsov, V. A. Petrov, V. V. Petrov, 2020

УДК 681.7.015.2

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-213-220

МАЛОГАБАРИТНЫЕ ТЕПЛОВИЗИОННЫЕ ПРИБОРЫ СО СМЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Татьяна Николаевна Хацевич

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)343-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

Евгений Витальевич Дружкин

ООО «ЛУГГАР», 630120, Россия, г. Новосибирск, ул. Шевченко, 11, генеральный директор, тел. (962)829-63-39, e-mail: druzhkinev@luggar.biz

Ксения Дмитриевна Волкова

ООО «Оптическое расчетное бюро», 630120, Россия, г. Новосибирск, ул. Шевченко, 11, инженер-конструктор, тел. (923)240-77-94; e-mail: volkovakd@luggar.biz

Интенсивное развитие тепловизионной аппаратуры сопровождается расширением ее функциональных возможностей. Одна из них – реализация сменных увеличений и полей. Целью работы является обоснование способа смены фокусных расстояний и полей, обеспечивающего постоянство относительного отверстия и осевой длины объективов в режимах узкого и широкого полей зрения в тепловизионных приборах, использующих неохлаждаемые болометрические матричные приемники излучений. Предлагается метод структурного синтеза объектива из трех компонентов, отличающийся тем, что оптическая сила первого компонента равна оптической силе объектива, сумма оптических сил второго и третьего компонентов равна нулю, апертурная диафрагма размещается на третьем компоненте, внутренний компонент имеет два дискретных положения, при этом между параметрами компонентов найдены соотношения, обеспечивающие при изменении фокусного расстояния объектива неизменность заднего фокального отрезка и относительного отверстия объектива. Возможности метода подтверждаются разработками четырех инфракрасных объективов с двух- и трехкратными перепадами фокусных расстояний. Показано, что в оптической схеме с биасферическим дизайном при смене фокусного расстояния достигается уменьшение длины и стабильность относительного отверстия объектива при дифракционном качестве изображения.

Ключевые слова: инфракрасный объектив, тепловизионный прибор, неохлаждаемый приемник, дискретное поле, переменное фокусное расстояние, биасферический дизайн, относительное отверстие

Введение

Оставаясь на протяжении нескольких десятилетий трендом в развитии оптико-электронных приборов, тепловизионная аппаратура совершенствуется как в части использования новой элементной базы, так и в части расширения функциональных возможностей в составе комплексов [1]. Преимущества оптических систем со сменными характеристиками (фокусными расстояниями, угловыми полями) первоначально были реализованы в тепловизионных приборах и модулях, сопрягаемых с охлаждаемыми приемниками. По мере повышения чувствительности неохлаждаемых матричных бо-

лометрических приемников излучений появилась возможность внедрить концепцию смены оптических характеристик и в группе малогабаритных тепловизионных приборов «смотрящего» типа, реализуя в них режимы широкого и узкого полей зрения (ШПЗ и УПЗ соответственно) [2].

Обзор схемных решений, положенных в основу создания объективов для тепловизионных приборов с неохлаждаемыми матричными приемниками излучений, позволяет выявить, что большинство из них используют один приемник излучения [3–12], и лишь редкие схемы – два приемника [13]. При этом в первой группе приборов дискретная смена

полей зрения (фокусных расстояний) может осуществляться различными способами:

- путем перемещения компонентов вдоль оптической оси при сохранении неизменной осевой длины объектива (расстояния от первой поверхности до плоскости чувствительной площадки приемника);
- путем перемещения компонентов вдоль оптической оси при изменении осевой длины объектива;
- путем ввода / вывода линз в оптическую систему объектива.

В большинстве систем имеет место изменение относительного отверстия при смене поля зрения [4–6]. Например, в [4] диафрагменное число объектива меняется от 1,1 до 1,4, что должно приводить к изменению облученности изображения в плоскости чувствительной площадки приемника в 1,6 раза при переключении с одного поля зрения на другое. При этом можно выделить немногочисленную группу оптических систем, в которых при смене поля зрения относительное отверстие сохраняется неизменным [2, 9–11].

Несмотря на то, что наличие сменных полей зрения предоставляет пользователю преимущества при эксплуатации приборов, на настоящий момент отсутствуют отечественные серийно выпускаемые малогабаритные тепловизионные приборы на неохлаждаемых приемниках с дискретной сменой полей зрения. Разработанные ранее как перспективные, инфракрасные (ИК) объективы со сменными полями [10–12] для матричных болометрических приемников сегодня могут представлять интерес для инженерных разработок или послужить стартовой системой для следующих шагов в проектировании оптических систем малогабаритных тепловизионных приборов со сменными характеристиками.

***Специфические требования,
предъявляемые к объективам
малогабаритных тепловизионных
приборов со сменными характеристиками***

Совокупность требований, которым должна удовлетворять оптика малогабаритного тепловизионного прибора, включает более десяти показателей [14]. Энергетическое согласование оптической системы объектива и приемника

предполагает, что при смене фокусного расстояния объектива в оптической системе сохраняется неизменным относительное отверстие. Как известно, облученность изображений протяженных объектов на приемной матрице при одинаковой яркости объектов зависит от квадрата относительного отверстия и коэффициента пропускания оптической системы объектива. Для сохранения уровня сигнала с приемника при смене оптических характеристик относительное отверстие должно сохраняться неизменным. Иными словами, при смене поля зрения (фокусного расстояния объектива) одновременно должен меняться и диаметр входного зрачка объектива. Здесь и далее рассматриваются объективы, имеющие постоянную длину при смене фокусного расстояния (поля зрения), которым отдается предпочтение при создании тепловизионных приборов, имеющих ограничение по габаритным размерам. Таким образом, структурная схема оптической системы объектива должна иметь апертурную диафрагму, которая в режиме ШПЗ размещается не на первом компоненте [15], а на внутренних компонентах схемы. Таким образом, в структуре объектива должны выделяться не менее трех компонентов. Апертурная диафрагма может как совпадать с компонентами, так и быть самостоятельным элементом, причем роль апертурной диафрагмы в режимах ШПЗ и УПЗ могут выполнять разные диафрагмы. В следующем разделе рассматривается трехкомпонентная структура объектива с дискретной сменой поля зрения (фокусного расстояния), в которой апертурная диафрагма в режиме ШПЗ размещена на третьем неподвижном компоненте схемы.

***Способ обеспечения постоянства
относительного отверстия
в оптической схеме объектива
при смене фокусного расстояния***

Способ обеспечения постоянства относительного отверстия при дискретной смене фокусного расстояния поясняется схемой, приведенной на рис. 1. На рис. 1 представлена оптическая схема инфракрасного объектива в двух дискретных положениях I и II. Стабильное положение компонента 1 и компонента 3, в совокупности с неизменным положением плоско-

сти изображения – постоянного заднего фокального отрезка $a'_{F'}$, при смене фокусного расстояния позволяет обеспечить стабильную длину объектива. Второй отрицательный компонент 2 перемещается из положения I в положение II на расстояние d . При решении задачи в области гауссовой оптики считаем, что компонент 2 встает вплотную к компоненту 3 в положении I и к компоненту 1 в положении II, соответственно, расстояние d между компонентами 1 и 3 является и расстоянием перемещения компонента 2. Высота апертурного луча на компонентах 1 и 3 обозначена на рисунке и в последующих формулах h_1 и h_3 .

Если для положения I (см. рис. 1, а, УПЗ) принять условия нормировки $f'=1$; $h_1=1$; $\text{tg } \alpha'=1$, обозначить отношение фокусного расстояния в режиме узкого поля к фокусному расстоянию в режиме широкого поля через k , то для предлагаемой схемы, на основании использования законов геометрической оптики, получаются следующие аналитические зависимости между параметрами схемы:

$$\begin{aligned} \varphi_1 = \varphi = 1; \quad a'_{F'} = h_3 = 1 - d; \\ d = 1 \pm (\sqrt{k^3 - 2k^2 + k} / (1 - k)); \end{aligned}$$

$$\varphi_3 = -\varphi_2 = (1 - d - k + dk) / dk,$$

где φ , φ_1 , φ_2 , φ_3 – относительные оптические силы объектива, компонентов 1, 2 и 3 соответственно; d – перемещение компонента 2 вдоль оптической оси для изменения фокусного расстояния.

На рис. 2 приведены три варианта решений в гауссовой области оптики с числовыми значениями основных параметров, рассчитанных по вышеприведенным формулам.

Как показывает анализ представленных вариантов, по мере возрастания перепада фокусных расстояний возрастают требуемые значения перемещения подвижного компонента 2, абсолютные значения оптических сил компонентов 2 и 3, относительные отверстия компонентов 1, 2 и 3. Именно от значений последних зависит дизайн конкретной оптической системы при проектировании: количество линз в компонентах, дизайн отдельных линз, наличие асферических поверхностей при безусловном выполнении требований по абберационному согласованию разрабатываемой системы с размерами пикселей и форматом используемого матричного болометрического приемника излучений.

Рис. 1. Схема, поясняющая способ обеспечения постоянства относительного отверстия при смене фокусного расстояния:

а) УПЗ; б) ШПЗ

Рис. 2. Варианты схемных решений для перепада фокусных расстояний:

а) в 2 раза; б) в 3 раза; в) в 4 раза

Технические решения и результаты

В таблице приведена информация по четырём оптическим схемам объективов с дискретной сменой фокусных расстояний, разработанным в разные годы при участии авторов [10–12].

Фокусные расстояния указаны соответственно для ШПЗ и УПЗ. Относительная длина приведена как отношение длины объектива вдоль оптической оси от первой поверхности до плоскости приемника к значению фокусного расстояния, соответствующего УПЗ. Для патентов [11, 12] значения относительной длины приведены для каждого из двух вариантов, являющихся предметом изобретения.

По мере совершенствования приемников (увеличения количества элементов и уменьшения размеров пикселей) в оптических системах либо увеличивается количество

линз, либо применяются линзы асферического дизайна.

Четвертая схема в таблице, разработанная в рамках настоящего исследования, призвана продемонстрировать возможности применения линз биасферического дизайна для создания инфракрасных объективов с дискретной сменой оптических характеристик по способу, который представлен на рис. 1. В отличие от схемы [4] с биасферическими линзами, в схеме на рис. 3 осевая длина и относительное отверстие остаются неизменными при смене полей зрения и составляют 1 : 1,1.

При смещении подвижного компонента вдоль оптической оси из одного крайнего положения в другое, угловое поле меняется с $18,6^\circ \times 13,86^\circ$ в режиме ШПЗ до $9,12^\circ \times 6,85^\circ$ в режиме УПЗ, увеличивая в два раза масштаб наблюдаемой сцены и, соответственно, угловой размер разрешаемого элемента в пространстве предметов. В этой си-

стеме при балансировке остаточных aberrаций в пятно, сопоставимое с размером пикселя приемника, относительные оптические силы компонентов составили: второго – минус 2,1; третьего – 2,7; значение подвижки второго компонента вдоль оптической оси – 0,33. Биасферический дизайн линз позволяет обеспечить дифракционное качество изображения, что демонстрируется графиками ФКЭ (см. рис. 3, б). Кривые 2–5 на графиках соответствуют точке в центре кадра

изображения, точке на краю горизонтального поля зрения, точке на краю вертикального поля зрения и точке, соответствующей краю диагонали кадра. Близость кривых 2–5 к дифракционной кривой 1 и практическое равенство значений ФКЭ для пикселя 17×17 мкм в каждом из режимов работы подтверждают высокое качество коррекции aberrаций и отражают неизменность относительного отверстия в режимах УПЗ и ШПЗ.

Объективы с дискретной сменой фокусного расстояния

Фокусные расстояния ШПЗ / УПЗ, мм	k	$D:f'$	Диагональ приемника, мм	Формат приемника; размер пикселя, мм	Относительная длина	Количество подвижных компонентов	Количество линз	Количество асферических поверхностей	Источник
20 / 40	2	1:1,0	8,0	160×120; 0,040	1,88	1	4	1	10
60 / 180	3	1:1,2	16,0	320×240; 0,040	1,28; 1,88	2	5	–	11
24 / 72	3	1:1,2	12,0	384×288; 0,025	1,43; 1,39	2	6	–	12
34 / 68	2	1:1,1	13,6	640×480; 0,017	1,70	1	4	8	–

Рис. 3. Инфракрасный объектив с двумя полями зрения:

а) оптическая схема объектива в положениях ШПЗ и УПЗ; б) ФКЭ для различных координат точек изображения (1 – дифракционный предел; 2 – 0 мм; 3 – 4,08 мм; 4 – 5,44 мм; 5 – 6,8 мм)

Выводы

В выводах отмечается следующее.

Для реализации преимуществ, которые открываются при эксплуатации тепловизионной аппаратуры со сменными полями зрения, необходимы новые схемы светосильных объективов, обеспечивающих согласование с неохлаждаемыми матричными приемниками излучений. При смене фокусного расстояния оптическая система объектива должна сохранять постоянство относительного отверстия. Предложена принципиальная схема построения объектива, удовлетво-

ряющая указанному требованию. Реализованные на основе предложенной схемы инженерные решения отличаются дифракционным качеством изображения, уменьшенной относительной длиной, стабильностью относительного отверстия при смене характеристик и могут представлять интерес для разработчиков новых тепловизионных приборов и комплексов, прежде всего гражданского применения, в том числе при решении задач, требующих высоких метрологических показателей, например, для решения задач дистанционного выявления лиц с повышенной температурой тела.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М. : ЛОГОС, 2004. – 444 с.
2. Mann Allen, Arthur R. Weeks, Jr. Infrared Optics and Zoom Lenses: Vol.: TT83. – SPIE PRESS BOOK, 2009. – 182 p.
3. US 7848015. United States. Compact two-element infrared objective lens and IR or thermal sight for weapon having viewing optics [Electronic resource] / Allie M. Baker; Pat. Assignee Goodrich Corp. – Pub. date 2010.12.07. – 27 p. – Access from «Google Patent»: <https://patents.google.com/patent/US7848015B2/en>.
4. CA 2696775. Canada. Compact two-element infrared objective lens and ir or thermal sight for weapon having viewing optics [Electronic resource] / Allie M. Baker; Pat. Assignee Goodrich Corp. – Pub. date 2011.05.10. – 47 p. – Access from «Google Patent»: <https://patents.google.com/patent/CA2696775C/en>.
5. US 20040036982. United States. Fixed focus, optically athermalized, diffractive infrared zoom objective lens [Electronic resource] / Robert Chipper; Pat. Assignee Raytheon. – Pub. date 2004.02.26 – 18 p. – Access from «Google Patent»: <https://patents.google.com/patent/US20040036982>.
6. JP 3982554. Japan. Infrared zoom lens and infrared camera [Electronic resource] / Chihiro Hiraiwa, Tatsuya Izumi. – Pub. date 2007.09.26. – 22 p. – Access from «Google Patent»: <https://patents.google.com/patent/JP3982554B2/en>.
7. KR 101265436. South Korea. The dual field of view lens module for un-cooled the thermal imaging camera [Electronic resource] / Hyun Kyu Kim, Ok Chang Min. – Pub. Date 2013.05.16. – 11 p. – Access from «Google Patent»: <https://patents.google.com/patent/KR101265436B1/en>.
8. CN 203385929. China. Infrared zoom lens with large zoom ratio [Electronic resource] / Xu Yuhui, Liu Tao, Zhao Ying, Sun Jianjun, Ma Tao. – Pub. Date 2014.01.08. – 8 p. – Access from «Google Patent»: <https://patents.google.com/patent/CN203385929U/en>.
9. US 7564617. United States. Short infrared zoom lens system [Electronic resource] / Abraham Reichert – Pub. Date 2009.07.21 – 12 p. – Access from «Google Patent»: <https://patents.google.com/patent/US7564617B2/en>.
10. Пат. 2316797. G02D 15/16, 9/34, 13/14. Линзовый объектив с изменяемым фокусным расстоянием для работы в ИК-области спектра / Олейник С. В. ; патентообладатель Сибирская государственная геодезическая академия. – Заявл. 16.06.2006 ; опубл. 10.02.2008, бюл. № 4.
11. Пат. 2339983. Линзовый объектив с изменяемым фокусным расстоянием для работы в ИК-области спектра (варианты) / Олейник С. В., Хацевич Т. Н. ; патентообладатель Сибирская государственная геодезическая академия. – Заявл. 16.06.2006 ; опубл. 27.11.2008, бюл. № 33.
12. Пат. 2538067. Светосильный объектив с изменяемой величиной поля зрения для тепловизора (варианты) / Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В. ; патентообладатель Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В. – Заявл. 18.06.2013 ; опубл. 10.01.2015, бюл. № 1.
13. CA 2750354. Canada. Dual field-of-view optical imaging system with dual focus lens [Electronic resource] / Hubert Caron – Pub. Date 2015.07.21– 21 p. – Mode of Access: <https://patents.google.com/patent/CA2750354C/en>.

