ПОДЗЕМНАЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ: ПРЕОДОЛЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ В ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ УЧАСТКА «ЕНИСЕЙСКИЙ»

С. Б. Кишкина^{2,3}, В. Н. Татаринов¹, Е. Г. Бугаев³, В. С. Гупало⁴, С. М. Забродин⁵

¹Геофизический центр РАН, Москва

²ФГБУН Институт динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН, Москва

³ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва

⁴Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

⁵ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами», Москва

Статья поступила в редакцию 05 июня 2021 г.

В статье приведены базовые принципы и алгоритм построения системы сейсмологического мониторинга участка «Енисейский», выбранного для подземной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов в глубоких геологических формациях. Приведено описание системы сейсмологического мониторинга, созданного «НО РАО» в 2018 г. Кратко рассмотрены сеймотектонические условия района. Описан выбор участков и схемы оборудования мест установки станций сейсмологического мониторинга, приведено описание их аппаратных характеристик. Показано, что на данном этапе исследований обеспечена более высокая чувствительность в районе, чем чувствительность имеющихся региональных сейсмологических наблюдений. Доказана работоспособность выстроенной системы мониторинга и получена оценка ее чувствительности как на расчетной модели, так и в реальных условиях установки. Созданная система мониторинга отвечает нормативным требованиям. Для снижения неопределенностей в оценке сейсмической опасности территории, в соответствии с существующими требованиями рекомендованы действия по дальнейшему развитию сети локального сейсмологического мониторинга для выявления и оценки потенциала опасных геодинамических зон и зон ВОЗ.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, сейсмологический мониторинг, долговременная оценка безопасности, захоронение высокоактивных РАО, нормативные требования, сейсмическая станция.

Введение

В Красноярском крае в скальных породах участка «Енисейский» реализуется уникальный научный проект по созданию подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ). Работы ведутся в соответствии с постановлением Правительства РФ от 19.11.2012 № 1185, согласно которому на третьем этапе создания единой государственной системы обращения с радиоактивными

отходами (РАО) предусмотрен ввод в эксплуатацию объектов подземной исследовательской лаборатории. Основная цель создания ПИЛ — изучение характеристик и свойств геологических пород на глубинах порядка 525 метров и подтверждение, на основании проведенных исследований, возможности окончательной изоляции радиоактивных отходов 1 и 2 классов (высоко- и

среднеактивных долгоживущих РАО). По результатам исследований будет представлено обоснование перехода к промышленной эксплуатации объекта захоронения РАО (<http://www.norao.ru/about/underground/>). Одна из главных задач исследований в ПИЛ заключается в получении весомых аргументов, демонстрирующих длительную геодинамическую стабильность и устойчивость вмещающей геологической среды [1].

Безопасность захоронения радиоактивных отходов 1-го и 2-го классов в геологических формациях — это многодисциплинарная задача, решаемая последовательным выполнением ряда процедур, нацеленных на изучение, анализ и прогноз событий и процессов, определяющих сохранность изоляционных свойств геологической среды [1]. Их перечень изложен в отечественных и международных нормативных документах [2–6].

Несомненно, сейсмические и геодинамические процессы стоят в ряду процессов высокой степени опасности для контролируемого объекта, так что оценка их возможного проявления — это одна из важнейших проблем обеспечения геологической безопасности захоронения РАО.

Исследования в районе Нижнеканского массива с целью выбора перспективной площадки для создания объекта окончательной подземной изоляции РАО велись с начала 1990-х годов. В 2005 году на основе полученных результатов

была выделена площадка на участке «Енисейский» в 4 км от ГХК и 4,5 км от Енисея (рис. 1). В 2015 г. была разработана проектная документация о пригодности участка «Енисейский» для строительства ПГЗРО. В то же время анализ материалов показал, что имеется ряд неопределенностей в части оценки сеймотектонических условий участка и достаточности данных для оценки сейсмической опасности.

В документах [3–6] регламентировано, как и какими методами можно создать базу доказательств сейсмической безопасности участка. Одна из важнейших задач при этом — выявление активных разломов и геодинамических зон, которые могут быть, во-первых, потенциальными зонами возникновения очагов землетрясений (зоны ВОЗ), а во-вторых, могут послужить триггерами опасных деформаций и даже разрушения приконтурной части подземных выработок ПГЗРО.

Существенная роль в процессе выделения и подтверждения мест расположения и степени активности зон ВОЗ отводится сейсмологическим наблюдениям [3, 7, 8]. При этом сейсмологический мониторинг входит в нормативный перечень систем контроля параметров, явлений и факторов природного и техногенного происхождения, которые должны выполнять свои функции на всех этапах жизненного цикла объекта [3].

Рис. 1. Расположение участка «Енисейский» (черный квадрат) на карте ОСП-97-D. На выноске представлена схема расположения площадки ПИЛ (по <https://www.atomic-energy.ru/technology/91056>)

Основные цели сейсмологического мониторинга — подтверждение безопасного размещения объекта использования атомной энергии (ОИАЭ) в пределах целикового тектонического блока, ненарушенного активными разломами и геодинамическими зонами (потенциальными зонами ВОЗ), контроль стабильности параметров сейсмического режима и получение исходных данных для контроля стабильности параметров проектного землетрясения (ПЗ) и максимального расчетного землетрясения (МРЗ) [8]. Основные задачи, которые должны в перспективе обеспечить достижение поставленных целей, — это повышение чувствительности наблюдений по сравнению с чувствительностью, которая обеспечивается для района размещения ОИАЭ имеющимися региональными системами сейсмологических наблюдений или сетью ГС РАН, а также получение сейсмологических данных, позволяющих контролировать активность основных зон вероятных очагов землетрясений, параметры графиков повторяемости сейсмического режима района и площадки ПИЛ (контроль параметров ПЗ и МРЗ, принятых в проекте ПГЗРО) [8].

