DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-9-21 УДК: 621.039

ПОДЗЕМНАЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ В НИЖНЕКАНСКОМ МАССИВЕ: ЭВОЛЮЦИОННАЯ ПРОРАБОТКА ОБЛИКА

А. А. Абрамов[1], Л. А. Большов[2], А. Н. Дорофеев[1], И. М. Игин[3], К. С. Казаков[2], В. Я. Красильников[3], И. И. Линге[2], Н. Н. Трохов[4], С. С. Уткин[2]

[1]Госкорпорация «Росатом», Москва

[2]Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

[3]ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами», Москва

[4]Филиал «Железногорский» ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами», г. Железногорск Красноярского края

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2020 г.

Роль подземных исследовательских лабораторий (ПИЛ) в мире общепризнана и сводится к следующему: ПИЛ обеспечивает возможность выполнения исследований и демонстрации реализуемости технологических процессов в реальных геологических условиях и с соблюдением реальных пространственных масштабов. В последние годы было опубликовано достаточно много статей и обзоров [1–5], касающихся проблематики подземных исследовательских лабораторий (далее ПИЛ), создаваемых в обоснование безопасности глубинного захоронения РАО. Напомним, что в мире функционирует 25 ПИЛ различного назначения. Наиболее близкие по целям – специальная (на месте захоронения) и по вмещающей породе (граниты-гнейсы) действующая ПИЛ ONKALO (Финляндия) и планируемая к сооружению (начало строительства в 2020 году) в Китае (провинция Бейшан (Beishan)). Среди публикаций было и несколько статей [6–14] по отдельным исследованиям, планируемым к проведению в российской ПИЛ, создаваемой на участке Енисейский Нижнеканского массива вблизи г. Железногорска. В рамках настоящей статьи впервые целостно и в динамике, начиная от сооружения объекта и заканчивая выходом на этап закрытия ПГЗРО, представлен облик будущей ПИЛ.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, обоснование безопасности, подземная исследовательская лаборатория, программа научного сопровождения горнопроходческих работ, долгосрочные эксперименты, характеризация массива, комплекс исследований in situ.*

Знакомство с мировым опытом и собственные наработки в части облика ПИЛ постоянно апробировались в основных научных сообществах по проблематике ПИЛ под эгидой МАГАТЭ и АЯЭ ОЭСР, в которых специалисты ФГУП «НО РАО» и ИБРАЭ РАН активно участвуют [15,16].

Исходной базой для нынешнего облика ПИЛ стали наработки ФГУП «НО РАО» и Санкт-Петербургского филиала АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» — «ВНИПИЭТ» по схеме расположения основных горных выработок, выполняемых в рамках ее создания (рис. 1), утвержденные стратегией создания ПГЗРО [17], и комплексной программы исследований [18].

Облик ПИЛ сформирован исходя из необходимости решения конкретных задач специальной ПИЛ, включая следующие:

- характеризация горного массива (детальное изучение геологического строения, механические, гидрогеологические и геохимические условия), включая выявление зон трещиноватости и изучение их водопроводящих свойств с целью окончательного обоснования пригодности площадки для сооружения ПГЗРО;