14. Дружкин Е. В., Хацевич Т. Н. Реализация общетехнических и специальных требований при разработке малогабаритных тепловизионных приборов наблюдения и прицелов // ПРИБОРЫ. – 2018. – № 1 (211). – С. 43–50.

15. Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В. Исследование объективов для малогабаритных тепловизионных приборов с позиции модели двухкомпонентного объектива // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 245–261.

Получено 21.04.2020

© Т. Н. Хацевич, Е. В. Дружкин, К. Д. Волкова, 2020

HANDHELD THERMAL VISION DEVICES WITH VARIABLE CHARACTERISTICS

Tatyana N. Khatsevich

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Professor, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)343-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

Evgeniy V. Druzhkin

LUGGAR Co Ltd., 11, Shevchenko St., Novosibirsk, 630074, Russia, General Manager, phone: (962)829-63-39, e-mail: druzhkinev@luggar.biz

Ksenia D. Volkova

Optical Design Office Co Ltd, 11, Shevchenko St., Novosibirsk, 630074, Russia, Design Engineer, phone: (923)240-77-94; e-mail: volkovakd@luggar.biz

The intensive development of thermal imaging device is accompanied by the expansion of its functional possibilities. One of them is the realization of changing magnifications and fields. The aim of the work is to justify the method of changing focal lengths and fields, ensuring the constancy of the relative aperture and axial length of the lenses when changing the field in thermal imaging devices using uncooled microbolometer infrared sensor arrays. A method of structural synthesis of a lens of three components is proposed. The method is characterized by the following: the optical power of the first component is equal to the optical power of the lens, the sum of the optical powers of the second and third components is zero. The aperture diaphragm is located on the third component. The internal component has two discrete positions. Relations between the parameters of components that are found provide the invariability of the back focal length and the relative aperture of the lens when changing the focal length. The capabilities of the method are confirmed by the development of four infrared lenses with two- and three-fold differences in focal lengths. Decreasing the length along the axis and the stability of the relative aperture of the lens with diffractive image quality when changing the focal length in an optical scheme with a bi-aspheric design is achieved.

Keywords: infrared lenses, thermal imaging device, uncooled infrared microbolometer, discrete field, variable focal length, bi-aspheric design, relative aperture

REFERENCE

1. Tarasov, V. V., & Yakushenkov, Y. G. (2004). *Infrakrasnye sistemy «smotryashchego» tipa [Infrared systems of "looking" type]*. Moscow: Logos Publ., 444 p. [in Russian].
2. Mann Allen, Arthur, R., & Weeks, Jr. (2009). *Infrared Optics and Zoom Lenses: Vol. TT83*. SPIE PRESS BOOK, 182 p.
3. Allie M. Baker. (2010). US 7848015. Compact two-element infrared objective lens and IR or thermal sight for weapon having viewing optics. Retrieved from "Google Patent": <https://patents.google.com/patent/US7848015B2/en>.
4. Allie M. Baker. (2011). CA 2696775. Compact two-element infrared objective lens and ir or thermal sight for weapon having viewing optics. Retrieved from "Google Patent": <https://patents.google.com/patent/CA2696775C/en>.

5. Robert Chipper. (2004). US 20040036982. Fixed focus, optically athermalized, diffractive infrared zoom objective lens. Retrieved from "Google Patent": <https://patents.google.com/patent/US20040036982>.
6. Chihiro Hiraiwa, & Tatsuya Izumi. (2007). JP 3982554. Infrared zoom lens and infrared camera. Retrieved from "Google Patent": <https://patents.google.com/patent/JP3982554B2/en>.
7. Hyun Kyu Kim, & Ok Chang Min. (2013). KR 101265436. The dual field of view lens module for un-cooled the thermal imaging camera. Retrieved from "Google Patent": <https://patents.google.com/patent/KR101265436B1/en>.
8. Xu Yuhui, Liu Tao, Zhao Ying, Sun Jianjun, & Ma Tao. (2014). CN 203385929. Infrared zoom lens with large zoom ratio. Retrieved from "Google Patent": <https://patents.google.com/patent/CN203385929U/en>.
9. Abraham Reichert. (2007). US 7564617. Short infrared zoom lens system. Retrieved from "Google Patent": <https://patents.google.com/patent/US7564617B2/en>.
10. Olejnik S. V. (2008). *Patent RF No. 2316797*. Lens objective with changeable focal length for operation within ir spectrum area. IP Russian Federation [in Russian].
11. Olejnik S. V., & Khatsevich, T. N. (2008). *Patent RF No. 2339983*. Lens objective with variable focal length for operation in infrared spectrum (versions). IP Russian Federation [in Russian].
12. Khatsevich, T. N., & Druzhkin, E. V. (2015). *Patent RF No. 2538067*. Objective with a variable field of view for infrared device (variants). IP Russian Federation [in Russian].
13. Hubert Caron. (2015). CA 2750354. Dual field-of-view optical imaging system with dual focus lens. Retrieved from "Google Patent": <https://patents.google.com/patent/CA2750354C/en>.
14. Druzhkin, E. V., & Khatsevich, T. N. (2018). Implementation of general technical and special requirements in the development of small-sized thermal imaging observation devices and sights. *Pribory [Instruments]*, 1(211), 43–50 [in Russian].
15. Khatsevich, T. N., & Druzhkin, E. V. (2018). Analysis of objective lens for compact infrared devices using a two-component objective model. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(2), 245–261 [in Russian].

Received 21.04.2020

© T. N. Khatsevich, E. V. Druzhkin, K. D. Volkova, 2020

УДК 006

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-221-228

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ДОБРОТНОСТИ И ИНДУКТИВНОСТИ

Надежда Анатольевна Вихарева

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-31, e-mail: milana-maria@mail.ru

В статье рассмотрено метрологическое обеспечение предприятий эталонными средствами измерений добротности и индуктивности, что весьма актуально для нашей страны. Производство данных средств измерений (мер) и утверждение их типа является в настоящее время эффективным решением этой проблемы. Рассмотрены технические устройства, разрабатываемые Западно-Сибирским филиалом ФГУП «ВНИИФТРИ», которые выступают в качестве эталона, предназначенного для воспроизведения ряда значений индуктивности и добротности в диапазоне частот от 0,1 до 1 000 кГц. Предлагаемый диапазон частот у разрабатываемых мер гораздо выше, чем у других средств, предназначенных для измерения добротности и индуктивности. Рассматриваемые эталонные средства включены в сферу государственного регулирования. Проведен сравнительный анализ их характеристик с характеристиками известных технических устройств для данного вида измерений. Приведены результаты испытаний, которые показали, что частотная применимость меры LQ-2408-3 значительно выше ранее выпускаемых мер P596 и 1482 и соответствует рабочим эталонам 1-го разряда в соответствии с поверочной схемой по индуктивности и добротности.

Ключевые слова: добротность, индуктивность, средства измерения, мера, эталон, поверка, измерение, метрологическое обеспечение

Введение

Метрологическое обеспечение производства в области электрических измерений включает в себя создание новых технических устройств и методов оценки их метрологических характеристик, что связано с развитием элементной базы для радиоэлектроники, основанной на новых материалах и технологиях [1]. Известно, что уровень развития радиоэлектроники во многом определяется состоянием ее компонентной базы, которая, в свою очередь, базируется на современных материалах. Самыми простыми, но наиболее прецизионными массовыми компонентами этой базы являются L , C , R элементы. Поэтому предъяв-

ляются высокие требования к точности, универсальности и быстродействию аппаратуры, необходимой для контроля параметров L , C , R элементов [2, 3]. Исследование параметров компонентов электрических свойств цепи необходимо для оценки производных и основных ее характеристик [4–6].

Соотношение рассеянной и запасенной энергий определяется добротностью, которая численно соответствует произведению 2π и отношению энергий, запасенных за один период, к максимальной мгновенной энергии [7, 8]. Индуктивность L является одним из основных параметров, характеризующие свойства катушки, обмоток трансформаторов и дросселей. Катушки с индуктивностью от сотых до-

лей микрогенри до десятков миллигенри используются в высокочастотных цепях.

Для измерения индуктивности электрических цепей применяется измеритель индуктивности. Действие измерителя индуктивности основано на тех же методах измерений, что и действие емкости измерителя [9].

Эталоны и меры индуктивности и добротности

В России были разработаны Государственные первичные эталоны единиц электрической добротности и индуктивности [10]. На базе Западно-Сибирского филиала ФГУП «ВНИИФТРИ» (до 2020 г. – ФГУП «СНИИМ») в 2013 г. был разработан и утвержден Государственный первичный эталон электрической добротности (ГЭТ 139–2013). Общий вид эталона добротности показан на рис. 1. Данный эталон предназначен для передачи и хранения единицы электрической добротности рабочим эталонам первого и второго разрядов в соответствии с поверочной схемой ГОСТ 8.868 [11].

Рис. 1. Государственный первичный эталон единицы добротности

Единица электрической добротности воспроизводится эталонным колебательным контуром по двум полосам пропускания, соответствующим двум уровням напряжения в колебательном контуре с точно измеренным отношением этих напряжений [4].

Применяется эталон для точных измерений электрической добротности в производственной деятельности и в научных исследованиях, в частности, в электро- и радиотехнике, электронике, дальней связи.

Государственный первичный эталон единицы индуктивности (ГЭТ 15–79) создан в 1979 г. и хранится в ФГУП «ВНИИМ» (г. Москва). Общий вид эталона представлен на рис. 2.

Рис. 2. Государственный первичный эталон для определения единицы индуктивности

Передача единицы осуществляется мерам как взаимной, так и собственной индуктивностью в диапазоне частот от 40 Гц до 30 МГц и номинальных значений от 10 нГн до 1 000 Гн.

Единица индуктивности необходима для нужд атомной энергетики, радиоэлектронной промышленности, электроэнергетики и приборостроения. В международных сличениях участвует данный эталон [6].

Поверка измерителей добротности и индуктивности осуществляется с помощью эталонных мер добротности первого и второго разрядов [12]. Эти меры также разрабатываются на базе Западно-Сибирского филиала ФГУП «ВНИИФТРИ» (г. Новосибирск). Чаще всего используются наборы рабочих эталонов индуктивности и добротности первого разряда LQ-2408 и меры LQ-2300 (далее – эталоны). Эталон LQ-2408 предназначен для воспроизведения ряда значений индуктивности и добротности в диапазоне частот от 0,1 до 1 000 кГц. Они представляют собой пассивные элементы электрических цепей, не содержащие элементов питания. Принцип действия эталонов основан на том, что при подключении эталона к прибору происходит формирование напряжения на клеммах прибора, функционально связанное с параметром комплексного сопротивления эталона

и тест-сигнала прибора для дальнейшего сравнения с его внутренним опорным напряжением [13].

Эталоны выпускаются в виде двух модификаций: LQ-2408-2 и LQ-2408-3. Эталоны LQ-2408-2 – это однозначные катушки индук-

тивности в виде многovitковых соленоидов, имеющие двухзажимное подключение. Эталоны LQ-2408-3 – многозначные эталоны на пяти десятичных значениях индуктивности, имеющие трехзажимное подключение. Общий вид эталонов представлен на рис. 3.

Рис. 3. Общий вид эталона LQ-2408-2 и LQ-2408-3

Также существуют меры индуктивности и добротности многозначные LQ-2300, которые предназначены для поверки измерителей индуктивности, в том числе мультиметров, в диапазоне значений, превышающих 1 Гн.

Принцип действия этих мер основан на синтезировании индуктивности с помощью гиратора, представляющего собой активную электронную схему, в которой RC цепь включена в обратную связь интегрального операционного усилителя и, таким образом, имитирует катушку индуктивности. Эти меры конструктивно выполнены в цилиндрическом корпусе из алюминиевого сплава. В основании корпуса расположены два вывода (штыря), на которые выводится воспроизводимая индуктивность. Питание меры осуществляется от встроенных в ее корпус малогабаритных аккумуляторных батарей [10].

Помимо этих мер, для поверки используются высокоточные средства измерения: рабочие эталоны индуктивности типа P596 и наборы мер добротности и индуктивности P593 [9].

Меры P593 (рис. 4) предназначены для поверки измерителей индуктивности и добротности на частотах от 1 кГц до 10 МГц.

Меры приспособлены для подключения к схеме по четырехзажимному или двухзажимному режиму использования, а также могут быть применены для лабораторных работ [14–16].

Рис. 4. Общий вид набора мер индуктивности и добротности типа P593

Корпусом для данных мер является экран, в котором закреплены два контактных выхода. Катушка изготовлена из керамики или высокочастотной пластмассы [11].

Средства измерения типа P596 могут быть использованы в качестве эталона для цепей переменного тока. Они используются в целях метрологического обеспечения деятельности научно-исследовательских институтов, поверочных лабораторий и промышленных предприятий [17].

В качестве рабочих средств измерений добротности используются куметры типа Е4-7, Е4-11.

Измеритель добротности Е4-7 предназначен для измерения добротности катушек индуктивности. Приборы позволяют определять

емкость и угол потерь конденсаторов, сопротивление двухполюсников. Измерители предназначены для эксплуатации в цеховых, лабораторных и полевых условиях [14].

В основу работы прибора положено измерение напряжения на реактивном элементе контура в момент резонанса. На передней панели размещены ручки управления. Клеммы для подсоединяемого измеряемого элемента расположены в верхней части прибора. Они имеют штепсельные отверстия для подключения стандартных катушек индуктивности, а также резьбовое соединение для закрепления катушек с мягкими выводами [16].

Для измерения эффективной добротности единичных объектов, их резонансной частоты и емкости используется измеритель добротности Е4-11. Рассматриваемые измерители применяются в научно-исследовательских институтах, заводских лабораториях и ремонтных мастерских.

В основу измерения добротности объектов индуктивного характера положено явление резонанса напряжений в последовательном колебательном контуре. Добротность измеряемого объекта определяется как отношение напряжения на измерительном конденсаторе в момент резонанса к напряжению, вводимому в контур [15].

Измеритель добротности выполнен в виде переносного настольного прибора. Подключение измеряемого объекта к измерителю добротности производится с помощью клемм измерительного блока, расположенных в нише верхней крышки измерителя добротности. На верхней крышке также приведена монограмма, позволяющая по резонансной емкости на частотах 32 и 100 МГц определять индуктивность измеряемых объектов.