Базовые принципы и алгоритм построения системы сейсмологического мониторинга отражены в руководстве по безопасности при использовании атомной энергии «Сейсмологический мониторинг участков размещения ядерно и радиационно опасных объектов» [8]. В сжатом виде алгоритм можно представить как последовательность следующих шагов: построение структурной (сеймотектонической) модели района, выбор методики и инструментальных средств ведения сейсмологического мониторинга, которые смогут обеспечить необходимую для выполнения поставленной задачи чувствительность и разрешающую способность системы мониторинга; выбор мест установки сейсмических станций; организация пунктов регистрации; обработка и анализ полученных данных. Некоторые физические основы требований к выбору методики регистрации и средств измерений описаны в [9].

Рассмотрим кратко основную часть представленного алгоритма на примере системы мониторинга, организованного ФГУП «НО РАО» и функционирующего в настоящее время в районе строительства ПИЛ, как это предусмотрено нормативными положениями [2, 3].

О сеймотектонических условиях района

Район расположения участка «Енисейский» (рис. 1) принадлежит к внутриконтинентальному Алтай–Саян–Байкальскому сейсмическому

региону Северной Евразии (регион 3.1 по карте ОСР-97).

Сам участок «Енисейский» расположен в пределах Атамановского хребта южной части Енисейского кряжа в зоне контакта Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы, т. е. приурочен к зоне сочленения региональных тектонических структур, отдельные элементы которой несут признаки активизации на четвертичном этапе геологического развития [10, 11]. В этом регионе, на расстояниях ~600–1000 км от участка «Енисейский», известны сильные и очень сильные землетрясения: с магнитудой более 7,0 (Восточный Саян, 1800, 1829, 1839, 1950), Хангайские $M=8,4$, $M=8,7$ и Могойтское $M=7,8$ землетрясения (Монголия, 1905 и 1967), Монголо-Алтайское $M=8,0$ (1931), Гоби-Алтайское $M=8,2$ (1957) [12].

Карты общего сейсмического районирования ОСР-97 относят рассматриваемую территорию к 6-балльной зоне для проектного землетрясения (ПЗ) с расчетным периодом повторяемости таких сотрясений 1 раз в 1000 лет и к 7-балльной зоне — для максимального расчетного землетрясения (МРЗ) с расчетным периодом повторяемости таких сотрясений 1 раз в 10000 лет (рис. 1). Для подземных сооружений, расположенных на глубинах более 400 м, — соответственно 4 и 5 баллов. В качестве нормативных значений величины проектного и максимального расчетного землетрясений для средних грунтовых условий приняты соответственно 7 и 8 баллов [10].

Согласно мнению геологов, на сегодняшний день практически невозможно однозначно интерпретировать наличие или отсутствие активных разломов в пределах площадки ПИЛ и в районе ее расположения. При этом данные спутниковой геодезии, повторного высокоточного нивелирования и результаты геоморфологического анализа свидетельствуют о наличии в исследуемом районе активных тектонических нарушений [13, 14].

Геологические карты и схемы активных тектонических нарушений (на данный момент имеется более 10 вариантов) отличаются у разных авторов, что крайне затрудняет оценку сейсмического потенциала $M_{\max}$ района (радиусом 300 км) и ближнего района (радиусом 30 км) ПИЛ. Для примера на рис. 2 приведены две тектонические схемы [15, 16] района расположения площадки ПИЛ. Авторы [15] выделяют 72 межблоковых структуры 13–14 порядка и 45 структур 15 порядка по эмпирическому ряду Пиотровского-Кайе. Примеры тектонических схем ближнего района расположения площадки ПИЛ приведены на рис. 3 [10, 16].

Рис. 2. Тектоническая схема района размещения площадки ПИЛ по [19] (слева) и [20] (справа)

Рис. 3. Тектоническая схема ближнего района размещения ПГЗРО по [14] (сверху) и [20] (снизу)

По обобщенным геологическим данным [17], для основных разломных зон в ближнем районе ПИЛ скорость вертикальных смещений составляет 0,01–0,04 мм/год; градиент вертикальных смещений не превышает $3 \cdot 10^{-8}$ в год.

Установленный общий уровень сейсмичности района участка «Енисейский» не выходит за пределы, принятые действующими нормативными документами [1, 10]. Однако из-за неопределенностей в прогнозе сейсмичности на периоды более 10 тыс. лет нельзя исключить вероятность очень сильных землетрясений в долгосрочном плане с возникновением новых тектонических смещений [13]. Тем более что факты сильных и даже катастрофических землетрясений в платформенных областях, считавшихся до этого сейсмически спокойными, известны [18].

Понизить степень неопределенности в оценке максимальной возможной интенсивности землетрясения, способного вызывать прямые смещения блоков горного массива, а также в оценке стабильности горных пород района и участка захоронения в той степени, в которой она может зависеть от воздействия на объем пород местных землетрясений, накопленных остаточных деформаций или роста трещиноватости (тем более что эти эффекты могут накапливаться в течение всего срока службы хранилища), может локальный сейсмологический мониторинг.

Договоримся в дальнейшем называть «сейсмическими событиями» все регистрируемые системой сейсмологического мониторинга землетрясения, а также карьерные взрывы или другие источники, природу которых по имеющейся сейсмической записи не удалось однозначно

определить, однако удалось определить координаты. Важно, что для корректной работы системы мониторинга должны регистрироваться и анализироваться сейсмические сигналы от любых источников, возникающих в пределах контролируемого района [8].

Краткое описание системы регистрации

Сейсмические станции в Алтае-Саянском районе и в Новосибирске (<http://www.gsr.ru/new/struct/>) начали устанавливать в середине прошлого века (1962—1965 гг.). Сейчас эти станции входят в сеть ASGSR (Алтае-Саянский филиал Единой геофизической службы РАН; АСФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск), которая существенно расширилась после 2000 года. С 1999 г. вокруг Красноярска начала организовываться региональная сейсмическая сеть KRAR (ГПКС КНИИГиМС, г. Красноярск), которая с 2015 года насчитывает 9 станций. Региональные сейсмологические наблюдения в первую очередь нацелены на оперативный контроль сейсмической обстановки, а также оценку и уточнение сейсмической опасности в республике Тыва и в Алтае-Саянском районе (Западный Саян).