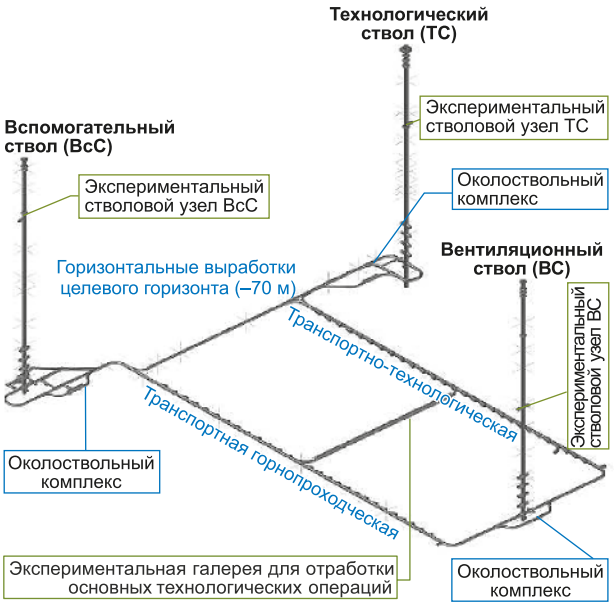


Рис. 1. Основные горные выработки ПИЛ

- проведение натурных экспериментов для изучения поведения материалов и конструкций инженерных барьеров в условиях максимально приближенных к реальным с учетом всех воздействующих факторов, в том числе: давления и тепловых нагрузок, геохимических и биохимических особенностей массива и подземных вод, изменения состояния массива при проведении строительных и горнопроходческих работ;
- демонстрация обоснованности оценки безопасности объекта регулирующим органам и широкой общественности, подтверждение достоверности параметров и моделей, использованных при выполнении расчетных оценок;
- отработка технологических процессов при эксплуатации ПГЗРО — подготовка горных выработок для размещения упаковок с РАО, их транспортировки, герметизации горных выработок.

На данном уровне детализации облика выделено 14 блоков работ, по большинству из которых дано видение состава и способов проведения работ (рис. 2). По блокам 1.1—1.5 и 2.1—2.6 это видение детализировано в большей степени. Общий подход к проработке видения был таков: что и зачем нужно исследовать, в том числе с привязкой к требованиям нормативных документов и тематике вопросов обоснования долгосрочной безопасности; какие типы оборудования и измерительной аппаратуры потребуются; каковы потребности в инфраструктурном обеспечении (энергопитание, связь и т. д.), каковы временные затраты на проведение работ и т. д. Примеры видения по блокам работ рассмотрены ниже.

Блоки работ 1.1 (штатное обследование в забое) и 1.2 (интервальное обследование в забое) должны сопровождать все горнопроходческие работы — как при проходке стволов, так и горизонтальных выработок на целевой глубине. Исследования, вошедшие в состав группы «Штатное обследование», предусмотрены нормативными документами в части проведения горных работ [19]. Штатное обследование должно проводиться в каждом цикле горнопроходческих работ. В ходе его должны осуществляться: геологическое документирование породных обнажений (описание пород, картирование трещиноватости, отбор и консервация образцов горных пород, в т. ч. материала заполнителя зон нарушений) и гидрогеологические наблюдения (оценка и определение водопритоков по зонам

Рис. 2. Основные блоки работ в жизненном цикле ПИЛ

разрывных нарушений, отбор и консервация проб подземных вод). Особенность выполнения этих работ, по сравнению с горнопроходческими нормативами, — большая периодичность и детальность. Интервальные обследования планируется проводить с гораздо меньшей частотой — до 15 обследований на каждом из стволов и до 40 — на горизонтальных выработках.

При интервальном обследовании (1.2) в забое и на стенах, кровле, подошве горных выработок (шахтных стволов и горизонтов) в дополнение к штатному обследованию предусмотрены:

- в рамках геологических исследований — бурение коротких скважин и отбор образцов для петрографических исследований и определения физико-механических свойств пород;
- гидрогеологических — организация постов мониторинга.

Кроме этого, предусмотрены геомеханические и геофизические исследования.

По информации, полученной при бурении скважин на местах будущих стволов ПИЛ, выделены «характерные зоны» для проведения интервальных исследований при проходке стволов (табл. 1). Характерные зоны для горизонтальных выработок определены путем совмещения актуальной 3D-модели массива и модели ПИЛ (рис. 3).