Измерителей добротности и индуктивности существует большое количество, перечислены более распространенные и востребованные в нашей стране.

Обсуждение результатов

Как говорилось выше, на базе Западно-Сибирского филиала ФГУП «ВНИИФТРИ» были разработаны и утверждены рабочие эталоны индуктивности и добротности первого раз-

ряда LQ-2408, предназначенные для воспроизведения ряда значений индуктивности и добротности в диапазоне частот от 0,1 до 1 000 кГц. По своим характеристикам данные рабочие эталоны в разы превосходят ранее созданные меры, что делает их уникальными в своей области измерения.

Общий вид данных эталонов с заводскими номерами 4–12 представлен на рис. 5.

Рис. 5. Общий вид набора рабочих эталонов с заводскими номерами 4–12

Программное обеспечение у этого эталона отсутствует. Пределы допускаемой основной относительной погрешности δ_Q действительных значений добротности эталонов равны:

- $\pm 0,04 (1+Q_x)$, при $L \geq 1$ Гн;
- $\pm (1+0,01 Q_x)$, при $L < 1$ Гн.

После выпуска из производства, в соответствии с Федеральным законом № 102 «Об обеспечении единства измерений» [18, 19], данные меры должны подвергаться испытаниям в целях утверждения их типа, для внесения в государственный реестр с последующей поверкой через установленный временной интервал [20–22]. Поверка данных эталонов осуществляется в соответствии с руководством по эксплуатации [13]. Допускается применение аналогичных средств поверки, обеспечивающих определение метрологических характеристик поверяемых средств измерений с требуемой точностью. Знак поверки наносится на эталон. Знак утверждения типа наносится на титульный лист руководства по эксплуатации.

Определение действительных значений индуктивности двухзажимных эталонов LQ-2408-2 на частотах от 10 до 1 000 кГц выполняется методом прямых измерений на анализаторе импеданса прецизионном WK 6500. Испытание на частоте 1 кГц выполняют на мосте переменного тока P5083 в режиме «калибровка» методом замещения с использованием в качестве исходных эталонов вторичного эталона еди-

ницы индуктивности по ГОСТ Р 8.732 в диапазоне значений от 1 мкГн до 1 Гн. Определение добротности двухзажимных эталонов LQ-2408-2 на частотах от 30 до 1 000 кГц выполняют на вторичном рабочем эталоне единицы электрической добротности по ГОСТ Р 8.868.

Полученные пределы допускаемой погрешности значений индуктивности приведены в табл. 1.

Таблица 1

Пределы допускаемой погрешности значений индуктивности

Номинальное значение индуктивности	Пределы допускаемой основной относительной погрешности, $\pm \delta_L$, %, при частотах, кГц							
	0,100	0,120	1,0	10	30	100	300	1000
10 000 Гн	0,10	0,10	—	—	—	—	—	—
1 000 Гн	0,03	0,03	—	—	—	—	—	—
100 Гн	0,03	0,03	0,03	—	—	—	—	—
10 Гн	0,03	0,03	0,03	0,06	—	—	—	—
1 Гн	—	—	0,03	0,06	—	—	—	—
100 мГн	—	—	0,03	0,06	0,06	—	—	—
50 мГн	—	—	0,03	0,06	0,06	—	—	—
10 мГн	—	—	0,03	0,06	0,06	0,1	—	—
5 мГн	—	—	0,03	0,06	0,10	0,1	—	—
1 мГн	—	—	0,03	0,06	0,10	0,1	0,1	—
500 мкГн	—	—	0,03	0,06	0,10	0,1	0,1	—
100 мкГн	—	—	0,03	0,06	0,10	0,1	0,1	0,1
50 мкГн	—	—	—	0,20	0,20	0,2	0,2	0,2
10 мкГн	—	—	—	0,20	0,20	0,2	0,2	0,2
5 мкГн	—	—	—	0,50	0,20	0,2	0,2	0,2
1 мкГн	—	—	—	0,50	0,20	0,2	0,2	0,2

Пределы допускаемой дополнительной погрешности индуктивности и добротности эталонов в зависимости от температуры окружающей среды приведены в табл. 2.

Таблица 2

Пределы допускаемой дополнительной погрешности индуктивности и добротности

Номинальное значение индуктивности мер	Пределы допускаемой дополнительной погрешности на 1 °С, %	
	L	Q
от 1 до 10 000 Гн	0,01	0,01
от 1 мкГн до 1 Гн	0,01	0,50

Заключение

К сожалению, техническая база метрологического обеспечения в виде рабочих и вторичных эталонов соответствующих электрических величин за последние 25 лет не изменилась как в России, так и за рубежом. Имеющиеся средства поверки современных прецизионных анализаторов импеданса в большинстве случаев обеспечивают только средние значения измеряемых величин. Это создает значительные трудности в определении действительных характеристик как при испытаниях вновь разрабатываемых приборов, так и при их дальнейшей эксплуатации.

Ничто не дает такого полного представления о промышленном и научном потенциале любой страны, как достигнутый уровень обеспечения единства, точности и достоверности измерений. Исходя из этого, ставятся необходимые задачи – создание

и выпуск средств поверки сверхмалых и сверхбольших значений электрических величин: емкости до 1 Ф, индуктивности от 10^{-9} до 10^5 Гн, активных сопротивлений от 10^{-6} до 10^{12} Ом, тангенса угла потерь до 10^{-5} .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бродников А. Ф., Вихарева Н. А., Черепанов В. Я. Измерения и эталоны тепловых величин : учеб. пособие. – Новосибирск : АСМС, 2017. – 180 с.
2. Kurbatva N. A., Simonova G. V., Cherepanov V. Ya. Analysis of the possibility of an experimental refinement of Boltzmann's constant by a radiation-calorimetric method // Measurement Techniques. – 2012. – Vol. 54, No 10. – P. 1130–1135.
3. Dzhabbarov R. R., Khakimov O. Sh., Cherepanov V. Ya. A calorimeter for measuring the total thermal resistance of textile materials // Measurement Techniques. – 2001. – Vol. 44, No 5. – P. 508–512.
4. Горкунов Б. М., Львов С. Г., Тищенко А. А. Измерение параметров электрических цепей : учеб. пособие. – Харьков : НТУ «ХП», 2014. – 128 с.
5. ГОСТ 22261–94. Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия: межгос. стандарт. – Введ. 01.01.1996. – М. : Стандартинформ, 2007. – 30 с.
6. ГОСТ 8.371–80. ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений электрической емкости: гос. стандарт. СССР. – Введ. 01.01.1981. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 7 с.
7. Лукашкин В. Г., Булатов М. Ф. Эталоны и стандартные образцы в измерительной технике. Электрорадиоизмерения. – М. : ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 402 с.
8. Воронина Г. П. Государственные эталоны России. – М. : Андреевский флаг, 2000. – 184 с.
9. Прохоров А. М. Советский энциклопедический словарь. – 4-е изд. – М. : Сов. Энциклопедия, 1990. – 1623 с.
10. ГОСТ Р 8.732–2011 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений индуктивности : нац. стандарт РФ. – Введ. 01.07.2012. – М. : Стандартинформ, 2012. – 5 с.
11. ГОСТ Р 8.868–2014 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений электрической добротности : нац. стандарт РФ. – Введ. 01.04.2015. – М. : Стандартинформ, 2014. – 11 с.
12. Вихарева Н. А., Зонова А. Д., Троценко Д. П., Черепанов В. Я., Ямшанов В. А. Разработка и исследование новых методов и эталонных средств метрологического обеспечения теплотрии // Приборы. – 2012. – № 10. – С. 1–8.
13. Набор рабочих эталонов индуктивности и добротности 1-го разряда LQ-2408 : руководство по эксплуатации. – Новосибирск : СНИИМ, 2017. – 19 с.
14. Шкурин Г. П. Справочник по электро- и электронно-измерительным приборам. – М. : Воениздатство, 1972. – 448 с.
15. Илюнин К. К., Леонтьев Д. И., Набебина Л. И. Справочник по электроизмерительным приборам. – 3-е изд. – Л. : Энергоатомиздат. Ленинград отделение, 1983. – 784 с.
16. Мардин В. В., Кривоносов А. И. Справочник по электронным измерительным приборам. – М. : Связь, 1978. – 416 с.
17. Литовченко В. А., Заржецкая Н. В. Обзор методов измерения S-параметров транзисторов СВЧ в режиме большого сигнала // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 306–327.
18. Об обеспечении единства измерений [Электронный ресурс] : федер. закон от 25.06.2008 № 102–ФЗ (с изм. от 28.11.2015). – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
19. Вихарева Н. А., Черепанов В. Я. Прикладная метрология : метод. указания по выполнению курсовой работы. – Новосибирск : СГГА, 2012. – 47 с.
20. ГОСТ 8.009–84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений: межгос. стандарт. – Введ. 01.01.1986. – М. : Стандартинформ, 2006. – 27 с.
21. МИ 3290–2010. ГСИ. Рекомендация по подготовке, оформлению и рассмотрению материалов испытаний средств измерений в целях утверждения типа : рекомендации. – Введ. 01.10.2010. – М. : ФГУП «ВНИИМС», 2016. – 33 с.

22. Р 50.2.077–2014. ГСИ. Испытания средств измерений в целях утверждения типа. Проверка защиты программного обеспечения: рекомендации. – Введ. 01.10.2014. – М. : Стандартинформ, 2014. – 48 с.

Получено 22.07.2020

© Н. А. Вихарева, 2020

METROLOGICAL SUPPORT MEANS OF MEASUREMENTS OF Q FACTOR AND INDUCTIVITY

Nadezhda A. Vikhareva

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Special-purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: (383)361-07-31, e-mail: milana-maria@mail.ru

The article discusses the metrological support of enterprises with reference instruments for measuring the quality factor and inductance, which is very important for our country. The production of these measuring instruments (measures) and the approval of their type is currently an effective solution to this problem. Considered technical devices developed by the West Siberian branch of FSUE "VNIIFTRI", which act as a standard designed to reproduce a number of inductance and Q-factor values in the frequency range from 0.1 to 1000 kHz. The proposed range of frequencies for the developed measures is much higher than that of other tools designed to measure Q-factor and inductance. The reference means under consideration are included in the scope of government regulation. A comparative analysis of their characteristics with the characteristics known technical devices for this type of measurement is carried out. The results of tests are given, which showed that the frequency applicability of the LQ-2408-3 measure is significantly higher than the previously released measures P596 and 1482 and corresponds to the working standards of the 1st category in accordance with the verification circuit for inductance and Q-factor.

Keywords: quality factor, inductance, measuring instruments, measure, standard, calibration, measurement, metrological support

REFERENCES

1. Brodnikov, A. F., Vikhareva, N. A., & Cherepanov, V. Ya. (2017). *Izmereniya i etalony teplovykh velichin [Measurements and standards of thermal quantities]*. Novosibirsk: ASMS Publ., 80 p. [in Russian].
2. Kurbatva, N. A., Simonova, G. V., & Cherepanov, V. Ya. (2012). Analysis of the possibility of an experimental refinement of Boltzmann's constant by a radiation-calorimetric method. *Measurement Techniques*, 54(10), 1130–1135.
3. Dzhabbarov, R. R., Khakimov, O. Sh., & Cherepanov, V. Ya. (2001). A calorimeter for measuring the total thermal resistance of textile materials. *Measurement Techniques*, 44(5), 508–512.
4. Gorkunov, B. M., Lviv, S. G., & Tishchenko, A. A. (2014). *Izmerenie parametrov elektricheskikh tsepey [Measurement of the parameters of electrical circuits]*. Kharkiv: NTU "KhPI" Publ., 128 p. [in Russian].
5. GOST 22261-94. (2007). Means of measuring electrical and magnetic quantities. General specifications: interstate standard. Moscow: Standartinform Publ., 30 p. [in Russian].
6. GOST 8.371-80 GSI. (1980). State primary standard and the all-Union verification scheme for measuring instruments of electric capacity: state standard. USSR. Moscow: Standards Publ., 7 p. [in Russian].
7. Lukashkin, V. G., & Bulatov, M. F. (2018). *Etalony i standartnye obrashtsy v izmeritel'noy tekhnike. Elektroradioizmereniya [Standards and standard samples in measuring technique. Electroradio-measurements]*. Moscow: TECHNOSPHERE Publ., 402 p. [in Russian].
8. Voronina, G. P. (2000). *Gosudarstvennye etalony Rossii [State standards of Russia]*. Moscow: St. Andrew's Flag Publ., 184 p. [in Russian].
9. Prokhorov, A. M. (1990). *Sovetskiy entsiklopedicheskiy slovar' [Soviet Encyclopedic Dictionary]* (4th ed). Moscow: Soviet Encyclopedia Publ., 1623 p. [in Russian].

10. GOST R 8.732-2011 GSI. (2012). State calibration chart for inductance measuring instruments: national standard. RF. Moscow: Standartinform Publ., 5 p. [in Russian].
11. GOST R 8.868-2014 GSI. (2014). State verification scheme for measuring instruments of electric quality factor: national standard. RF. Moscow: Standartinform Publ., 11 p. [in Russian].
12. Vikhareva, N. A., Zonova, A. D., Trotsenko, D. P., Cherepanov, V. Ya., & Yamshanov, V. A. (2012). Development and research of new methods and reference tools for metrological support of heat metering. *Pribory [Devices]*, 10, 1–8 [in Russian].
13. *Nabor rabochikh etalonov induktivnosti i dobrotnosti 1-go razryada LQ-2408: rukovodstvo po ekspluatatsii [A set of working standards of inductance and quality factor of the 1st category LQ-2408: instruction manual]*. (2017). Novosibirsk: SNIIM Publ., 19 p. [in Russian].
14. Shkurin, G. P. (1972). *Spravochnik po elektro- i elektronno-izmeritel'nykh priboram [Handbook of electrical and electronic measuring devices]*. Moscow: Military Publ., 448 p. [in Russian].
15. Ilyunin, K. K., Leontiev, D. I., & Nabebina, L. I. (1983). *Spravochnik po elektroizmeritel'nykh priboram [Handbook of electrical measuring instruments]* (3rd ed.). Leningrad: Energoatomizdat Leningrad Branch Publ., 784 p. [in Russian].
16. Mardin, V. V., & Krivososov A. I. (1978). *Spravochnik po elektronnykh izmeritel'nykh priboram [Handbook of electronic measuring instruments]*. Moscow: Communication Publ., 416 p. [in Russian].
17. Litovchenko, V. A., & Zarzhetsky, N. V. (2019). Overview of methods for measuring S-parameters of microwave transistors in big signal mode. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(4), 306–327 [in Russian].
18. Federal law of Russian Federation of May 06, 2008 No. 102–FZ (as amended on November 28, 2015). On ensuring the uniformity of measurements. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
19. Vikhareva, N. A., & Cherepanov, V. Ya. (2012). *Prikladnaya metrologiya. Metodicheskie ukazaniya po vypolneniyu kursovoy raboty [Applied metrology. Guidelines for the implementation of the course work]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 47 p. [in Russian].
20. GOST 8.009–84. GSI. (2006). Normalized metrological characteristics of measuring instruments: interstate standard. Moscow: Standartinform Publ., 27 p. [in Russian].
21. MI 3290–2010. GSI. (2016). Recommendation on the preparation, design and review of test materials for measuring instruments for type approval: recommendations. Moscow: FSUE "VNIIMS" Publ., 33 p. [in Russian].
22. R 50.2.077–2014. GSI. (2014). Tests of measuring instruments for type approval. Software Security Check: recommendations. Moscow: Standartinform Publ., 48 p. [in Russian].