На время сбора материалов обоснования лицензии минимальным представительным уровнем магнитуд для разных сейсмических сетей в исследуемом районе считался уровень от $M = 2,0 \pm 0,2$ до $M = 3,5 \pm 0,2$ [10]. Согласно данным КНИИГиМС, их сеть¹ имеет чувствительность $K_p \sim 7$ ($M \sim 1,7$) на территории в пределах 51,5—56,5 88,5—97,0 (красный контур на рис. 4). Так что хотя сама площадка и попадает в этот район, как минимум половина территории радиусом ~ 300 км (синий контур на рис. 4), мониторинг которой рекомендован нормативными документами [8], сейсмическими наблюдениями такой чувствительности не охватываются.

В 2018 году в районе участка «Енисейский» была организована и в конце года начала функционировать система сейсмологического мониторинга ФГУП «НО РАО». Система представляет собой сеть сейсмических станций, места установки которых и рассчитанные зоны чувствительности показаны на рис. 5. Видно, что по результатам численного моделирования чувствительность системы мониторинга должна обеспечивать регистрацию землетрясений с магнитудой вплоть до -1 на расстояниях 5—10 км от

Рис. 4. Сеть региональных станций KRAR в районе участка «Енисейский». Синий контур определяет область радиусом ~ 300 км от площадки ПИЛ, схематически отмеченной розовым квадратом

ПИЛ, а на расстояниях 20—25 км — регистрацию землетрясений с магнитудой 0; на расстояниях около 60 км должны будут регистрироваться события с $M \sim 1$. Согласно полученным оценкам, система мониторинга «НО РАО» расширяет имеющиеся возможности сейсмологических наблюдений и удовлетворяет требованиям нормативных документов [8].

При выборе участков установки станций сейсмологического мониторинга учитывался целый комплекс параметров. В первую очередь необходимо было найти баланс между возможностью обеспечивать круглогодичную транспортную доступность станций, чтобы иметь возможность их обслуживать, и требованием устанавливать станции как можно дальше от возможных источников техногенных сейсмических помех,

Рис. 5. Места расположения станций сейсмологического мониторинга «НО РАО» и расчетная чувствительность сети в пределах ближней зоны площадки ПИЛ

¹ В 2016 году все сейсмические станции ГПКС «КНИИГиМС» были переданы в Краевое государственное бюджетное учреждение «Центр реализации мероприятий по природопользованию и охране окружающей среды» (КГБУ «ЦРМПНООС»); с 2018 КНИИГиМС прекратил обработку данных.

таких как железная дорога или автомобильная трасса с оживленным движением. В предполагаемых местах установки станций путем бурения неглубоких (~ 10 м) скважин оценивались свойства грунтов и проводились сеансы краткосрочных записей микросейсмических колебаний. Выбор участков с максимально низким уровнем сейсмических шумов и установка сейсмических датчиков на участках с неглубоким залеганием скального основания должны способствовать повышению качества сейсмических записей.

Для установки сейсмических станций были сооружены специальные павильоны (рис. 6) из заглубленных железобетонных колец. Такие павильоны обеспечивают защиту сейсмических станций от внешних воздействий (от затопления дождевыми или грунтовыми водами, от ветровых нагрузок), существенно повышают защищенность от вандалов. Сейсмометры установлены на бетонные постаменты, обеспечивающие максимальное сцепление основания датчика с грунтом.

В настоящее время система мониторинга формируется из сейсмических станций ZET 048-C VER.3, регистрирующих скорость колебаний грунта в диапазоне рабочих частот 0,03–50 Гц. На всех пунктах установлена частота опроса каналов 100 Гц, что позволяет надежно работать в полосе 1–30 Гц. Объем встроенной памяти соответствует работе станций в течение месяца, обеспеченного автономными источниками питания. Такая периодичность обслуживания станций соблюдает хороший баланс между необходимым контролем работоспособности сейсмических станций, проведением планового технического осмотра и минимизацией

вмешательства в работу станций, которое создает помехи для регистрации.

Начало функционирования системы продемонстрировало, что по общим характеристикам все станции системы сейсмологического мониторинга, благодаря грамотному выбору мест установки и организации надежных павильонов, характеризуются достаточно низким средним уровнем микросейсмического шума на уровне ~0,1 мкм/с (см. табл.1).

Таблица 1. Осредненный уровень фона помех на станциях системы сейсмологического мониторинга в частотном диапазоне 0,1–40 Гц

Средний уровень микросейсмического фона, мкм/с							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,05–0,10	0,07–0,12	0,08–0,11	0,09–0,15	0,10–0,30	0,05–0,10	0,09–0,12	0,10–0,20

Первые результаты сейсмологического мониторинга

Будем использовать терминологию [8], согласно которой все события с эпицентрами в радиусе более 300 км от площадки атомного объекта называются «удаленные». За 2019 год таких было зарегистрировано 1470. В том числе сейсмические станции «НО РАО» регистрировали Алтае-Саянские землетрясения, события на Байкале, в Туве и Монголии. Вызванные ими сейсмические воздействия на площадке ПИЛ не были сколь-нибудь значительными (не превышали $I=1$). Оценка возможной интенсивности сотрясений на площадке проводилась по формуле: $I=1,5M-3,5\lg R+3,0$, где M — магнитуда, R — расстояние от условного центра площадки до источника, км.

Местными и локальными землетрясениями будем называть [8] события, очаги которых расположены в радиусе от 30 до 300 км или, соответственно, в радиусе менее 30 км от площадки ПИЛ. Анализ данных локальной системы сейсмологического мониторинга был ориентирован в первую очередь на поиск именно таких событий. Обнаружение и обработка сейсмических сигналов проводилась совместно автоматизированными алгоритмами и оператором. Задача локализации событий по данным системы мониторинга решалась путем классического метода засечек: он дает наилучшие результаты для небольших эпицентральных расстояний. Параллельно оценивались характеристики микросейсмических колебаний грунта на протяженных отрезках времени.

Рис. 6. Схема оборудования сейсмического пункта:
1 — внешняя крышка павильона, 2 — антенна спутниковой связи, 3 — сейсмическая станция, 4 — аккумуляторы

За 2019 год было обнаружено и идентифицировано 409 сигналов от местных и локальных сейсмических событий, и большинство из них — это сигналы, вызванные горными работами, в первую очередь — карьерными взрывами.