Таблица 1. Зоны интервальных обследований на вентиляционном стволе

Глубина, м	Тип исследования*
42–52	ABC
100–105	ACD
208–210	ABC
250–320	ACD
355–360	ABC
400–405	ABC
440–445	ABC
470–490	ABC

*A. Геологические исследования:
- массовые замеры трещиноватости, описание морфологии трещин и их минерального заполнения;
- бурение коротких скважин с отбором образцов для петрографических исследований и определения физико-механических свойств пород.

B. Гидрогеологические исследования, в т. ч. обустройство постов мониторинга:
- оценка водопритоков;
- отбор и консервация проб подземных вод;
- организация постов мониторинга.

C. Геомеханические исследования:
- измерение величин и ориентировок действующих напряжений в массиве.

D. Геофизические исследования:
- оценка зоны распространения техногенной трещиноватости вблизи выработок;
- подбор щадящих методов проходки;
- оценка направления и ориентаций основных структурных нарушений массива.

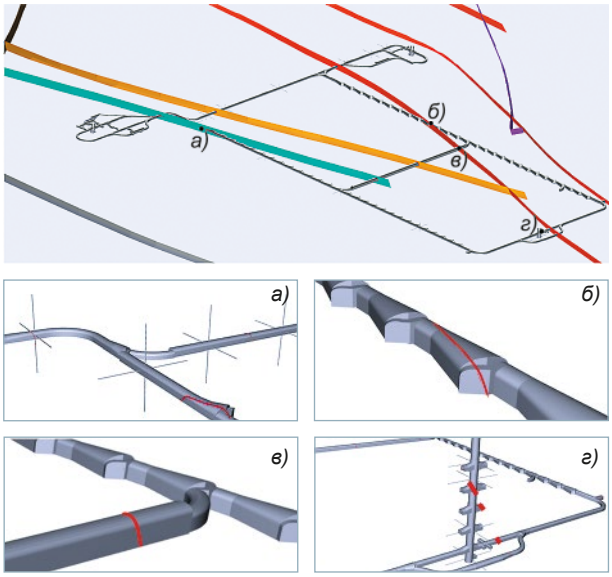


Рис. 3. Участки пересечения горными выработками ПИЛ зон разрывных нарушений в массиве определены путем совмещения 3D-моделей массива и ПИЛ:
а) пересечение транспортно-горнопроходческой выработкой зоны дробления;
б) пересечение транспортно-технологической выработкой участка прохождения трещины/разлома в массиве;
в) пересечение галереи захоронения и участка прохождения трещины/разлома в массиве;
г) участок прохождения вентиляционного ствола через разлом/крупную трещину

Основной инструментарий для проведения штатных и интервальных обследований к настоящему времени в целом определен [6].

В рамках блока 1.3 предусмотрено создание экспериментальных узлов на стволах. Они будут оборудоваться в предусмотренных проектом насосных камерах.

Обустройство этих узлов включает в себя комплекс последовательно выполняемых работ:

- бурение скважин в направлении зон структурных нарушений массива с отбором образцов пород для исследований;
- проведение комплекса геофизических исследований скважин для определения свойств горных пород в удаленных от горных выработок участках массива;
- видеокаротажные наблюдения стволов скважин, определение элементов залегания структурных элементов горных пород;
- гидрогеологические исследования;
- обустройство постов мониторинга.

Помимо ценных данных о прилегающих к зоне захоронения частях горного массива, данные долгосрочного мониторинга дадут основание для подтверждения или корректировки расчетных параметров по интегральным характеристикам гидродинамического режима зоны захоронения при эксплуатации ПИЛ, то есть

общему балансу поступления и объемами откачки вод из подземных сооружений.

Мониторинговый блок работ (1.4) должен обеспечить возможность долговременного анализа данных, получаемых в системе наблюдений в горных выработках и на поверхности. В их состав будут входить: гидрогеологические (расходы воды в выработках) и гидрогеохимические измерения; геотехнические измерения (НДС, деформация); радиационный контроль в выработках по природным радионуклидам; сейсмоакустический мониторинг (контроль разрывных нарушений); термометрические измерения, данные гидрогеологического, гидрохимического, гидрологического, сейсмологического и геодинамического мониторинга, а также параметры существующей радиационной обстановки. Предложения по отдельным системам мониторинга уже публиковались [7—11].