Received 22.07.2020

© N. A. Vikhareva, 2020

УДК 621.385.6

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-229-237

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КОАКСИАЛЬНО-ПОЛОСКОВОЕ И ЗОНДОВОЕ КОНТАКТНЫЕ УСТРОЙСТВА И СПОСОБЫ ИХ КАЛИБРОВКИ

Сергей Викторович Савелькаев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-31, e-mail: sergei.savelkaev@yandex.ru

Рассмотрены конструкция и способ калибровки коаксиально-полоскового контактного устройства, которое обеспечивает подключение к анализатору сверхвысокочастотных цепей как коаксиальных мер и микрополосковых калибраторов, так и исследуемых активных компонентов, таких как транзисторы. Контактное устройство обеспечивает высокую повторяемость подключения к нему коаксиальных мер, микрополосковых калибраторов и исследуемых активных компонентов, имеет малый собственный коэффициент стоячей волны и потери. Для калибровки контактного устройства используют минимальный набор легко рассчитываемых микрополосковых калибраторов с малыми потерями, что с учетом высокой повторяемости их подключения снижает трудоемкость его калибровки и повышает точность передачи результатов измерения из коаксиального тракта в микрополосковый тракт. Возможность передачи результатов измерения из коаксиального тракта в микрополосковый тракт расширяет область действия Государственной системы обеспечения единства измерений на последний. Также приведены конструкция зондового контактного устройства и способ его калибровки специализированным микрополосковым калибратором.

Ключевые слова: коаксиально-полосковое и зондовое контактные устройства, способ калибровки, транзистор, S -параметры, передача результатов измерения из коаксиального тракта в микрополосковый тракт

Введение

В диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) проектирование микрополосковых усилителей и автогенераторов осуществляют на основе измеренных S -параметров активных компонентов (АК) этих устройств, например, транзисторов. Подключение АК к коаксиальному анализатору СВЧ-цепей (АЦ) осуществляют с помощью коаксиальных, полосковых или зондовых контактных устройств (ККУ, ПКУ или ЗКУ) [1–25].

Недостатком конструкций ПКУ [4–24] является то, что они не обеспечивают подключение к АЦ стандартизированных аттестованных коаксиальных мер при калибровке АЦ, это требует демонтажа ПКУ, что повышает трудоемкость его последующей калибровки. Также ПКУ имеют значительный собственный коэффициент стоячей волны (КСВ) и потери.

Кроме того, способы калибровки ПКУ [4, 5] предполагают использование избыточного набора короткозамкнутых, разомкнутых и про-

ходных расчетных микрополосковых калибраторов, в виде отрезков микрополосковой линии (МПЛ) различной длины. Плохая повторяемость подключения этих калибраторов и подключения АК к ПКУ, потери в этих калибраторах, включая потери в разомкнутых калибраторах из-за эффекта открытого конца, приводят к значительным погрешностям передачи результатов измерения S -параметров АК из коаксиального измерительного тракта АЦ в микрополосковый тракт.

В статье предложена модификация ККУ [1–3] в виде универсального коаксиально-полоскового контактного устройства (КПКУ), которое обеспечивает калибровку коаксиального АЦ и совместно с коаксиальными переходами ($КП_i; i = 1, 2$) КПКУ набором стандартизированных аттестованных коаксиальных мер отражения и передачи. Дополнительная калибровка $КП_i$ [3] расчетным микрополосковым согласованным калибратором или одновременно этим же калибратором и короткозамыкателем

обеспечивает передачу результатов измерения S -параметров АК из коаксиального измерительного тракта АЦ в микрополосковый тракт. Минимальный набор расчетных микрополосковых калибраторов с малыми потерями и высокая повторяемость подключения этих калибраторов и АК к КПКУ повышает точность передачи результатов из-

мерения S -параметров АК, а возможность совместной калибровки АЦ и КПКУ снижает трудоемкость измерения этих параметров. Также приведены конструкция ЗКУ и способ его калибровки специализированным микрополосковым калибратором.

Конструкция КПКУ показана на рис. 1, а и б.

Рис. 1. Конструкция КПКУ и набор калибраторов:

а) и б) подключение к КПи 3 АК 6 с ленточными 7 и микрополосковыми 8 выводами; в) подключение к КПи 3 коаксиальной меры 10; з) набор калибраторов; 1 – основание; 2 – подвижный стол; 3 – КПи; 4 – порт АЦ; 5 – подпружиненная цанга; 6 – АК; 7 и 8 – ленточный вывод и отрезок МПЛ; 9 – пьедестал; 10 – коаксиальная мера; 11 – согласованный микрополосковый калибратор; 12 – короткозамыкатель; 13 – резьбовая втулка; 14 – резистивная нагрузка

КПКУ содержит основание 1, на каждом из двух подвижных столов 2 которого последовательно размещены КПи 3 этого КПКУ и один из двух коаксиальных измерительных портов АЦ 4. КПи 3, разрез которых показан на рис. 1, а и б, позволяют посредством подпружиненных цанг 5 подключить в отсчетных плоскостях $i-i$; $i=1, 2$ их измерительных входов АК 6 как с ленточными 7 (см. рис. 1, а), так и с микрополосковыми 8 (см. рис. 1, б) выводами. При этом АК 6 размещают на пьедестале 9. Возможность горизонтального перемещения подвижных столов 2 (см. рис. 1, а) позволяет подключить в отсчетных плоскостях $i-i$ КПи 3 коаксиальную меру 10 (как, например, для рис. 1, а показано на рис. 1, в)

или расчетные согласованные микрополосковые калибраторы 11 калибровке АЦ (калибраторы показаны на рис. 1, з, причем для рис. 1, а используют калибраторы с ленточными выводами 7, а для рис. 1, б – с микрополосковыми 8). Также при дополнительной калибровке АЦ к входному ($i'=1$) и выходному ($i'=2$) отрезкам МПЛ 8 в их вспомогательных отсчетных плоскостях $i'-i'$ (см. рис. 1, б, АК 6 удаляют) можно подключить короткозамыкатель 12 (см. рис. 1, з).

Калибровка КПКУ. Для калибровки КПи; $i=1, 2$ совместно с АЦ пьедестал 9 (см. рис. 1, а и б) удаляют и в их отсчетных плоскостях $i-i$ поочередно подключают стандартизированные аттестованные коаксиальные меры

отражения 10 (см. рис. 1, в), набор которых определен способом калибровки АЦ.

Для калибровки АЦ на проход измерительные входы КПи 3 в отсчетных плоскостях $i-i$; $i=1, 2$ могут быть соединены встык. При этом цанга 5 с большим усилием пружины утапливает цангу 5 другого КПи 3 с меньшим усилием пружины аналогично рис. 1, в. При этом резьбовую втулку 13 одного из КПи 3 (см. рис. 1, а и б) надвигают на другой КПи 3 , аналогично рис. 1, в.

При дополнительной калибровке КПКУ [1–3] подключение согласованного микрополоскового калибратора 11 (см. рис. 1, з) к КПи, $i=1, 2$ в отсчетных плоскостях $i-i$ (см. рис. 1, а и б) представлено эквивалентной схемой замещения (ЭСЗ), показанной на рис. 2, где Z_0 – волновое сопротивление отрезка МПЛ калибратора, который нагружен на согласованную нагрузку с сопротивлением $Z_n = Z_0$.

Рис. 2. Эквивалентная схема замещения КПи, $i=1, 2$ при подключении к нему согласованного микрополоскового калибратора

При подключении согласованного микрополоскового калибратора к измерительным входам КПи, $i=1, 2$ в его отсчетной плоскости $i-i$ возникает неоднородность с комплексным коэффициентом отражения (ККО) $\Gamma_i^{(0)} \neq 0$, обусловленная конструктивными различиями этих узлов и приводящая к взаимному искажению их полей в отсчетной плоскости $i-i$. Эту неоднородность можно моделировать вводом вспомогательной плоскости

B_i-B_i и введением между плоскостями $i-i$ и B_i-B_i четырехполюсника с $[R]_i$ -параметрами, характеризующими указанную неоднородность. При этом плоскости $i-i$ и B_i-B_i совмещены в пространстве, а в плоскости B_i-B_i ККО $\Gamma_{B_i}^{(0)} = 0$.

По измеренным ККО $\Gamma_i^{(0)}$ R_{11i} -параметры можно определить известным образом

$$R_{11i} = \Gamma_i^{(0)}. \quad (1)$$

Кроме того, в работе [1] был предложен другой наиболее трудоемкий способ определения R_{11i} -параметров, основанный на измерении $[\hat{S}]_k$ -параметров двух отрезков МПЛ, имеющих длину l_k ; $k=1, 2$ в отсчетных плоскостях $i-i$ их поочередного подключения к КПи; $i=1, 2$ с последующим определением $[R]_i$ -параметров по формуле

$$R_{11i} = \frac{(\hat{S}_{ij} \hat{S}_{ji} e^{j\beta l_j} - \hat{S}_{ii} \hat{S}_{jj} e^{j\beta l_i})}{(\hat{S}_{ji} e^{j\beta l_j} - \hat{S}_{ij} e^{j\beta l_i})}; \quad (2)$$

$$i, j=1, 2; i \neq j,$$

где $\beta = 2\pi/\lambda$ и $\lambda = c/\sqrt{\epsilon_3}f$ – фазовая постоянная и длина волны в отрезках МПЛ на частоте f ; ϵ_3 – эффективная диэлектрическая проницаемость МПЛ; индексы при $[\hat{S}]_{i,j}$ -параметрах и $l_{i,j}$ определены индексом k .

Для определения недостающих R_{12i}, R_{21i} и R_{22i} -параметров четырехполюсник, показанный на рис. 2, был представлен параллельной проводимостью Y_{R_i} . Такое представление сделано в предположении физического совпадения плоскостей $i-i$ и B_i-B_i . Падающие и отраженные волны U_{1i}^+ и U_{2i}^+ связаны в плоскостях $i-i$ и B_i-B_i уравнениями [3]:

$$\left. \begin{aligned} U_{1i}^- &= r_{11i} U_{1i}^+ + r_{12i} U_{2i}^+ \\ U_{2i}^- &= r_{21i} U_{1i}^+ + r_{22i} U_{2i}^+ \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где r_i – ненормированные параметры рассеяния введенного четырехполюсника.

Из уравнений (3) при $U_{1i} = U_{2i}$, где $U_{1i} = U_{1i}^+ + U_{1i}^-$ и $U_{2i} = U_{2i}^+ + U_{2i}^-$, получим

$$U_{1i}^+[(1-r_{21i})+r_{11i}] = U_{2i}^+[(1-r_{12i})+r_{22i}]. \quad (4)$$

Уравнение (4) имеет решение:

$$r_{12i} = 1 + r_{11i}, r_{21i} = 1 + r_{22i}, \quad (5)$$

которое после его нормировки с учетом того, что $r_{11i} = R_{11i}$ и $r_{22i} = R_{22i}$ можно представить в виде:

$$\begin{aligned} R_{12i} &= (1 + R_{22i})\sqrt{Z_0 / Z_i}; \\ R_{21i} &= (1 + R_{11i})\sqrt{Z_i / Z_0}, \end{aligned} \quad (6)$$

где Z_i – волновое сопротивление КПи, равное волновому сопротивлению коаксиальных мер, используемых при калибровке АЦ.

Применяя к (6) условие взаимности $R_{12i} = R_{21i}$, определим недостающие R_{12i} -, R_{21i} - и R_{22i} -параметры:

$$\begin{aligned} R_{12i} &= R_{21i} = (1 + R_{11i})\sqrt{Z_i / Z_0}; \\ R_{22i} &= (1 + R_{11i})Z_i / Z_0 - 1. \end{aligned} \quad (7)$$

R_i -параметры (7) применимы к конструкции КПКУ, показанной на рис. 1, б. Они могут быть нормированы относительно произвольного волнового сопротивления Z_0 согласованного полоскового калибратора, выбранного для калибровки АЦ, и, следовательно, в последующем к этому волновому сопротивлению Z_0 нормированы результаты измерения.

Для перехода от плоскости $i-i$ измерительного входа КПи, $i = 1, 2$ к вспомогательной отсчетной плоскости $i'-i'$, $i' = 1, 2$ отрезков МПЛ 8 конструкции КПКУ, показанной на рис. 1, б, необходима калибровка АЦ короткозамыкателем 12 (см. рис. 1, з).

При подключении к вспомогательным отсчетным плоскостям $i'-i'$, $i' = 1, 2$ (см. рис. 1, б) короткозамыкателя 12 (см. рис. 1, з) измеряе-

мый ККО в плоскости $i-i$ входа КПи, $i = 1, 2$ можно выразить в виде

$$\Gamma_i = R_{11i} + \frac{R_{12i}R_{21i}\delta_i\Gamma}{1 - R_{22i}\delta_i\Gamma}, \quad (8)$$

где Γ – ККО короткозамыкателя 12 (см. рис. 1, з), выполненного в виде металлической пластины, снабженной ленточным выводом 7; δ_i – прямой и обратный комплексный коэффициент передачи (ККП) i -го отрезка МПЛ 8 (см. рис. 1, б) КПКУ.

При $\Gamma = -1$ из (8) найдем

$$\delta_i = (\Gamma_i - R_{11i}) / (\Delta_{R_i} - R_{22i}\Gamma_i), \quad (9)$$

где $\Delta_{R_i} = R_{11i}R_{22i} - R_{12i}R_{21i}$.

С учетом δ_i (9) $[R]_i$ -параметры (1), (2) и (7) можно пересчитать как

$$\begin{aligned} R_{11i} &= R_{11i}, R_{22i} = R_{22i}\delta_i, R_{12i} = \\ &= R_{21i} = \sqrt{R_{12i}R_{21i}\delta_i}. \end{aligned} \quad (10)$$

$[R]_i$ -параметры (10) применимы к конструкции КПКУ, показанной на рис. 1, б.

С учетом $[R]_i$ -параметров S -параметры АК, измеренные в коаксиальных портах АЦ, можно представить в виде каскадного соединения $S = f([R]_1, [S'], [R]_2)$. Откуда S' -параметры АК, нормированные относительно волнового сопротивления Z_0 согласованного микрополоскового калибратора, можно определить из выражений [3]

$$\begin{aligned} S'_{11} &= [R_{112}(R_{111}S_{22} - \Delta_S) + (S_{11} - R_{111})\Delta_{R_1}] / \Delta; \\ S'_{12} &= -R_{211}R_{212}S_{12} / \Delta; \\ S'_{21} &= -R_{121}R_{122}S_{21} / \Delta; \end{aligned} \quad (11)$$

$$S'_{22} = [R_{221}(R_{222}S_{11} - \Delta_S) + (S_{22} - R_{222})\Delta_{R_1}] / \Delta,$$

где

$$\begin{aligned} \Delta_S &= S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}; \\ \Delta_{R_1} &= R_{111}R_{221} - R_{121}R_{211}; \\ \Delta_{R_2} &= R_{112}R_{222} - R_{122}R_{212}; \end{aligned}$$

$$\Delta = R_{112}(S_{22}\Delta_{R_1} - R_{221}\Delta_S) + (R_{221}S_{11} - \Delta_{R_1})\Delta_{R_2}.$$

Здесь последний индекс при $[R]_i$ -параметрах определяет их принадлежность к входу ($i=1$) или выходу ($i=2$). Для S -параметров коаксиальных узлов $S' = S$.

Выражения (11) обеспечивают передачу результатов измерения $S' = f(S)$ -параметров АК из коаксиального измерительного тракта АЦ в микрополосковый тракт.

Конструкция и способ калибровки ЗКУ. Конструкция ЗКУ [25] показана на рис. 3.