В результате анализа только 26 событий из 409 не были отнесены к сигналам, вызванным взрывными работами. Из них источники 20 событий оказываются в непосредственной близости от карьеров горных предприятий; однако все они зарегистрированы в период с 20 до 07 часов местного времени, когда проведение взрывных работ запрещено. Можно предположить техногенную природу этих землетрясений: хорошо известно, что одним из проявлений антропогенного воздействия на земную кору является «техногенная» (или индуцированная) сейсмичность — землетрясения, так или иначе связанные с инженерной деятельностью. Возникновение многочисленных слабых землетрясений в результате инженерной деятельности является ordinарным событием на многих площадках горных предприятий; такие слабые сейсмические события приурочены, как правило, непосредственно к фронту горных работ. Однако в горном деле техногенные землетрясения чаще всего ассоциируются с подземными горными работами, проводящимися на больших глубинах в массивах со значительной тектонической составляющей поля напряжений. Заметные землетрясения, ассоциированные с выемкой породы в карьерах, относятся к категории довольно редких проявлений техногенной сейсмичности. Подтверждение или опровержение подобной гипотезы требует дальнейшего анализа как промышленной обстановки в районе работ, так и более детального анализа сейсмических сигналов. Исходя из требований нормативных документов, предписывающих консервативный подход к анализу местной сейсмичности, все эти события отнесены к местным природным землетрясениям.

Оставшиеся 6 событий произошли в южной части района размещения площадки и приурочены к району естественной сейсмичности (Тыва).

Временная последовательность регистрации местных сейсмических сигналов за один год приведена на рис. 7. Видно, что масса регистрируемых событий равномерно распределена во времени; это свидетельствует о непрерывной работе системы наблюдений без заметной потери чувствительности.

Чтобы более детально проанализировать работоспособность выстроенной системы мониторинга и оценить ее чувствительность в

Рис. 7. Временная последовательность местных сигналов, зарегистрированных системой сейсмологического мониторинга

Рис. 8. Зависимость величины зарегистрированных местных событий от расстояния до их источника.

Красная линия отмечает уровень минимальной магнитуды регистрируемых сейсмических событий за год работы сети; синяя — зарегистрированную магнитуду единичных событий

реальных условиях, построим зависимость магнитуд выделенных сейсмических событий от расстояния их источников до площадки размещения ПИЛ (рис. 8), как это рекомендовано нормативными документами [8]. Красная линия на рис. 8 отмечает минимальный уровень надежно регистрируемых сейсмических событий за год работы сети; синяя отмечает уровень чувствительности для единичных сейсмических событий. Отметим, что в приведенной оценке участвуют все сейсмические события, идентифицированные при обработке данных за один год работы локальной сейсмической сети. Это и местные/локальные землетрясения, и сейсмические события, вызванные взрывами на карьерах горнодобывающих предприятий, и события, природа которых однозначно не определена, но местоположение источника установлено.

Реальную величину минимального регистрируемого сейсмического события при существующей конфигурации и аппаратурных характеристиках можно оценить как $M=1,5$ на расстояниях до 100 км, $M=1,8$ на расстояниях до 200 км и $M=2,3$ на расстояниях 300 км, что соответствует

Рис. 9. Схема пространственного распределения местных источников сейсмических сигналов в районе площадки ПИЛ. В представленном масштабе места установки станций «НО РАО» практически соответствуют расположению площадки ПИЛ (красный квадрат). Зеленые треугольники — источники сигналов, отнесенных к категории «карьерный взрыв»; бирюзовые значки — источники местных событий (треугольники — события, ассоциированные с местами работ горных предприятий; кружки — местные природные землетрясения); маленькие голубые кружки — данные каталога Алтае-Саянского филиала ГС РАН (2003–2019); черным закрашены источники сигналов, зарегистрированных в дневное время (взрывы?); розовые кружки — источники событий, вошедшие в каталог ГС РАН (1992–2019)

ранее полученным результатам численного моделирования. В ближней зоне (до 30 км от площадки ПИЛ) за первый год работы системы мониторинга не было зарегистрировано ни одного сейсмического события: источник ближайшего с $M \sim 1$ (взрыв на карьере) был идентифицирован на расстоянии 50 км от площадки. Это может быть связано с отсутствием событий с магнитудами $M \sim 0,5–1$ в ближнем районе. Однако может быть и следствием недостаточной чувствительности системы мониторинга, поскольку слабые сейсмические события разного генезиса при достаточной чувствительности аппаратуры регистрируются практически везде.

Схема пространственного распределения местных источников сейсмических сигналов в радиусе 300 км от площадки ПИЛ, зарегистрированных системой сейсмологического мониторинга «НО РАО» и региональными станциями с 15 ноября 2018 года по 31 декабря 2019 года, приведена на рис. 9. Видно, что локальная система мониторинга и региональные станции не дублируют, но дополняют друг друга.

Перспективы

Сейсмологические наблюдения являются прямым методом подтверждения современной активности выявленных разломов. Так что система сейсмологического мониторинга должна быть ориентирована не только на общее исследование контролируемой территории, но главным образом на области наиболее вероятных зон возникновения сейсмических событий: на зоны разломов. Актуальность этой задачи неоднократно подчеркивалась на различных обсуждениях данного вопроса с участием представителей Росатома и НТЦ ЯРБ. Такой подход предусмотрен рекомендациями нормативных документов: «Рекомендуется, чтобы система наблюдений была максимально чувствительна в области динамического влияния (в радиусе около 4 км) основной геодинамически активной структуры, представляющей потенциальную сейсмическую опасность для площадки ОИАЭ» [8], поскольку приуроченность неглубоких тектонических землетрясений к уже известным зонам разломов на сегодняшний день общепризнана [20].