Безусловно, необходимо будет организовать работы по блокам 1.1—1.4 таким образом, чтобы отражать все получаемые данные в рамках созданной геологической модели [20]. Первым актуальным применением полученных данных станет блок работ 1.5, ориентированный на выбор мест размещения исследовательских установок в горных выработках ПИЛ. Необходимость размещения исследовательских установок за пределами выделенной единой локации в подземном комплексе ПИЛ обусловлена тем, что различные группы экспериментов предъявляют разные требования к характеристикам массива, горных выработок в месте их проведения (табл. 2).

Единственным способом определения точных мест расположения исследовательских установок является выполнение комплекса исследований при горнопроходческих работах в выработках ПИЛ (штатные и интервальные

Таблица 2. Основные требования к выработкам для экспериментальных установок

Виды исследований при эксплуатации ПИЛ	Планируемые исследования
Выработка вблизи зоны разрывного нарушения	
Геомеханические эксперименты	определение величин и ориентации напряжений в массиве комплексом методов
Гидрогеологические эксперименты	• трассерные эксперименты в расположенных рядом скважинах; • исследование обводненности горных выработок; • опытно-фильтрационные работы в скважинах
Микробиологические и геохимические эксперименты	• миграция радионуклидов в трещинных водах; • влияние микробиологических процессов на коррозию металлических ИББ
Эксперименты по оценке свойств материалов для изготовления ИББ	• моделирование поведения материалов инженерных барьеров в условиях ПГЗРО; • моделирование миграции радионуклидов в трещинных подземных водах
Выработка пересекает зоны разрывного нарушения	
Гидрогеологические эксперименты	• трассерные эксперименты в расположенных рядом скважинах; • исследование обводненности горных выработок; • опытно-фильтрационные работы в скважинах
Выработка пройдена по участку трещиноватых пород	
Термомеханические эксперименты	• воздействие на породы теплового и силового напряжения; • воздействие тепла на зону разуплотнения
Гидрогеологические эксперименты	• трассерные эксперименты в расположенных рядом скважинах; • исследование обводненности горных выработок; • опытно-фильтрационные работы в скважинах
Микробиологические и геохимические эксперименты	• миграция радионуклидов в трещинных водах; • влияние микробиологических процессов на коррозию металлических ИББ; • химическое и биогенное газообразование
Эксперименты по оценке свойств материалов для изготовления ИББ	• коллоидообразование и скорость эрозии материалов инженерных барьеров безопасности; • исследование процессов газопереноса в материалах инженерных барьеров безопасности; • исследование влияния температуры и поровой воды на эволюцию материалов ИББ
Выработка в монолитных породах	
Термомеханические эксперименты	интегральный эксперимент
Гидрогеологические эксперименты	• трассерные эксперименты в расположенных рядом скважинах; • исследование обводненности горных выработок; • опытно-фильтрационные работы в скважинах
Геомеханические эксперименты	определение величин и ориентации напряжений в массиве комплексом методов

обследования). Получаемая информация позволит актуализировать геологическую модель массива, и, в случае подтверждения необходимых параметров исследуемого участка, он будет зафиксирован для последующего обустройства в нем экспериментальной установки. Сегодня участки пересечения горными выработками зон разрывных нарушений в массиве определены путем совмещения актуальной 3D-модели массива и модели ПИЛ (рис. 3), в т. ч. в районе этих зон планируется разместить исследовательские установки. Еще раз подчеркнем — подтверждение или опровержение данной информации возможно только по итогам обследований горных выработок в процессе их создания.