Рис. 3. Калибровка ЗКУ:

1 – основание; 2 – КП_i, $i=1, 2$; 3 – зонд;
4 – короткозамыкатель; 5 – согласованная
полосковая нагрузка

Калибровка ЗКУ, показанного на рис. 3, основана на измерении ККО $\Gamma_1^{(1)}$ и $\Gamma_1^{(2)}$ в плоскостях его входов $i-i$; $i=1, 2$ при подключении к нему в отсчетных плоскостях $i'-i'$; $i=1, 2$ совмещенных короткозамкнутого 4 и согласованного 5 калибраторов, а также на аналогичном измерении ККО $\Gamma_i^{(3)}$ рассогласованного калибратора, состоящего из отрезка МПЛ с длиной l , нагруженного на рассогласованную микрополосковую нагрузку 5 [25]. При этом ККО короткозамкнутого, согласованного и рассогласованного калибраторов составляют $\Gamma_i^{(m)} = \{-1; 0; \sim 0,4-0,5\}$ соответственно относительно отрезка МПЛ с волновым сопротивлением Z_0 , где $m=1, 2, 3$ – порядковый номер короткозамкнутого, согласованного и рассогласованного калибраторов.

Калибровку ЗКУ осуществляют в следующем порядке. К ЗКУ подключают совмещенный согласованно-короткозамкнутый калибратор 4, как показано на рис. 3. При этом во вспомогательной плоскости $1'-1'$ зонды 3

КП₁ замкнуты металлизацией этого калибратора 4, а во вспомогательной плоскости $2'-2'$ зонды 3 КП₂ нагружены на согласованный калибратор 5. После чего измеряют ККО $\Gamma_i^{(m)}$; $i, m=1, 2; i \neq j$ этих калибраторов в плоскостях $i-i$ входов КП_i; $i=1, 2$ при угле α наклона КП_i к плоскости калибратора 4, составляющем $\alpha \approx \pi/4$. Далее к измерительным плоскостям $i'-i'$ КП_i; $i=1, 2$ подключают рассогласованный калибратор 5 и измеряют ККО $\Gamma_i^{(3)}$ в плоскостях $i-i$ входов КП_i; $i=1, 2$.

По измеренным ККО $\Gamma_i^{(m)}$ определяют $[R]_i$ -параметры ЗКУ по формулам

$$R_{11i} = \Gamma_i^{(1)};$$

$$R_{22i} = \frac{R_{11i} - \Gamma_i^{(3)} + (R_{11i} - \Gamma_i^{(2)})\Gamma_{ni}^{(3)}}{(\Gamma_i^{(2)} - \Gamma_i^{(3)})\Gamma_{ni}^{(3)}}; \quad (12)$$

$$R_{12i}R_{21i} = (R_{11i} - \Gamma_i^{(2)})(1 + R_{22i}).$$

Размеры полосковой нагрузки 5 могут быть определены по формуле [25, 26]

$$Z_n = \frac{R_s}{\pi} \ln(r_2 / r_1),$$

где Z_n – ее сопротивление; R_s , r_1 и r_2 – поверхностное сопротивление ее резистивного слоя и его внутренний и внешний радиусы.

Закключение

Конструкция и способ калибровки КПКУ представляют собой синтез конструкций ККУ и ПКУ, а также способов их калибровки [1–3, 23]. Они обеспечивают подключение к АЦ как коаксиальных мер и микрополосковых калибраторов, так и исследуемых АК, включая бескорпусные транзисторы. Кроме того, КПКУ обеспечивает высокую повторяемость подключения к нему коаксиальных мер и исследуемых АК, имеет малый собственный КСВ и потери. Для калибровки КПКУ используют минимальный набор легко рассчитываемых микрополосковых калибраторов с малыми потерями, что с учетом высокой повторяемости

их подключения снижает трудоемкость калибровки КПКУ и обеспечивает повышение точности передачи результатов измерения из коаксиального тракта в микрополосковый тракт примерно в 1,5–2 раза (подробные технические характеристики КПКУ приведены в работе [3]). Возможность передачи результатов измерения

из коаксиального тракта в микрополосковый тракт расширяет область действия Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ) на последний. Предложенный способ калибровки КПКУ распространен на калибровку ЗКУ специализированным микрополосковым калибратором.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савелькаев С. В. Коаксиальное контактное устройство // Измерительная техника. – 2004. – № 4. – С. 65–68.
2. Заржецкая Н. В., Литовченко В. А. Коаксиальное контактное устройство и способ его калибровки / Интерэкспо Гео-Сибирь : XV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Наука. Оборона. Безопасность–2019» : сб. материалов (Новосибирск, 24–26 апреля 2019 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. Т. 9. – С. 77–86.
3. Savel'kaev S. V., Danilevich S. B. Design and Quality Control of Microwave Devices Using Simulation and Measurement Methods: Theoretical basis for designing analyzers/simulators for microwave devices. – Cambridge Scholars Publishing, 2020. – 264 p.
4. Heuermann H., Schiek B. Line network network (LNN): at alternative in-fixture calibration procedure // IEEE Trans. – 1977 – Vol. MTT–45. – No. 3. – P. 408–413.
5. Техника измерения S -параметров СВЧ-транзисторов в полосковых линиях передачи с произвольным волновым сопротивлением / В. И. Евсеев, О. В. Лавричев, С. М. Никулин, В. В. Петров, А. С. Шипунов // Вестник воздушно-космической обороны. – 2017. – № 4 (16). – С. 46–50.
6. Контактное устройство для контроля параметров интегральных структур и электронных компонентов в микрополосковых линиях передачи / О. В. Лавричев, Е. А. Лебедева, С. М. Никулин, В. В. Петров, А. А. Шипунов // Сборник статей Пятой всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 30 мая – 2 июня). – СПб. : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. Т. 1. – С. 310–314.
7. Филатов В. А., Щукин А. В., Бобкович П. И. Автоматизированный стенд для входного контроля пассивных компонентов СВЧ / 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» : материалы конференции (4–6 сентября 2016 г.). – Севастополь, Крым, 2016. – С. 1907–1912.
8. Официальный сайт Withwave [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.withwave.com/t-probes> (дата обращения 14.06.2018).
9. Официальный сайт Integrated Device Technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.idt.com> (дата обращения 14.06.2018).
10. Network Analysis Applying the 8510 TRL Calibration for Non-Coaxial Measurements [Electronic resource] : Technical Overview. USA: Keysight Technologies, 2014. – Mode of access: <http://www.keysight.com> (дата обращения 14.06.2016).
11. Horibe M. R., Kishikawa R. Metrological Traceability in Waveguide S-parameter Measurement at 1.0 THz band // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2013. – Vol. 62, No 6. – P. 1814–1820.
12. Chen L., Zhang C., Reck T. J., Arsenovic A., Bauwens M., Groppi C., Lichtenberger A. W., Weikle R. M., Barker N. S. Terahertz Micromachined On-Wafer Probes: Repeatability and Reliability // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2012. – Vol. 60, No 9. – P. 2894–2902.
13. Hanning J., Stenarcon J., Yhland K., Sobis P. J., Bryllert T., Stake J. Single-Flange 2-Port TRL Calibration for Accurate THz S-parameter Measurements of Waveguide Integrated Circuits // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2014. – Vol. 4, No 4. – P. 582–587.
14. Hesler J. L., Duan Y., Foley B., Crowe T. W. THz Vector Network Analyzer Measurement and Calibration / 21st International Symposium on Space Terahertz Technology. – Oxford, 23–25 March, 2010. – P. 318–320.
15. Caglayan C., Georgios C., Trichopoulos, Sertel K. Non-Contact Probes for Device and Integrated Circuit Characterization in the THz and mmW Bands // Transactions on Microwave Symposium (IMS), 1–6 June, 2014. – P. 1–3.

16. Caglayan C., Trichopoulos G. C., Sertel K. Non-Contact Probes for On-Wafer Characterization of Sub-Millimeter-Wave Devices and Integrated Circuits // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – November 2014. – Vol. 62, No 11. – P. 2791–2801.
17. Dunsmore J., Cheng N., Zhang Y. Characterization of asymmetric fixtures with a two-gate approach // Proceedings of the 77th Microwave Measurement Conference (ARFTG), 10 June, 2011. – P. 1–6.
18. Yoon C., Tsiklauri M., Zvonkin M., Fan J., Drewniak J. L., Razmadze A., Aflaki A., Kim J., Chen Q. B. Design Criteria of Automatic Fixture Removal (AFR) for Asymmetric Fixture De-embedding // 2014 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 4–8 Aug. 2015, Raleigh, North Carolina, USA. – P. 654–659.
19. PNA-X Series Microwave Network Analyzers [Electronic resource]. – USA : Keysight Technologies, 2015. – Mode of access: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-02294/brochures/5990-4592.pdf>.
20. Vanel J. Improved Evaluation of Planar Calibration Standards Using the TDR Preselection Method // Acta Polytechnica. – 2007. – Vol. 47, No 4–5. – P. 102–106.
21. Scott J. B. Investigation of a Method to Improve VNA Calibration in Planar Dispersive Media Through Adding an Asymmetrical Reciprocal Device // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2004. – Vol. 53, No 9. – P. 3007–3013.
22. Евсеев В. И., Лебедева Е. А., Никулин С. М., Петров В. В., Шипунов А. С. Технические средства для измерений параметров полосковых СВЧ-устройств // Датчики и системы. – 2016. – № 6 (204). – С. 23–27.
23. Савелькаев С. В., Литовченко В. А. Способ калибровки полоскового контактного устройства / Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015 : XI Международный научный конгресс : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2014. Т. 3 – С. 37–41.
24. Zhu N. H. Phase uncertainty in calibrating microwave test fixtures // IEEE Trans. – 1999 – Vol. VTT-47, No. 10. – P. 1917–1922.
25. А.с. 11578667 СССР, Н 01 Р 5/08. Контактное устройство и калибровочная согласованная нагрузка / С.В. Савелькаев, А.П. Герасименко. – Оpubл. в Бюл. Открытия. Изобретения. – 1990. – № 26.
26. Гупта К., Гардж Р., Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ-устройств. – М. : Радио и связь. – 1987. – 432 с.

Получено 27.07.2020

© С. В. Савелькаев, 2020

UNIVERSAL COAXIAL-STRIPLINE AND PROBE TEST FIXTURES AND THEIR CALIBRATION METHODS

Sergei V. Savelkaev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Department of Special Devices, Innovations, and Metrology, phone: (383)361-07-31, e-mail: sergei.savelkaev@yandex.ru

The design and calibration method for a coaxial-stripline test fixture that provides connection of microwave circuit analyzer of both coaxial measures and microstrip calibrators, as well as the active components under study, such as transistors, are considered. The test fixture provides high repeatability of connecting coaxial measures, microstrip calibrators, and active components being studied and has a small standing-wave ratio and loss. The test fixture is calibrated with using a minimal set of easily calculated microstrip calibrators with low losses, which, taking into account the high repeatability of their connection, reduces the complexity of its calibration and increases the accuracy of transmitting measurement results from the coaxial line to the microstrip line. The possibility of transmitting measurement results from the coaxial line to the microstrip line extends the scope of the State System for Ensuring the Uniformity of Measurements to the microstrip line. The design of the probe test fixture and a method of its calibration by a specialized microstrip calibrator are also given.

Keywords: coaxial-stripline and probe test fixtures, calibration method, transistor, S-parameters, transmission of measurement results from the coaxial line to the microstrip line

REFERENCES

1. Savel'kaev, S. V. (2004). Coaxial test fixture. *Izmeritel'naya tekhnika [Measuring Equipment]*, 4, 65–68 [in Russian].
2. Zarzhetskaya, N. V., & Litovchenko, V. A. (2019). Coaxial contact device and its calibration method. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2019: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 9. Nauka. Oborona. Bezopasnost'-2019 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2019: International Scientific Conference: Vol. 9. Science. Defense. Security-2019]* (pp. 77–86). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
3. Savel'kaev, S. V., & Danilevich, S. B. (2020). *Design and Quality Control of Microwave Devices Using Simulation and Measurement Methods: Theoretical basis for designing analyzers/simulators for microwave devices*. Cambridge Scholars Publishing, 264 p.
4. Heuermann, H., & Schiek, B. (1977). Line network network (LNN): at alternative in-fixture calibration procedure. *IEEE Trans., MTT-45*(3), 408–413.
5. Evseev, V. I., Lavrichev, O. V., Nikulin, S. M., Petrov, V. V., & Shipunov, A. S. (2017). Technique for measuring s-parameters of microwave transistors in strip transmission lines with arbitrary wave resistance. *Vestnik vozdushno-kosmicheskoy oborony [Bulletin of Aerospace Defense]*, 4(16), 46–50 [in Russian].
6. Larichev, O. V., Lebedeva, E. A., Nikulin, S. M., Petrov, V. V., & Shipunov, A. A. (2016). Contact device for monitoring parameters of integrated structures and electronic components in microstrip transmission lines. In *Sbornik statey Pyatoy vserossiyskoy konferentsii: T. 1. Elektronika i mikroelektronika SVCh [Proceedings of the Fifth all-Russian Conference: Vol. 1. Electronics and Microelectronics of Microwave]* (pp. 310–314). Saint Petersburg: SPbGETU "LETI" Publ. [in Russian].
7. Filatov, V. A., Shchukin, A. V., & Bobkovich, P. I. (2016). Automated stand for input control of passive microwave components. In *Materialy 26-oy Mezhdunarodnoy Krymskoy konferentsii: SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii [Proceedings of 26-th International Crimean Conference: Microwave Technology and Telecommunication Technologies]* (pp. 1907–1912). Sevastopol [in Russian].
8. Official website of Withwave. (n. d.). Retrieved from <http://www.with-wave.com/t-probes> (accessed 14.06.2018).
9. Official website of Integrated Device Technologies. (n. d.). Retrieved from <http://www.idt.com> (accessed 14.06.2018).
10. Network Analysis Applying the 8510 TRL Calibration for Non-Coaxial Measurements. Technical Overview. (2014). USA: Keysight Technologies. Retrieved from <http://www.keysight.com> (accessed 14.06.2016).
11. Horibe, M. R., & Kishikawa, R. (2013). Metrological Traceability in Waveguide S-parameter Measurement at 1.0 THz band. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 62(6), 1814–1820.
12. Chen, L., Zhang, C., Reck, T. J., Arsenovic, A., Bauwens, M., Groppi, C., Lichtenberger, A. W., Weikle, R. M., & Barker, N. S. (2012). Terahertz Micromachined On-Wafer Probes: Repeatability and Re-liability. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 60(9), 2894–2902.
13. Hanning, J., Stenarcon, J., Yhland, K., Sobis, P. J., Bryllert, T., & Stake, J. (2014). Single-Flange 2-Port TRL Calibration for Accurate THz S-parameter Measurements of Waveguide Integrated Circuits. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 4(4), 582–587.
14. Hesler, J. L., Duan, Y., Foley, B., & Crowe, T. W. (2010). THz Vector Network Analyzer Measurement and Calibration. *21-st International Symposium on Space Terahertz Technology* (pp. 318–320). Oxford.
15. Caglayan, C., & Georgios, C. (2014). Trichopoulos and Sertel K. Non-Contact Probes for Device and Integrated Circuit Characterization in the THz and mmW Bands. *Transactions on Microwave Symposium (IMS)* (pp. 1–3).
16. Caglayan, C., Trichopoulos, G. C., & Sertel, K. (2014). Non-Contact Probes for On-Wafer Characterization of Sub-Millimeter-Wave Devices and Integrated Circuits. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 62(11), 2791–2801.
17. Dunsmore, J., Cheng, N., & Zhang, Y. (2011). Characterization of asymmetric fixtures with a two-gate approach. *Proceedings of the 77-th Microwave Measurement Conference (ARFTG)* (pp. 1–6).
18. Yoon, C., Tsiklauri, M., Zvonkin, M., Fan, J., Drewniak, J. L., Razmadze, A., Aflaki, A., Kim, J., & Chen, Q. B. (2014). Design Criteria of Automatic Fixture Removal (AFR) for Asymmetric Fixture De-embed-

ding. 2014 *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)* (pp. 654–659). Raleigh, North Carolina, USA.