Мы продемонстрировали, что результаты наблюдений системы сейсмологического мониторинга, организованной «НО РАО» в конце 2018 года, подтверждают ее работоспособность. Однако за более чем год работы в ближней зоне площадки размещения ПИЛ (до 30 км) сейсмических событий не было зарегистрировано. Это в какой-то мере свидетельствует о спокойном геодинамическом режиме территории. Хотя период наблюдений явно недостаточен для серьезных выводов и необходимо учитывать, что предположительно на расстоянии нескольких километров к востоку и северо-востоку от площадки ПИЛ имеются тектонические нарушения, активность которых подтверждается инструментальными геодезическими наблюдениями [18]. Будет полезным дальнейшее повышение чувствительности созданной системы сейсмологического мониторинга, в первую очередь в указанной области.

Существенно повысить точность локации сейсмических источников и улучшить общую чувствительность сейсмологического мониторинга района расположения площадки можно не только путем создания более плотной сети, но и путем совместного анализа всех данных, регистрируемых в районе площадки «Енисейский»: сейсмологической сетью «НО РАО», малоапретурной группой, организованной в районе размещения ПИЛ Горно-химическим комбинатом [21], региональными станциями. Такой подход предусмотрен и нормативными документами [3, 8].

Несомненно, после обеспечения регистрации слабых сейсмических событий необходимо добиваться максимальной точности их локации, поскольку это будет способствовать повышению надежности оценки расположения разломных зон. Возможно, чтобы получить более равномерный азимутальный охват системы мониторинга, стоит предусмотреть дополнительную установку нескольких станций в восточном и северо-восточном направлении от площадки ПИЛ. К тому же такая конфигурация позволит увеличить плотность сети в области предполагаемых активных тектонических нарушений.

Заключение

Долговременная оценка безопасности ПЗРО зависит от множества факторов, среди которых свое место занимает и степень сейсмической опасности района размещения контролируемого объекта. Для того чтобы определение параметров сейсмического процесса было максимально достоверным, необходимо обеспечивать непрерывное проведение сейсмологического мониторинга [3] с постоянной оценкой реальной чувствительности выбранной системы наблюдений [8].

Организация и развитие системы сейсмологического мониторинга должны учитывать представления и достижения современной науки, которые объективно опережают процесс нормативного регулирования. Основная тенденция последних десятилетий — существенное повышение чувствительности систем сейсмологического мониторинга. В год современные системы мониторинга регистрируют от сотни до нескольких тысяч событий, что отвечает требованию получения статистически представительных выборок данных. Регистрация слабой сейсмичности осуществляется плотными сетями или группами сейсмических станций, в том числе заглубленными на 100 м и более. При этом в мировой сейсмологической практике высокая плотность расположения сейсмических станций и современные методы обработки позволяют с небольшой погрешностью определять координаты даже слабых землетрясений. Максимально точные координаты сейсмических источников дают возможность с высокой точностью установить границы области, в которой происходят активные деформационные процессы, сопровождающиеся мелкой сейсмичностью [22, 23 и ссылки там].

Наиболее развиты эти подходы в сейсмически активных районах (Япония, США, Тайвань и др.), для которых изучение природы сейсмичности и

сейсмической активности жизненно важны. Известны данные сейсмических сетей Японии, равномерно покрывающих сетью Hi-net высокоточных скважинных наблюдений из 1250 сейсмических станций с расстояниями около 20 км между ними всю территорию страны; сеть регистрирует события с магнитудами вплоть до нуля [24]. Установка плотных сейсмических групп в Калифорнии (на участке разломной зоны 600×600 м располагали группы из более 1000 измерительных точек) продемонстрировала возможность методики группирования в пять раз увеличить число регистрируемых слабых землетрясений, даже в условиях развитых сейсмических наблюдений в этом сейсмически-активном районе [25]. Система регистрировала сейсмические события с магнитудами вплоть до $-1,5$.

Данные о подобных системах наблюдений позволяют выявлять активные сейсмические структуры гораздо детальнее, чем традиционные сети станций. Так что при условии дальнейшего развития система сейсмологического мониторинга района размещения площадки ПИЛ способна быть не просто инструментом формального подтверждения установленного уровня сейсмичности в рассматриваемом районе. Целью развития системы должно быть получение максимально достоверных данных для понижения неопределенности нашего знания о состоянии вмещающего массива в двух направлениях: снижение неопределенности в оценке возможности возникновения в районе размещения ПИЛ сильного землетрясения, достигающего и превышающего $M_{\max}$, и неопределенности в оценке (эволюции) трещиноватости массива [4, 13].

При этом максимально насыщенные и достоверные каталоги сейсмических событий необходимы как для методов вероятностных прогнозных оценок, основанных на статистических и математических моделях сейсмичности, так и для развивающихся методов физических моделей очага землетрясения и процесса разломообразования [20]. И пока развитие фундаментальной науки позволит продвинуться в этих направлениях, должен формироваться качественный набор сейсмических параметров, полученных за длительный период наблюдений.

Настоящая работа выполнена в рамках реализации мероприятий «Комплексной программы исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров», утвержденный Директором по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО Госкорпорации «Росатом» 09.01.2019 г.

Литература

1. Абалкина И. Л., Большов Л. А., Капырин И. В., Линге И. И., Савельева Е. А., Свительман В. С., Уткин С. С. Обоснование долговременной безопасности захоронения ОЯТ и РАО на 10 000 и более лет: методология и современное состояние. Препринт ИБРАЭ № 2019-03. — М.: ИБРАЭ РАН, 2019. 40 с.
2. НП-100-17. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов.
3. НП-064-17. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии.
4. НП-055-14. Федеральные нормы и правила. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности.
5. Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности № SSR-5. Серия изданий МАГАТЭ по нормам безопасности / МАГАТЭ, Вена. 2011.
6. РБ-003-21. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов.
7. РБ-019-18. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Оценка исходной сейсмичности района и площадки размещения объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и исследованиях.
8. РБ-142-18. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Сейсмологический мониторинг участков размещения ядерно и радиационно опасных объектов.
9. Кишкина С. Б., Бугаев Е. Г., Лободенко И. Ю. Разработка и реализация системы сейсмологического мониторинга на основе руководства по безопасности при использовании атомной энергии «Сейсмологический мониторинг участков размещения ядерно и радиационно опасных объектов» (РБ-142-18) // Ядерная и радиационная безопасность. 2021. № 1 (99). С. 28—42. DOI: 10.26277/SECNRS.2021.99.1.003.
10. Материалы обоснования лицензии на эксплуатацию действующего пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов — полигона «Северный» филиала «Железногорский» ФГУП «НО РАО» (г. Железногорск, Красноярский край), включая материалы оценки воздействия на окружающую среду. — М., 2018. Т. 1. URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/>.
11. Морозов О. А., Расторгуев А. В., Неуважаев Г. Д. Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. 2019. № 4(9). С. 46—62. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62.
12. Уломов В. И., Шумилина Л. С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации — ОСР-97. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ, 1999, 57 стр. Карта на 4 листах (Главные редакторы В. Н. Страхов и В. И. Уломов). 2000. — М.: ОИФЗ—РОСКАРТОГРАФИЯ.
13. Кочкин Б. Т., Богатов С. А., Баринев А. С., Савельева Е. А., Уткин С. С. Эволюция геосферы на территории размещения ПГЗРО в Нижнеканском массиве // Радиоактивные отходы. 2020. № 1(10). С. 56—65. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-56-65.
14. Гвишиани А. Д., Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И., Дзедобоев Б. А., Лосев И. В. Скорости современных горизонтальных движений земной коры в южной части Енисейского кряжа по результатам ГНСС-измерений // Доклады Академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 493. № 1. С. 73—77. DOI: 10.31857/S2686739720070075.
15. Севостьянов В. В., Миндель И. Г. Проведение комплексных инженерно-сейсмологических работ на площадке здания № 1 завода РТ-2 ГХК. — М.: ИГЭ РАН, 2006.
16. Сеелев И. Н., Леконцев А. В., Хафизов Р. Р., Перетоккин С. А., Панасенко Н. Н., Синельщиков А. В., Яковлев П. В. Сейсмомикрорайонирование строительной площадки города Железногорска // Геология, география и глобальная энергия. 2018. № 3 (70). С. 224—264.
17. Андерсон Е. Б., Белов С. В., Камнев Е. Н., Колесников И. Ю., Лобанов Н. Ф., Морозов В. Н., Татаринов В. Н. Подземная изоляция радиоактивных отходов / Под ред. В. Н. Морозова. — М.: Издательство «Горная книга», 2011. 592 с.
18. Ананьин И. В. Оценка ущерба от сильных землетрясений в Европейской части России // Вопросы инженерной сейсмологии. 2008. Т. 35. № 3. С. 39—57.
19. Землетрясения России в 2016 году. — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018.
20. Кочарян Г. Г. Возникновение и развитие процессов скольжения в зонах континентальных разломов под действием природных и техногенных факторов. Обзор современного состояния вопроса // Физика Земли. 2021. № 4. С. 1—39.
21. Бугаев Е. Г., Кишкина С. Б., Сеелев И. Н. Формализация оценки фоновых параметров сейсмического режима площадок глубинного захоронения радиоактивных отходов по сейсмологическим и геологическим данным // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т. 42. № 4. С. 15—24.

22. Waldhauser F., Schaff D. P. Large-scale relocation of two decades of Northern California seismicity using cross-correlation and double-difference methods // Journal of Geophysical Research. 2008. Vol. 113. B08311. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007JB005479>.
23. Кишкина С. Б., Кочарян Г. Г., Санина И. А., Остапчук А. А., Шаумян А. В. Использование локальных сейсмических сетей для определения сейсмогенной структуры разломов // Физика Земли. 2012. № 3. С. 22–33.
24. Aoi S., Asano Y., Kunugi T., Kimura T., Uehira K., Takahashi N., Ueda H., Shiomi K., Matsumoto T., and Fujiwara H. MOWLAS: NIED observation network for earthquake, tsunami and volcano // Earth, Planets and Space. 2020. Vol. 72. P. 126. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01250-x>.
25. Meng H., Ben-Zion Y. Detection of small earthquakes with dense array data: example from the San Jacinto fault zone, southern California // Geophys. J. Int. 2018. Vol. 212. Pp. 442–457. DOI: 10.1093/gji/ggx404.

Информация об авторах

Кишкина Светлана Борисовна, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН Институт динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН (119334, Москва, Ленинский пр., д. 38, корп. 1), e-mail: kishkinas@idg.chph.ras.ru.

Татаринов Виктор Николаевич, доктор технических наук, заведующий лабораторией, Геофизический центр РАН (119296, Москва, ул. Молодежная, д. 3), e-mail: victat@wdcb.ru.

Бугаев Евгений Геннадьевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5), e-mail: bugaev@secnrs.ru.

Гупало Владимир Сергеевич, доктор технических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: gupalo@ibrae.ac.ru.

Забродин Сергей Михайлович, главный специалист, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, Пятницкая ул., д. 49А, стр. 2), e-mail: info@nora.ru.

Библиографическое описание статьи

Кишкина С. Б., Татаринов В. Н., Бугаев Е. Г., Гупало В. С., Забродин С. М. Подземная исследовательская лаборатория: преодоление неопределенностей в оценке сейсмических условий участка «Енисейский» // Радиоактивные отходы. 2021. № 3 (16). С. 80–93. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-80-93.

UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY: OVERCOMING UNCERTAINTIES IN THE ASSESSMENT OF SEISMIC CONDITIONS FOR THE YENISEISKIY SITE

Kishkina S. B.^{2,3}, Tatarinov V. N.¹, Bugaev E. G.³, Gupalo V. S.⁴, Zabrodin S. M.⁵

¹Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Federal Funded Institution Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia

⁴Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁵Federal State Unitary Enterprise “National Operator for Radioactive Waste management”, Moscow, Russia