19. PNA-X Series Microwave Network Analyzers. (2015). USA: Keysight Technologies. Retrieved from <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-02294/brochures/5990-4592.pdf>.

20. Vanel, J. (2007). Improved Evaluation of Planar Calibration Standards Using the TDR Preselection Method. *Acta Polytechnica*, 47(4–5), 102–106.

21. Scott, J. B. (2004). Investigation of a Method to Improve VNA Calibration in Planar Dispersive Media Through Adding an Asymmetrical Reciprocal Device. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 53(9), 3007–3013.

22. Evseev, V. I., Lebedeva, E. A., Nikulin, S. M., Petrov, V. V., & Shipunov, A. S. (2016). Technical means for measuring parameters of strip microwave devices. *Datchiki i sistemy [Sensors and Systems]*, 6(204), 23–27 [in Russian]

23. Savel'kaev, S. V., & Litovchenko, V. A. (2015). Method of calibration of a strip contact device. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2015: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 3. Siboptika-2015 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2015: International Scientific Conference: Vol. 3. Siboptika-2015]* (pp. 37–41). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

24. Zhu, N. H. (1999). Phase uncertainty in calibrating microwave test fixtures. *IEEE Trans., VTT-47*(10), 1917–1922.

25. Saveliev, S. V., & Gerasimenko, A. P. (1990). Contact device and calibration coordinated loading. A. S. 11578667 USSR, N 01 R 5/08. *Openings Inventions*, 26.

26. Gupta, K., Garj, R., & Chadha, R. (1987). *Mashinnoe proektirovanie SVCh-ustroystv [Machine design of microwave devices]*. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 432 p. [in Russian].

Received 27.07.2020

© S. V. Savelkaev, 2020

УДК 521.9342

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-238-245

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Виктор Мартынович Тиссен

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-45, e-mail: tissen@mail.kns.ru

Александр Сергеевич Толстиков

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-45, e-mail: tolstikov@mail.kns.ru

Галина Вячеславна Симонова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (913)724-67-47, e-mail: simgal@list.ru

В статье рассмотрена методика прогнозирования параметров вращения Земли (ПВЗ), отличающаяся от общепринятых тем, что для построения прогностических моделей используются различные по продолжительности временные ряды исходных данных. При этом оценка параметров моделей медленных трендовых изменений выполняется на интервале обучающей выборки порядка 100 лет. Для оценки параметров более быстрых квазипериодических и регулярных составляющих используются интервалы от 6 до 40 лет. Такой способ разбиения временного ряда на различные по длительности интервалы обучающей выборки позволяет получать адаптивные модели медленных и быстрых изменений временных рядов с последующим их объединением в полную прогностическую модель. Практическая реализация предлагаемой методики показала хорошую устойчивость результатов прогнозирования для всех ПВЗ независимо от даты начала прогноза, что подтверждается результатами ее апробации в различных международных проектах и программах.

Ключевые слова: параметры вращения Земли, моделирование, обучающая выборка, прогнозирование, всемирное время, движение полюса, аппроксимация

Введение

Повышение точности прогнозирования и определения параметров вращения Земли (ПВЗ), которые включают координаты северного полюса x_p , y_p и всемирное время $UT1$, актуально для развития многих фундаментальных наук о Земле и их практических приложений. Данные о ПВЗ нашли применение в геофизике при изучении процессов переноса вещества в мантии, ее взаимодействия с внешним ядром; в метеорологии при построении согласующих моделей изменений углового момента ветров и долгосрочного прогнозирования климата, динамики таяния ледников; других процессов, происходящих внутри Земли на суше и в океане [1–3].

Необходимость в прогнозах ПВЗ возникает при решении задач координатно-временных и навигационных определений (КВНО) современными глобальными навигационными системами (ГНСС). В частности, для оперативной поддержки работы Российской навигационной системы ГЛОНАСС требуется ежесуточное обновление прогнозных значений ПВЗ на сроки от 1 до 7 дней, которые должны своевременно закладываться в программное обеспечение бортового компьютера. В случае же перехода системы ГЛОНАСС на автономный режим функционирования (особый период) появляется необходимость в прогнозах ПВЗ на 60 дней [4, 5].

Постоянный рост требований к точности КВНО, а также развитие средств вычислительной и информационной техники в по-

следние десятилетия привели к появлению многих новых разнообразных методов прогнозирования ПВЗ. Однако ни один из них не может обеспечить высокого качества прогнозов на различных участках временных рядов ПВЗ. Это связано с тем, что одни методы могут с успехом применяться на участках без резких изменений рядов ПВЗ, а другие, наоборот, в периоды быстрых их изменений, что наиболее характерно для весеннего и осеннего периодов. В частности, в периоды быстрых изменений при прогнозе на 7–10 дней хорошие результаты показывает применение различных модификаций фильтра «Калмана», а при прогнозе на 30 и более дней предпочтение следует отдавать МНК и другим адаптивным методам [6–8].

В предлагаемом авторами методе за счет того, что оценка параметров медленных и быстрых изменений рядов ПВЗ производится на различных по длительности интервалах обучающей выборки, можно получить максимально приближенную к исходным данным адаптивную модель их полных изменений. Разделение сложного вращения Земли на более простые трендовые и квазипериодические вариации позволяет лучше отделить регулярную прогнозируемую составляющую изменений рядов ПВЗ от нерегулярных и случайных колебаний и повысить, таким образом, устойчивость получения результатов.

Методы и материалы

История инструментальных наблюдений за вращением Земли (ВЗ) насчитывает немногим более 3,5 столетий. Такой сравнительно небольшой в историческом масштабе отрезок времени не позволяет достоверно выявить вековые закономерности в нестабильностях ВЗ и, соответственно, построить их математические модели. Кроме этого, точность и периодичность астрономических данных по наблюдениям за ВЗ в прошлые века была значительно ниже, чем в настоящее время. В частности, до середины восьмидесятых годов прошлого века основными средствами наблюдений за вращением Земли были различные специализированные астрономические инструменты, среди которых наибольшее распро-

странение получили астролябия Донжона и Пассажный инструмент (ПИ). Разрешающая способность лучших ПИ составляла порядка 10 мс за часовой сеанс наблюдений [6]. Согласно данным, приведенным в [9], погрешность совокупных определений всемирного времени всеми отечественными ПИ находилась на уровне 3 мс. Благодаря этим наблюдениям в XIX и XX вв. были открыты чандлеровский и годовой периоды в перемещениях северного полюса, а также годовые колебания угловой скорости вращения Земли [9].

Современные спутниковые и радиоинтерферометрические методы определений ПВЗ позволили на два порядка повысить точность в сравнении с эпохой астрономических наблюдений за звездами и планетами. В настоящее время по данным Международной службы вращения Земли (МСВЗ-IERS) погрешности определений ПВЗ находятся на уровне 15 мкс по всемирному времени и 10^{-5} угл. секунд по координатам полюса [10]. В результате такого повышения точности определений ПВЗ стали наблюдаемы эффекты от изменения стока океанических течений, изменения угловых моментов ветров, выпадения осадков, таяния льдов в Северном океане и в горах. На пределе разрешающей способности идентифицируются отклики от землетрясений [11]. С повышением точности определений ПВЗ возросли также и требования к точности их прогнозирования. Согласно требованиям федерально-целевой программы (ФЦП) развития ГЛОНАСС до 2020 г., среднегодовая погрешность прогнозирования всемирного времени на 2 недели не должна превышать 1,5 мс [5]. Выполнение этих требований является сложной научно-технической задачей, поскольку ни один из известных методов не может гарантировать стабильные результаты на протяжении длительного времени. Существующие в мире методы прогнозирования ПВЗ основаны на построении численно-аналитических и эмпирических моделей ВЗ.

Первые исследования по созданию численно-аналитических моделей изменений координат полюса, предложенные Л. Эйлером, позволили теоретически рассчитать для твердой Земли 305-суточный период свободной нутации. Позднее, на основании анализа

наблюдений за изменчивостью широт обсерватории, С. Чандлером было установлено, что в движении полюса присутствуют две периодические составляющие: 365 и 435 звездных суток. При этом компонента 365 суток, связанная с годовым обращением Земли вокруг Солнца, является вынужденной, а компонента 435 суток – свободной, чандлеровской [12, 13]. Несмотря на огромный прогресс со времен Л. Эйлера в изучении физики Земли, существующих знаний все еще недостаточно для построения полноценной аналитической модели. Поэтому эти модели пока не нашли широкого применения в задачах спутниковой навигации, а используются в основном для вычисления многолетних и тысячелетних сглаженных прогнозов ПВЗ [14, 15].

Статистические методы, в отличие от численно-аналитических, значительно более чувствительны к текущим изменениям ПВЗ, что позволяет в большинстве случаев обеспечивать выдвигаемые ГНСС требования к точности и оперативности прогнозов ПВЗ. Однако для этого требуется переоценка параметров применяемых моделей, которая в зависимости от применяемого метода и характера изменений последних известных данных выполняется с различной регулярностью. В случае использования Калмановской фильтрации или нейронных сетей такая переоценка выполняется ежедневно по мере поступления новых данных, а при использовании детерминированных моделей определяется критериями, характеризующими степень соответствия модельных значений ПВЗ их действительным значениям. Обычно такие модели включают в себя уравнение тренда и ограниченное число гармоник, параметры которых оцениваются с помощью метода наименьших квадратов (МНК), спектрального Фурье-анализа и других статистических методов [6, 16, 17].

Поскольку всемирное время – наиболее востребованный параметр ПВЗ для решения задач ГНСС, то в рамках данной статьи технология прогнозирования рассмотрена только для этого параметра. С небольшими изменениями она может быть применена и для прогнозирования движения полюса. Как уже отмечалось, построение модели в предлагаемом

нами методе производится на интервалах обучающей выборки различной длины от 6 до 100 лет. В частности, оценивание параметров тренда, заданного в виде суперпозиции ограниченного числа долгопериодических гармоник, производится на интервалах от 40 до 100 лет. Оценивание параметров более высокочастотных гармоник, моделирующих квазипериодические и сезонные вариации всемирного времени, производится на интервалах от 6 до 40 лет после внесения в исходный временной ряд трендовых изменений, в то время как в традиционных методах для этих целей используют полиномы низких степеней, коэффициенты которых оцениваются с помощью МНК на интервале известных данных от 1 до 5 лет [17, 18].

В предлагаемом авторами методе построение адаптивных моделей медленных и быстрых изменений рядов ПВЗ производится на различных по длительности интервалах данных, непосредственно предшествующих дате начала прогноза, которые принято называть интервалами обучающей выборки.

Формулу прогноза всемирного времени можно представить в виде

$$\Delta UT1_{pr,i} = \Delta UT1_{rel,0} - \Delta UT1_{pra,0} + \Delta UT_{pra,i} + \Delta T_{pp,i} + \Delta T_{trn,i} + \Delta T_{sez,i}, \quad (1)$$

где $\Delta UT1_{pr,i}$ – прогноз $\Delta UT1$ на i -й день;

$\Delta UT1_{rel,0}$ – последнее из известных значений $\Delta UT1$;

$\Delta UT1_{pra,0}$ – прогноз $\Delta UT1$ по модели авторегрессии на нулевую дату;

$\Delta UT1_{pra,i}$ – прогноз $\Delta UT1$ по модели авторегрессии на i -й день;

$\Delta T_{pp,i}$ – поправки за счет влияния лунно-солнечных приливов в океанах определяются по методике, изложенной в [17];

$\Delta T_{trn,i}$, $\Delta T_{sez,i}$ – поправки за трендовые и сезонные вариации в неравномерностях вращения Земли соответственно.

Для учета псевдослучайных колебаний $\Delta UT1_{pra,i}$ используется авторегрессионный анализ с учетом высших производных, описанный в [19].

Рассмотрим некоторые особенности оценивания параметров трендовых и сезонных вариаций.

На интервале известных значений $\Delta UT1$ длительностью до 100 лет задается n предполагаемых гармонических компонент с периодами T_j , где $j = 1 \dots n$. Далее, для каждой компоненты T_j на исследуемом интервале известных данных задаются отрезки m длиной $L = \frac{T_j}{2\Delta T}$ (ΔT соответствует периоду в 1 день). Затем производится смещение отрезков m относительно друг друга на половину периода предполагаемой искомой компоненты и их совмещение с началом первого. На полученных, таким образом, совмещенных отрезках выполняется суммирование значений $\Delta UT1$ по формуле

$$\Delta UT1_{S,i} = \sum_{k=1}^m (-1)^{k+1} \cdot \Delta UT1_{i+lk}, \quad (2)$$

где $\Delta UT1_{S,i}$ – суммарный ряд;

$i = 1 \dots l$ – номер дня в отрезке;

$k = 1 \dots m$ – номер отрезка на выбранном интервале данных.

В итоге будет получен преобразованный ряд, в котором гармоника с периодом T_j возрастет по амплитуде в m раз, в то время как

уровень нерегулярных составляющих увеличится только в $\sqrt{m}$ раз.

Оценка параметров, выделенных в преобразованном ряде $\Delta UT1_{S,i}$ гармоник с периодами T_j , выполняется с помощью метода наименьших квадратов. При этом аппроксимирующая гармоническая функция $f_j(t_i)$ имеет вид

$$f_j(t_i) = A_j \sin\left(\frac{2\pi t_i}{T_j} + \phi_j\right). \quad (3)$$

Для применения МНК уравнение (3) приводится к линейному виду

$$f_j(t_i) = a_j \sin\left(\frac{2\pi t_i}{T_j}\right) + b_j \cos\left(\frac{2\pi t_i}{T_j}\right), \quad (4)$$

где коэффициенты a_j, b_j находятся из условия

$$\sum_{i=1}^n (f_j(t_i) - \Delta T_i)^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

где $\Delta T_i = \Delta UT1_{S,i}$ – аппроксимируемый ряд.

Подставляя уравнение (4) в условие (5) и дифференцируя его относительно неизвестных a_j и b_j , получим систему из двух линейных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n \left(a_j \sin\left(\frac{2\pi t_i}{T_j}\right) + b_j \cos\left(\frac{2\pi t_i}{T_j}\right) - \Delta T_i \right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi t_i}{T_j}\right) &= 0 \\ \sum_{i=1}^n \left(a_j \sin\left(\frac{2\pi t_i}{T_j}\right) + b_j \cos\left(\frac{2\pi t_i}{T_j}\right) - \Delta T_i \right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi t_i}{T_j}\right) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Найденные из решения системы уравнений (6) коэффициенты a_j, b_j для заданного числа гармонических компонент n подставляются в (4). В результате будут выделены гармонические компоненты с периодами T_j , для каждой из которых оценивается погрешность аппроксимации $\sigma_{анп,j}$. Затем, из числа найденных компонент T_j выбирается компонента с минимальной погрешностью аппрок-

симации и в исходный ряд $\Delta UT1$ вносятся поправки, обусловленные вкладом найденной гармоники.

Поиск других гармонических компонент осуществляется аналогичным образом до достижения заданного предельно малого значения критерия близости аппроксимирующей функции $f(t)$ к исходному временному ряду $\Delta UT1$. По завершению описанной расчетной процедуры будет получен ряд адаптивных

гармоник, оптимально моделирующих изменения действительных значений всемирного времени.