Article received on June 05, 2021

The article presents the basic principles and an algorithm allowing to arrange a seismological monitoring system for the Yeniseiskiy site selected for deep geological disposal of high-level waste. It describes the seismological

monitoring system developed by NO RAO in 2018 also briefly considering the seismotectonic conditions of the area. The paper describes the process that has been followed to select the corresponding sites and equipment layouts in the areas fitted with seismological monitoring stations with relevant instrumental characteristics being provided. It shows that considering the current stage of research, higher sensitivity was provided in the area as compared to the one associated with available regional seismological observations. It demonstrates the efficiency of the built-up monitoring system with its sensitivity assessment provided both based on the calculated model and under real conditions. The long-term safety assessment performed for such a facility relies upon many factors with the seismic hazard level within the area of the monitored facility also taken into consideration. To provide most reliable evaluation of seismic parameters, continuous seismological monitoring should be performed over a several years' period along with the sensitivity assessment of the selected monitoring system. The seismological monitoring system should focus not only on the general study of the monitored territory, but also on the areas assumed as zones of most probable seismic event occurrence, i.e. areas involving tectonic faults. The relevance of this task has been repeatedly emphasized in the course of multiple discussions on this issue featuring the representatives from SC Rosatom and the Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety. The monitoring system fitted within the repository area meets relevant regulatory requirements. In accordance with the existing requirements, to reduce the uncertainties in the seismic hazard assessment of the territory, the implementation of certain measures was recommended during further development of the local seismological monitoring network to identify and assess the potential of hazardous geodynamic zones.

Keywords: radioactive waste, seismological monitoring, long-term safety assessment, disposal of high-level waste, regulatory requirements, seismic station.

References

1. Abalkina I. L., Bolshov L. A., Kapyrin I. V., Linge I. I., Savelyeva E. A., Svitelman V. S., Utkin S. S. *Obosnovaniye dolgovremennoy bezopasnosti zakhoroneniya OYAT i RAO na 10 000 i boleye let: metodologiya i sovremennoy sostoyaniye* [Long-term SNF and RW disposal safety demonstration for over 10,000 years: methodology and the state-of-art]. IBRAE Preprint No. 2019-03. Moscow, Nuclear Safety Institute Publ., 2019, 40 p.
2. NP-100-17. *Federal'nyye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii "Trebovaniya k sostavu i sodержaniyu otcheta po obosnovaniyu bezopasnosti punktov zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov"* [Federal Norms and Rules in the Field of Atomic Energy Use. Requirements to the Structure and Content of the Safety Analysis Report on Radioactive Waste Disposal Facilities].
3. NP-064-17. *Uchet vneshnikh vozdeystviy prirodnogo i tekhnogennogo proiskhozhdeniya na ob'yekty ispol'zovaniya atomnoy energii* [Accounting for external natural and man-induced influences on nuclear facilities].
4. NP-055-14. *Federal'nyye norma i pravila. Zakhoroneniye radioaktivnykh otkhodov. Printsipy, kriterii i osnovnyye trebovaniya bezopasnosti* [Federal rules and rules. Radioactive waste disposal. Principles, criteria and basic safety requirements].
5. International Atomic Energy Agency. *Disposal of Radioactive Waste. Specific Safety Requirements*. No. SSR-5. IAEA. Vienna. 2011.
6. RB-003-21. *Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoy energii. Otsenka dolgovremennoy bezopasnosti punktov glubinnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov* [Safety Guidelines for Atomic Energy Use. Long-term safety assessment of deep disposal facilities for radioactive waste].
7. RB-019-18. *Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoy energii. Otsenka iskhodnoy seysmichnosti rayona i ploshchadki razmeshcheniya ob'yekta ispol'zovaniya atomnoy energii pri inzhenernykh izyskaniyakh i issledovaniyakh. Rostekhnadzor* [Safety Guidelines for Atomic Energy Use. Assessing the initial seismicity in the area and the site of a nuclear facility during engineering surveys and studies].
8. RB-142-18. *Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoy energii. Seysmologicheskii monitoring uchastkov razmeshcheniya yadernogo i radiatsionno opasnykh ob'yektov* [Safety Guidelines for Atomic Energy Use. Seismological monitoring at the sites of nuclear and radiation hazardous facilities].
9. Kishkina S. B., Bugaev E. G., Lobodenko I. Yu. *Razrabotka i realizatsiya sistemy seysmologicheskogo monitoringa na osnove rukovodstva po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoy energii "Seysmologicheskii monitoring uchastkov razmeshcheniya yadernogo i radiatsionno opasnykh ob'yektov"* [Development and implementation of a seismological monitoring system based on the Safety Guidelines for Atomic Energy Use. Seismological monitoring at the sites of nuclear and radiation hazardous facilities (RB-142-18)]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' — Nuclear and Radiation Safety*, 2021, no. 1 (99), pp. 28—42. DOI: 10.26277 / SECNRS.2021.99.1.003.
10. *Materialy obosnovaniya litsenzii na ekspluatatsiyu deystvuyushchego punkta glubinnogo zakhoroneniya zhidkikh radioaktivnykh otkhodov — poligona*