Приведенный алгоритм прогнозирования всемирного времени применим и для вычисления прогнозов координат полюса. При этом в изменениях полюса не учитываются приливные гармоники ввиду их малости, а также отсутствуют глобальные тренды.

Результаты

По предлагаемым в настоящей статье методике и алгоритмам прогнозирования ПВЗ составлены вычислительные программы, с помощью которых в международном пилотном проекте Earth Orientation Parameters Combination of Prediction Pilot Project (ЕОРСРРР), проходившем под эгидой МСВЗ, были получены результаты мирового уровня.

В таблице приведены среднеквадратические погрешности (СКП или RMS в западной интерпретации) прогнозов всемирного времени UT1 и координат полюса x_p , y_p , взятые из финального отчета ЕОРСРРР [20], на сроки

1, 10, 30, 60 и 90 дней, полученные по предлагаемой методике за время ее апробации в проекте ЕОРСРРР в сравнении с аналогичными данными обсерватории USNO, которая также участвовала в данном проекте.

Анализируя данные таблицы, можно отметить, что независимо от выбранного параметра ВЗ прогнозы, вычисляемые по предлагаемой методике, имеют меньшие погрешности. Исключение составляют только краткосрочные (от 1 до 10 суток) прогнозы, где погрешности оказались приблизительно одинаковыми. Более полное представление о результатах проекта ЕОРСРРР представлено в [20].

На рисунке приведены графики погрешностей СКП (RMS) прогнозов всемирного времени UT1 на каждый день до глубины 45 дней, ежедневно вычисляемых по предлагаемой методике в сравнении с аналогичными погрешностями, вычисляемыми в USNO и в лаборатории реактивного движения JPL (США) за период с 1 сентября 2010 г. по 31 декабря 2019 г. Данные графики любезно предоставлены доктором физ. мат. наук, главным научным сотрудником Пулковской обсерватории ГАО РАН З. М. Малкиным.

Сравнение СКП методов прогнозирования по данным ЕОРСРРР

СКП _{прогн.} параметров ВЗ	Метод прогнозирования	Дальность прогноза, дни				
		1	10	30	60	90
СКП _{прогн.} всемирного времени, мс	Предлагаемый	0,057	0,63	2,90	6,60	9,75
	Применяемый в USNO	0,060	0,62	3,12	7,20	11,55
СКП _{прогн.} x_p , mas	Предлагаемый	0,340	3,60	9,70	15,90	20,50
	Применяемый в USNO	0,370	4,00	10,00	17,20	23,40
СКП _{прогн.} y_p , mas	Предлагаемый	0,290	2,60	7,30	11,20	16,10
	Применяемый в USNO	0,320	2,70	7,70	12,30	18,30

СКП (RMS) прогнозов всемирного времени USNO (зеленый), JPL (синий) и по предлагаемой методике (красный)

Из графиков, приведенных на рисунке, видно, что до 10 дней погрешности прогнозов, вычисленных в USNO, JPL и по предложенной методике, отличаются незначительно, а после 20 дней наблюдается пропорциональное увеличение разности между ними, что показывает преимущества предложенного авторами метода в сравнении с USNO, JPL.

Заключение

В заключение следует отметить, что приведенные методика и алгоритмы прогнозирования ПВЗ основаны на способе применения обычного МНК к анализу временных рядов. При этом в разные временные эпохи вычисляемые по данной методике прогнозы ПВЗ показывали высокие по точности результаты.

Это, в частности, подтверждается результатами, полученными в ЕОРСРРР. Необходимо также отметить, что статистические методы прогнозирования временных рядов, обладающих свойствами эргодичности и стационарности, к которым при некоторых ограничениях можно отнести временные ряды ПВЗ, не могут гарантировать устойчивость результатов прогнозирования в разные временные эпохи. В любых построениях статистических моделей ПВЗ всегда остается немодулируемая составляющая, связанная с внезапными изменениями направления тренда. Тем не менее, статистическое прогнозирование ПВЗ остается на сегодняшний день единственным методом, с помощью которого возможно достижение точностей, востребованных в современных задачах КВНО, космической геодезии и во многих других науках о Земле.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сидоренков Н. С. Физика нестабильностей вращения Земли. – М. : Наука. Физматлит, 2002. – 376 с.
2. Zotov L., Sidorenkov N. S., Bizouard C., Shum C. K., Shen W. B. Multichannelsingular spectrum analysis of the axial atmospheric angular momentum // *Geodesy and Geodynamics*. – 2017. – Vol. 8, No 6. – P. 433–442.
3. Tolstikov A. S., Tissen V. M., Simonova G. V. Long-term climate prediction by means of Earth rotation rate adaptive variations models // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. – 2019. – Vol. 11208. – P. 1120887-1–1120887-5.
4. Жуков А. Н., Титов Е. В. Основные направления повышения точности эфемеридного обеспечения системы ГЛОНАСС // Пятая Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение (КВНО-2013)», 15–19 апреля 2013 г. – СПб., 2013. – С. 117–118.
5. О федеральном бюджете на 2015 год и на плановый период 2016 и 2017 годов : закон РФ от 01.12.2014 № 384-ФЗ [Электронный ресурс] // Федеральная целевая программа «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы» в рамках государственной программы Российской Федерации «Космическая деятельность России на 2013–2020 годы». – 2014. – С. 1–144. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
6. Горшков В. Л. О методах прогнозирования в геодинимике // *Изв. ГАО РАН*. – 2004. – № 214. – С. 313–335.
7. Schuh H. e. a. Earth Orientation Parameters Prediction Comparison Campaign – first summary // *Geophys. Research Abstracts*. – 2008. – V. 10. – P. 46.
8. Лукашин Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. – М. : Финансы и статистика, 2003. – С. 33–37.
9. Бакулин П. И., Блинов Н. С. Служба точного времени. – М. : Наука, 1968. – 320 с.
10. Кауфман М. Б. Точные методы измерения параметров вращения Земли в интересах навигационно-временных определений. Точные измерения для высоких технологий : монография / под общей ред. П. А. Красовского. – Менделеево : ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008. – С. 80–118.
11. Пасынок С. Л. О влиянии землетрясений на продолжительность суток // *Измерительная техника*. – 2012. – № 5. – С. 11–13.
12. Подобед В. В., Нестеров В. В. – Общая астрометрия. – М. : Наука, 1975. – 551 с.
13. Chandler S. C. On a New Component of the Polar Motion // *Astron. J.* – 1901. – No. 494. – P. 109–112.
14. Филиппова А. С. Численно-аналитическое исследование параметров вращения Земли с приложениями для спутниковой навигации: дисс. канд. физ.-мат. наук. – М. : Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2015. – 121 с.

15. Акуленко Л. Д., Кумакшев С. А., Марков Ю. Г., Рыхлова Л. В. Прогноз движения полюса деформируемой Земли // *Астрономический журнал*. – 2002. – № 10. – С. 952–960.
16. Kaufman M. N., Pasyok S. L. Russian state time and Earth rotation service: observation, EOP series, prediction // *Artificial Satellites*. – 2010. – Vol. 45, No 2. – P. 81–86.
17. McCarthy D. D., Petit G. IERS Conventions // *IERS Technical Note*. – 2004. – No 32. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie. – Frankfurt am Main, 2003.
18. International Earth Rotation and Reference Systems Service. Service International de la Rotation de la Terre et des Systemes de Reference [Electronic resource]. – Mode of access: <http://maia.usno.navy.mil/eopcrrp/eopcrrp.html> (дата обращения: 19.06.2020).
19. Тиссен В. М. СНИИМ–СГГА в Международном проекте ЕОРСРРР (Earth orientation parameters combination of prediction pilot project) // *Вестник СГГА*. – 2011. – Вып. 1 (14). – С. 97–104.
20. Earth Orientation Parameters Combination of Prediction Pilot Project [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://maia.usno.navy.mil/eopcrrp/eopcrrp.html> (дата обращения: 19.06.2020).

Получено 06.07.2020

© В. М. Тиссен, А. С. Толстиков, Г. В. Симонова, 2020

PREDICTION OF EARTH ROTATION PARAMETERS WITH USING ADAPTIVE HARMONIC PATTERNS

Victor M. Tissen

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Special Devices, Innovations, and Metrology, phone: (383)361-07-45, (383)229-75-30, e-mail: tissen@mail.ksn.ru

Aleksandr S. Tolstikov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Department of Special Devices, Innovation and Metrology, phone: (383)361-07-45, e-mail: tolstikov@mail.ksn.ru

Galina V. Simonova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Special Devices, Innovation and Metrology, phone: (913)724-67-47, e-mail: simgal@list.ru

The article discusses the methodology for predicting the Earth's rotation parameters (ERP), which differs from the generally accepted one's in that for constructing prognostic models, time series of initial data of various durations are used. At the same time, the estimation of the parameters of models of slow trend changes performed in the interval of the training sample of about 100 years. Intervals from 6 to 40 years are used to evaluate the parameters of the faster quasiperiodic and regular components. This method of dividing the time series into training sample intervals of different durations allows obtaining adaptive models of slow and fast changes in time series with their subsequent integration into a complete prognostic model. The practical implementation of the proposed methodology showed high stability of the forecasting results for all ERP regardless start date of the forecast, which was confirmed by the results of its testing in various international projects and programs.

Keywords: Earth rotation parameters, modeling, training sample, forecasting, universal time, pole movement, approximation

REFERENCES

1. Sidorenkov, N. S. (2002). *Fizika nestabil'nostey vrashcheniya Zemli [Earth rotation instability physics]*. Moscow: Nauka. Fizmatlit Publ., 376 p. [in Russian].

2. Zotov, L., Sidorenkov, N. S., Bizouard, C., Shum, C. K., & Shen, W. B. (2017). Multichannelsingular spectrum analysis of the axial atmospheric angular momentum. *Geodesy and Geodynamics*, 8(6), 433–442.
3. Tolstikov, A. S., Tissen, V. M., & Simonova, G. V. (2019). Long-term climate prediction by means of Earth rotation rate adaptive variations models. *Proceedings of SPIE – the International Society for Optical Engineering*, 11208, 1120887-1–1120887-5.
4. Zhukov, A. N., & Titov, E. V. (2013). The main directions of increasing the accuracy of the ephemeris support of the GLONASS system. In *Pyataya Vserossiyskaya konferentsiya: Fundamental'noye i prikladnoye koordinatno-vremennoye obespecheniye (KVNO-2013) [Proceedings of Fifth All-Russian Conference: Fundamental and Applied Coordinate-Time Support (KVNO-2013)]* (pp. 117–118). St. Petersburg [in Russian].
5. Law of the Russian Federation of January 12, 2014 No. 384. On the federal budget for 2015 and for the planning period 2016 and 2017, Concept of the federal target program "Maintenance, development and use of the GLONASS system for 2012–2020" within the framework of the state programs of the Russian Federation "Space activities of Russia for 2013–2020" (pp. 1–144). Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
6. Gorshkov, V. L. (2005). On forecasting methods in geodynamics. *Izvestiya GAO RAN. [Proceedings of the GAO RAS]*, 214, 313–335 [in Russian].
7. Schuh, H., & et. al. (2008). Earth Orientation Parameters Prediction Comparison Campaign – first summary. *Geophys. Research Abstracts*, 10, P. 46.
8. Lukashin, Yu. P. (2003). *Adaptivnye metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennykh ryadov [Adaptive methods of short-term forecasting of time series]* (pp. 33–37). Moscow: Finansy i statistika Publ. [in Russian].
9. Bakulin, P. I., & Blinov, N. S. (1968). *Sluzhba tochnogo vremeni [Exact Time Service]*. Moscow: Nauka Publ., 320 p. [in Russian].
10. Kaufman, M. B. (2008). Exact methods for measuring the parameters of the Earth's rotation in the interests of navigational-temporal determinations. In *Tochnyye izmereniya dlya vysokikh tekhnologiy [Precise measurements for high technology]* (pp. 80–118). P. A. Krasovskiy (Ed.). Mendeleevo: FSUE VNIIFTRI Publ. [in Russian].
11. Pasynok, S. L. (2012). On the effect of earthquakes on the length of the day. *Izmeritel'naya tekhnika [Measuring Technique]*, 5, 11–13 [in Russian].
12. Podobed, V. V., & Nesterov, V. V. (1975). *Obshchaya astrometriya [General astrometry]*. Moscow: Nauka Publ., 551 p. [in Russian].
13. Chandler, S. C. (1901). On a New Component of the Polar Motion. *Astron. J.*, 494, 109–112.
14. Filippova, A. S. (2015). Numerically-analytical study of the Earth's rotation parameters with applications for satellite navigation. *Candidate's thesis*. Moscow, 121 p. [in Russian].
15. Akulenko, L. D., Kumakshev, S. A., Markov, Yu. G., & Rykhlova, L. V. (2002). Forecast of the movement of the pole of the deformable Earth. *Astronomicheskij zhurnal [Astronomical Journal]*, 10, 952–960 [in Russian].
16. Kaufman, M. N., & Pasynok, S. L. (2010). Russian state time and Earth rotation service: observation, EOP series, prediction. *Artificial Satellites*, 45(2), 81–86.
17. McCarthy, D. D., & Petit, G. (2004). IERS Conventions. *IERS Technical Note*, 32.
18. International Earth Rotation and Reference Systems Service. Service International de la Rotation de la Terre et des Systemes de Reference. (n. d.). Retrieved from <http://maia.usno.navy.mil/eopcpnp/eopcpnp.html>.
19. Tissen, V. M. (2011). SNIIM – SSGA in the International project EORSRP (Earth orientation parameters combination of prediction pilot project). *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 1(14), 97–104 [in Russian].
20. Earth Orientation Parameters Combination of Prediction Pilot Project. (n. d.). Retrieved from <http://maia.usno.navy.mil/eopcpnp/eopcpnp.html>.

Received 06.07.2020

© V. M. Thyssen, A. S. Tolstikov, G. V. Simonova, 2020

ЮБИЛЕЙНЫЕ ДАТЫ

**КОНСТАНТИНУ ФЕДОРОВИЧУ АФОНИНУ,
КАНДИДАТУ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК, ДОЦЕНТУ КАФЕДРЫ
КОСМИЧЕСКОЙ И ФИЗИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ СГУГиТ – 75 ЛЕТ**

**TO THE 75-th ANNIVERSARY OF KONSTANTIN FEDOROVICH AFONIN,
CANDIDATE OF TECHNICAL SCIENCES, DOCENT
OF SPACE AND PHYSICAL GEODESY DEPARTMENT, SSUGT**

Константин Федорович Афонин родился 3 ноября 1945 г. в г. Новосибирске, в 1963 г. поступил и в 1968 г. закончил НИИГАиК по специальности «Астрономо-геодезия» и остался работать в институте ассистентом кафедры высшей геодезии (ныне – космической и физической геодезии).

Закончил целевую аспирантуру на кафедре вычислительной математики НИИГАиК и в 1979 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Применение нелинейного программирования для решения некоторых задач оптимального проектирования геодезических построений», в 1983 г. получил ученое звание «доцент».

За время работы в НИИГАиК – СГГА – СГУГиТ Константин Федорович проявил себя как высококвалифицированный, автори-

тетный педагог, постоянно совершенствующий свой профессиональный уровень. В настоящий период Константин Федорович является ведущим специалистом университета в области построения и уравнивания государственных геодезических сетей, одним из разработчиков современной региональной системы координат, опытейшим преподавателем кафедры и наставником ее более молодых сотрудников. К. Ф. Афонин – крупный ученый в области высшей геодезии и координатных преобразований. Ведет полный объем лекционных и практических занятий по профильным дисциплинам, в том числе авторский спецкурс «САПР геодезических сетей», постоянно обновляя его с учетом современных новаций в технике, технологиях и организации производства, руководит практиками, курсовым и дипломным проектированием, занимается научной работой, активно привлекает к ней своих студентов. Автор более 50 научных и учебно-методических работ.

Отмечен наградами: «Отличник высшей школы» и «Отличник геодезии и картографии», «Почетный геодезист», почетными знаками «За отличные успехи в работе», «За труд на благо города» в честь 110-летия и 115-летия со дня основания г. Новосибирска, почетными грамотами администрации Ленинского района г. Новосибирска и правительства Новосибирской области.

Редакция журнала сердечно поздравляет юбиляра и желает ему крепкого здоровья, благополучия и дальнейшего творчества!

**БОРИСУ ТИМОФЕЕВИЧУ МАЗУРОВУ, ДОКТОРУ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК,
ПРОФЕССОРУ КАФЕДРЫ КОСМИЧЕСКОЙ И ФИЗИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ
СГУГиТ – 60 ЛЕТ**

**TO THE 60-th ANNIVERSARY OF BORIS TIMOFEEVICH MAZUROV,
DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCE, PROFESSOR
OF SPACE AND PHYSICAL GEODESY DEPARTMENT, SSUGT**

6 ноября исполнилось 60 лет доктору технических наук, профессору Борису Тимофеевичу Мазурову. В 1982 г. он закончил НИИГАиК по специальности «Астрономо-геодезия» и был оставлен стажером-исследователем на кафедре высшей геодезии. В 1984–1986 гг. – воинская служба в звании старшего лейтенанта, участие в создании ряда объектов на космодроме Байконур. В 1986 г. Борис Тимофеевич возвращается в НИИГАиК на кафедру вычислительной математики. Затем поступление в аспирантуру, руководителем которой стал известный специалист в области геодинамики доктор технических наук, профессор В. К. Панкрусин.

После защиты кандидатской диссертации Б. Т. Мазуров более 5 лет руководит кафедрой высшей геодезии, затем поступает в докторантуру, опять «под крыло» В. К. Панкрусина.

Успешная защита докторской диссертации «Изучение геодинамических процессов на основе моделирования геодезических и гра-

витационных параметров» произошла в его день рождения – 6 ноября 2007 г.

Последующая научно-педагогическая работа проходила на «родной» кафедре, в настоящее время – космической и физической геодезии. Область научных интересов определилась окончательно, ее результатами стали более 80 научных статей, три монографии: «Идентификация движений и напряженно-деформированного состояния самоорганизующихся геодинамических систем по комплексным геодезическим и геофизическим наблюдениям» (в соавторстве, 2004 г.), «Моделирование геодезических и гравитационных параметров при изучении геодинамических процессов» (2014 г.), «Математическое моделирование при исследовании геодинамики» (2019 г.), два учебника: «Высшая геодезия» (2016 г.) и «Геодезические методы изучения геодинамических процессов» (2020 г.), несколько учебных пособий, среди них «Математическое моделирование по геодезическим данным» (2013 г.), «Современные проблемы геодезии и дистанционного зондирования» (2018 г.). В 2021 г. ожидается публикация учебника «Высшая геодезия» в издательстве «Лань» (Санкт-Петербург). Сегодня Борис Тимофеевич востребован как приглашенный профессор другими, в том числе зарубежными вузами в качестве лектора авторских спецкурсов и оппонента кандидатских и докторских диссертаций. Он активный член диссертационных советов Д 212. 251. 02. Д 212.251. 04, член редколлегий основных научных изданий университета, других научно-образовательных организаций. Многолетняя деятельность Бориса Тимофеевича отмечена рядом отличий: знаками «Отличник геодезии и картографии», «Почетный геодезист», «За отличные успехи в работе», «За работу на благо г. Новосибирска», почетными грамотами администрации г. Новосибирска и Новосибирской области, оргкомитетами конкурсов на лучшее научное издание.

Редакция «Вестника СГУГиТ» поздравляет юбиляра и желает Борису Тимофеевичу крепкого здоровья, оптимизма и творческих успехов!

**ВИКТОРУ БРУНОВИЧУ ШЛИШЕВСКОМУ,
ИЗВЕСТНОМУ УЧЕНОМУ-ОПТИКУ – 70 ЛЕТ**

**TO THE 70-th ANNIVERSARY OF VIKTOR BRUNOVICH SHLISHEVKIJ,
FAMOUS SIBERIAN SCIENTIST-OPTICIST**

Виктор Брунович Шлишевский, доктор технических наук (1997 г.), профессор (1999 г.), почетный работник высшего профессионального образования РФ, действительный член Оптического общества им. Д. С. Рождественского, один из авторитетных специалистов в области теории и создания новой высокоинформативной оптико-электронной, в частности, спектральной аппаратуры, родился 12 августа 1950 г. в г. Новосибирске. В 1972 г. окончил оптический факультет Новосибирского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (НИИГАиК) по специальности «Оптические приборы и спектроскопия», а в 1975 г. – аспирантуру при Государственном оптическом институте им. С. И. Вавилова.

После аспирантуры возвратился в родной вуз и проработал в нем свыше 30 лет, в том числе заведующим кафедрой оптических приборов и профессором кафедр фотограмметрии и дистанционного зондирования, наносистем и оплотехники.

Итогом серьезной научно-методической работы стали курсы «Теория спектральных приборов», «Спектральные приборы», «Оптико-физические приборы», «Оптико-электронные приборы», «Оптико-электронные

приборы для научных исследований», «Оптико-электронные приборы экологического мониторинга», «Основы видеоспектрометрии», определившие глубокую связь последних достижений науки, технологии, организации производства и образования. За большую работу по подготовке инженерно-технических и научных кадров Виктор Брунович был награжден почетной грамотой Министерства и Президиума ЦК профсоюза оборонной промышленности.

Сфера профессиональных научных интересов – проведение исследований по разработке новой высокоинформативной спектральной и военной оптико-электронной аппаратуры – определилась еще в аспирантуре. С 1976 г. В. Б. Шлишевский – руководитель комплексных хозяйственных и госбюджетных НИР теоретического и прикладного характера, в том числе по координационным планам Минвуза, АН СССР и Правительства России.

С 2000 г. Виктор Брунович включился в тематику Конструкторско-технологического института прикладной микроэлектроники (КТИПМ) СО РАН, в том числе, не теряя связи с СГГА, в должности заместителя директора КТИПМ по научной работе (2004–2008 гг.). В 2001–2002 гг. по его инициативе и личном участии в СГГА создана система менеджмента качества, обеспечивающая условия выполнения гособоронзаказа и позволившая вузу получить лицензию на производство военной техники. В 2003 г. для выполнения подобных работ в СГГА была создана научно-исследовательская лаборатория перспективных оптико-электронных систем и технологий и В. Б. Шлишевский возглавил ее работу. За последующий 15-летний период лабораторией в содружестве с профильными коллективами СО РАН и МО РФ был успешно выполнен ряд НИР по созданию современной элементной базы и новых образцов военной техники.

Главным научным результатом В. Б. Шлишевского стало формирование нового актуального научно-практического направления в России – светосильной растровой спектроскопии, в рамках которого были созданы не имеющие аналогов лабораторные, полевые и бортовые приборы и установки, востребованные для оценки пространственно-спектральных характеристик объектов и фонов в системах дистанционного зондирования различного назначения, в том числе в решении задач физики атмосферы и океана, экологии и охраны окружающей среды, контроля промышленных производств.

В. Б. Шлишевский – автор более 200 научных работ, около трети которых опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях, 22 авторских свидетельств и патентов на изобретения, ряда учебных пособий и методических разработок. Его монография «Теория и практика светосильной растровой спектроскопии» (2005 г.) стала значимым итогом не только деятельности автора, но и научного направления в целом.

Исследования, проводимые В. Б. Шлишевским, получили высокую оценку научной общественности: он – лауреат Всесоюзного конкурса научных работ «Экотехника-82»

(1982 г.), медали и премии АН СССР для молодых ученых (1984 г.), медали С. Э. Фриша Оптического общества им. Д. С. Рождественского (2010 г.), победитель ряда конкурсов по спецтематике.

В разные годы В. Б. Шлишевский участвовал в работе Межведомственной комиссии по спектральным приборам при Миноборонпроме и РАН, Учебно-методического объединения по образованию в области приборостроения и оптотехники Минобрнауки РФ, редколлегий журналов «Вестник СГУГиТ» и «Известия вузов. Приборостроение» (остается в ней по сей день), научных сборников и тематических выпусков журналов, оргкомитетов Международных конференций и выставок, являлся научным руководителем НИИ приборостроения и оптотехники СГГА – СГУГиТ и научной школы «Современная высокоинформативная спектральная и военная оптико-электронная аппаратура». С 1987 г. В. Б. Шлишевский – член ряда специализированных советов по защите кандидатских и докторских диссертаций, в 2013–2015 гг. – председатель диссертационного совета Д 212.251.01 при СГГА. Под его руководством и при научном консультировании подготовлены 2 докторские и 5 кандидатских диссертаций.

Редакция журнала желает юбиляру крепкого здоровья, благополучия и дальнейших творческих успехов!

**ПАМЯТИ КОНСТАНТИНА МИХАЙЛОВИЧА АНТОНОВИЧА
(1940–2020)**

**IN MEMORY OF KONSTANTIN MIKHAILOVICH ANTONOVICH
(1940–2020)**

После продолжительной болезни 21 ноября 2020 г. не стало Константина Михайловича Антоновича – выдающегося ученого, заслуженного работника геодезии и картографии, почетного геодезиста, внесшего неоценимый вклад в науку в таких областях, как геодезическая астрономия, космическая геодезия, ГНСС-технологии.

Константин Михайлович родился 6 января 1940 г. в селе Бакчар Томской области. В 1943 г. вместе с родителями переехал в город Колпашево, где в 1947 г. поступил, а в 1957 г. окончил среднюю школу № 1. После окончания школы переехал в Новосибирск, где выбрал в качестве альма-матер Новосибирский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (НИИГАиК). В 1963 г. окончил его по специальности «Астрономо-геодезия». Во время производственных практик Константин Михайлович проходил стажировки в геодезических партиях, базировавшихся в городах Богучаны Красноярского края, Хабаровске.

Вся его трудовая, а затем и научная деятельность связана с Новосибирским институтом инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (сейчас – Сибирский государственный университет геосистем и технологий). Константин Михайлович начал свою преподавательскую деятельность с должности ассистента кафедры высшей геодезии, пе-

рейдя затем в 1966 г. на кафедру астрономии и гравиметрии, где прошел большой путь от ассистента до заведующего кафедрой. В последние годы он занимал должность профессора-консультанта кафедры космической и физической геодезии – преемницы кафедр высшей геодезии и астрономии и гравиметрии. С 1965 по 1969 г. К. М. Антонович обучался в очной аспирантуре НИИГАиК. Научными руководителями были Лозинский Александр Маркович, а в конце – Проворов Константин Леонтьевич. В 1972 г. защитил кандидатскую диссертацию в Московском государственном институте инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (МИИГАиК) на тему «Определение астрономических координат пунктов по фотографиям звездного неба». В 1980 г. Константину Михайловичу было присвоено ученое звание доцента кафедры астрономии и гравиметрии.

С запуском первого искусственного спутника Земли в 1957 г. Константин Михайлович был активным участником оптических, а затем и фотографических наблюдений спутников на станции слежения за ИСЗ Астрономического Совета АН СССР, открытой на базе НИИГАиК. В течение 15 лет (с 1963 по 1978 г.) он занимал должность начальника этой станции. За этот период им было выполнено более ста тысяч измерений положения спутников. По заданию Астрономического Совета в 1974 г. он был командирован для фотографических наблюдений искусственных спутников Земли в Республику Мали.

За время пребывания в Республике Мали с 30 сентября 1974 г. по 29 января 1975 г. он активно принимал участие в наблюдениях и оформлении 229 снимков. Из них по программе «Большая хорда»:

- спутник Геос-А – 2 снимка;
- спутник Геос-В – 12 снимков;
- спутник ПАГЕОС – 170 снимков (на 24 получено подтверждение синхронности).

По программе «Атмосфера»:

- спутник Эксплорер-19 – 42 снимка;
- спутник Полет-1 – 3 снимка.

К. М. Антонович на станции оптических наблюдений Астросовета АН СССР в Республике Мали

В 1981 г. был на стажировке на базе Астрономического Совета АН СССР в Симеизе (Крым), где занимался лазерной локацией спутников на дальномере «Интеркосмос».

В 1990-е гг. с появлением ГНСС-технологий Константин Михайлович активно занялся их изучением и внедрением в учебный процесс и в практику научно-исследовательских работ. Регулярно выезжал на полевые работы со спутниковой аппаратурой для обучения специалистов. Получил свидетельство поверителя спутниковой аппаратуры для ее метрологических проверок. Всего за период с 1997 по 2017 г. им было поверено более 4 000 ГНСС-приемников. Константин Михайлович был одним из создателей уникального геодезического построения на территории Новосибирской области – Полигона геодезического эталонного СГУГиТ, который по своим техническим характеристикам соответствует эталону 2-го разряда.

Учебно-методические пособия, подготовленные К. М. Антоновичем

К. М. Антонович принимал активное участие в реконструкции Новосибирской городской геодезической сети, в разработке проекта сети спутниковых дифференциальных станций ГЛОНАСС Новосибирской области и во многих других хозяйственных и научно-исследовательских работах.

Константин Михайлович успешно занимался научно-исследовательской и научно-методической работой, подготовил двух кандидатов технических наук. Издал около десятка учебно-методических пособий, опубликовал более 150 научных работ. Основное направление научных исследований – геодезическая астрономия (фотографический метод) и космическая геодезия, в частности ГНСС-технологии. Сделал множество переводов (включая несколько книг) по спутниковым технологиям с английского языка. В 2005–2006 гг. была издана его монография «Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии» (в двух томах), на основе которой в 2007 г. Константин Михайлович защитил докторскую диссертацию в Сибирской государственной геодезической академии, научным консультантом выступил А. И. Каленицкий. Был активным членом специализированного Совета по защите кандидатских и докторских диссертаций СГУГиТ.

Активно занимался лекторской работой. Через общество «Знание» и планетарий прочитал для жителей Новосибирска более 2 000 лекций по астрономии и космонавтике.

За успехи в учебной, производственной и научной работе К. М. Антонович был награжден почетными грамотами администрации Ленинского района (1998), мэрии города Новосибирска (2012); ему присвоено звание «Заслуженный работник геодезии и картографии Российской Федерации» (2010). Он был награжден медалью «За доблестный труд в ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина», памятной медалью «Полет Ю. А. Гагарина», а также знаками «Отличник геодезии и картографии» и «Почетный геоде-

зист» (2009). Константин Михайлович – лауреат Государственной премии Новосибирской области за 2012 г.

В повседневной жизни Константина Михайловича отличали широкий кругозор, постоянная тяга к изучению новых областей, любознательность, будь то растениеводство, иностранные языки (английский, французский), спутниковые технологии и многое другое. Талант Константина Михайловича проявился не только в научной и педагогической деятельности. Он был прекрасным музыкантом. Коллеги помнят его скромным, деликатным, трудолюбивым человеком с открытой душой, готовым всегда прийти на помощь.

Светлая память о Константине Михайловиче Антоновиче навсегда сохранится в сердцах знавших его учеников, друзей и коллег. Выражаем самые искренние и глубокие соболезнования родным и близким Константина Михайловича.