- "Severnnyy" filiala "Zheleznogorskiy" FGUP "NO RAO" (g. Zheleznogorsk, Krasnoyarskiy kray), vkluchaya materialy otsenki vozhdeystviya na okruzhayushchuyu sredu [Safety Analysis Report Developed under the Operational License Application for an Existing Facility for Deep Liquid Radioactive Waste Disposal – the Severny Deep-well Injection Facility of NO RAO's Zheleznogorsk branch (Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory) Including the Environmental Impact Assessment]. Vol. 1. Moscow, 2018. URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/>.
11. Morozov O. A., Rastorguev A. V., Neuvazhaev G. D. Assessing the State of the Geological Environment at the "Yeniseyskiy" Site (Krasnoyarsk Region). *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2019, no. 4 (9), pp. 46–62. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62.
 12. Ulomov V. I., Shumilina L. S. *Komplekt kart obshchego seysmicheskogo rayonirovaniya territorii Rossiyskoy Federatsii — OSR-97. Masshtab 1:8000000. Ob'yasnitel'naya zapiska i spisok gorodov i naselennykh punktov, raspolozhennykh v seysmoopasnykh rayonakh* [Series of general seismic zoning maps for the territory of the Russian Federation — OSR-97. 1:8,000,000. Explanatory note and a list of cities and towns located in earthquake-prone areas. Moscow: OIFZ, 1999, 57 pages. Map on 4 sheets (Chief editors V. N. Strakhov and V. I. Ulomov). Moscow, OIFZ-ROSKARTOGRAFIYA Publ., 2000.
 13. Kochkin B. T., Bogatov S. A., Barinov A. S., Saveleva E. A., Utkin S. S. Evolution of geosphere at the Nizhněkanskiy site meant for deep geological RW disposal. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 1 (10), pp. 56–65. DOI:10.25283/2587-9707-2020-1-56-65.
 14. Gvishiani A. D., Tatarinov V. N., Kaftan V. I., Manevich A. I., Dzeboev B. A., Losev I. V. Skorosti sovremennykh gorizontaľnykh dvizheniy zemnoy kory v yuzhnoy chasti Yeniseyskogo kryazha po rezul'tatam GNSS-izmereniy [Velocities of modern horizontal movements of the earth's crust in the southern part of the Yeniseyskiy Ridge according to the results of GNSS measurements]. *Doklady Akademii Nauk. Nauki o Zemle — Proceedings of the Academy of Sciences. Earth Sciences*, 2020, vol. 493, no. 1, pp. 73–77. DOI: 10.31857 / S2686739720070075.
 15. Sevostyanov V. V., Mindel I. G. *Provedeniye kompleksnykh inzhenerno-seysmologicheskikh rabot na ploshchadke zdaniya №1 zavoda RT-2 GKHK* [Comprehensive engineering and seismological surveys at the site of building No. 1 of the MCC RT-2 plant]. Moscow, IGE RAS Publ., 2006.
 16. Seelev I. N., Lekontsev A. V., Khafizov R. R., Peretokin S. A., Panasenko N. N., Sinelshchikov A. V., Yakovlev P. V. Seysmomikrorayonirovaniye stroitel'noy ploshchadki goroda Zheleznogorska [Seismic microzoning of the construction site in the vicinity of the Zheleznogorsk city]. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya — Geology, geography and global energy*, 2018, no. 3 (70), pp. 224–264.
 17. Anderson E. B., Belov S. V., Kamnev E. N., Kolesnikov I. Yu., Lobanov N. F., Morozov V. N., Tatarinov V. N. *Podzemnaya izolyatsiya radioaktivnykh otkhodov* [Underground isolation of radioactive waste]. Edited by V. N. Morozov. Moscow, "Gornaya Kniga" Publ., 2011. 592 p.
 18. Ananin I. V. Otsenka ushcherba ot sil'nykh zemletryaseniy v Yevropeyskoy chasti Rossii [Assessment of damage from strong earthquakes in the European part of Russia]. *Voprosy inzhenernoy seysmologii — Issues of Engineering Seismology*, 2008, vol. 35, no. 3, pp. 39–57.
 19. *Zemletryaseniya Rossii v 2016 godu* [2016: Earthquakes in Russia]. Obninsk, FRC EGS RAS Publ., 2018.
 20. Kocharyan G. G. Vozniknoveniye i razvitiye protsessov skol'zheniya v zonakh kontinental'nykh razlomov pod deystviyem prirodnykh i tekhnogen'nykh faktorov. Obzor sovremennogo sostoyaniya voprosa. [The emergence and development of sliding processes in continental fault zones under the influence of natural and man-induced factors. Modern outlook]. *Fizika Zemli — Physics of the Earth*, 2021, no. 4, pp. 1–39.
 21. Bugaev E. G., Kishkina S. B., Seelev I. N. Formalizatsiya otsenki fonovykh parametrov seysmicheskogo rezhima ploshchadok glubinnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov po seysmologicheskimi i geologicheskimi dannymi [Formalizing the assessment of background parameters describing the seismic regime at deep RW disposal sites based on seismological and geological data]. *Voprosy inzhenernoy seysmologii — Issues of Engineering Seismology*, 2015, vol. 42, no. 4, pp. 15–24.
 22. Waldhauser F., Schaff D. P. Large-scale relocation of two decades of Northern California seismicity using cross-correlation and double-difference methods. *J. Geophys. Res.*, 2008, vol. 113, B08311. DOI: 10.1029/2007JB005479.
 23. Kishkina S. B., Kocharyan G. G., Sanina I. A., Ostapchuk A. A., Shaumyan A. V. Ispol'zovaniye lokal'nykh seysmicheskikh setey dlya opredeleniya seysmogennoy struktury razlomov [Using local seismic networks to determine the seismogenic structure of faults]. *Fizika Zemli — Physics of the Earth*, 2012, no. 3, pp. 22–33.
 24. Aoi S., Asano Y., Kunugi T., Kimura T., Uehira K., Takahashi N., Ueda H., Shiomi K., Matsumoto T., and Fujiwara H. MOWLAS: NIED observation network for earthquake, tsunami and volcano. *Earth, Planets and Space*, 2020, 72:126. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01250-x>.

25. Meng H., Ben-Zion Y. Detection of small earthquakes with dense array data: example from the San Jacinto fault zone, southern California. *Geophys. J. Int.*, 2018, vol. 212, pp. 442–457. DOI:10.1093/gji/ggx404.
-

Information about the authors

Kishkina Svetlana Borisovna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences (38, bldg. 1, Leninsky Ave., Moscow, 119334, Russia), e-mail: kishkinas@idg.chph.ras.ru.

Tatarinov Viktor Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (3, Molodezhnaya st., Moscow, 119296, Russia), e-mail: victat@wdcb.ru.

Bugaev Evgeny Gennadievich, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Federal Funded Institution Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety (5, 2/8, Malaya Krasnoselskaya st., Moscow, 107140, Russia), e-mail: bugaev@secnrs.ru.

Gupalo Vladimir Sergeevich, Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsкая st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: gupalo@ibrae.ac.ru.

Zabrodin Sergey Mikhailovich, Chief Specialist, Federal State Unitary Enterprise “National Operator for Radioactive Waste management” (49A, b. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: info@nora.ru.

Bibliographic description

Kishkina S. B., Tatarinov V. N., Bugaev E. G., Gupalo V. S., Zabrodin S. M. Underground Research Laboratory: Overcoming Uncertainties in the Assessment of Seismic Conditions for the Yeniseiskiy Site. *Radioactive Waste*, 2021, no. 3 (16), pp. 80–93. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-80-93. (In Russian).