В ПИЛ планируется организовать 7 основных групп экспериментов, а именно: термомеханические (2.1), геомеханические (2.2), гидрогеологические (2.3), по оценке свойств материалов барьеров безопасности (2.4), микробиологические и геохимические (2.5), мониторинговые работы (2.6), по отработке технологий загрузки и долгосрочных экспериментов, нацеленных на подбор материалов для финального этапа эксплуатации ПГЗРО — закрытия/ликвидации всех горных выработок (2.7).

К настоящему времени в основном проработаны эксперименты блоков 2.1—2.5.

В группе экспериментов 2.1. предусмотрены исследования на специализированных установках для оценок воздействия тепловых и силовых нагрузок на зону разуплотнения массива, сводов и стенок выработок [21]. При планировании экспериментов этого блока использовался зарубежный опыт исследований в ПИЛ [22—24].

Одна из установок блока 2.1 предназначена для проведения интегрального эксперимента, который будет производится на самых поздних этапах эксплуатации ПИЛ. Установка для интегрального эксперимента должна выдать информацию для проведения оценок изменений основных параметров массива, связанных с проходкой скважин захоронения, их загрузкой, а также после нагрева имитатором тепловыделяющей упаковки и последующего естественного охлаждения массива. Основные компоненты экспериментальной установки (рис. 4): 2 скважины захоронения для размещения имитаторов упаковок РАО, 8 наблюдательных скважин (по 4 наблюдательных скважины, разноудаленных от каждой скважины захоронения) для ультразвуковых исследований, видеокаротажа и оборудования для единичных измерений; контрольная скважина для единичных верификационных измерений, 8 скважин, оснащенных стационарными датчиками, позволяющими отслеживать изменения целевых параметров массива. Эксперимент выполняется по завершении горнопроходческих работ, т. к. будут применяться сейсмоакустические и ультразвуковые измерения. Эксперимент будет обеспечен постоянным расчетным сопровождением. Существующая расчетная модель (рис. 4) будет развита за счет поступающей информации о теплопроводности и иных характеристиках участка массива.

В блоке 2.2. предусмотрены эксперименты по определению максимальных напряжений, приводящих к разрушению пород, контроль и прогнозирование значений напряженно-деформированного состояния на стадии горнопроходческих работ и эксплуатации объектов. Часть из них уже описана в работе [14].

Из блока 2.3 приведем наиболее простой и тем не менее интересный эксперимент по исследованию обводненности горных выработок (рис. 5). Для его организации необходимо выделение участков горных выработок с естественным водопритоком на удалении от работ, связанных с интенсификацией водпритока в горные выработки. В эксперименте по контуру горной выработки (ствол, горизонтальная горная выработка) закрепляются сорбирующие маты. До и после завершения эксперимента производится их взвешивание, полученная разница в весе позволит оценить места и объемы водопритока в выработку. Кроме этого, в данном блоке предусмотрены опытно-фильтрационные работы, включая трассерные эксперименты в скважинах и долгосрочные гидродинамические наблюдения по сети скважин, пробуренных в стенах, кровле и подошве выработок ПИЛ.

В блоке 2.4 предусмотрены эксперименты по выявлению влияния повышенной температуры и состава грунтовых вод на эволюцию изолирующих свойств барьеров безопасности, изучению коллоидообразования и эрозии материалов ИББ, исследованию влияния процессов газопереноса на качество бентонитового буфера и проверке функциональных характеристик матриц РАО и глинистых защитных барьеров в присутствии стальных оболочек на примере масштабных макетов в реальных условиях.

Опираясь на международный опыт, в качестве глинистых материалов для создания барьеров безопасности рассматриваются бентонитовые глины месторождений РФ [25, 26] и ближайшего зарубежья (Казахстан, Армения, Азербайджан и др.).

Объем исследований геохимических и микробиологических экспериментов (2.5) учитывает [13] опыт по изучению влияния этих процессов на движение и локализацию подземных вод, в т. ч. миграцию радионуклидов в крупных

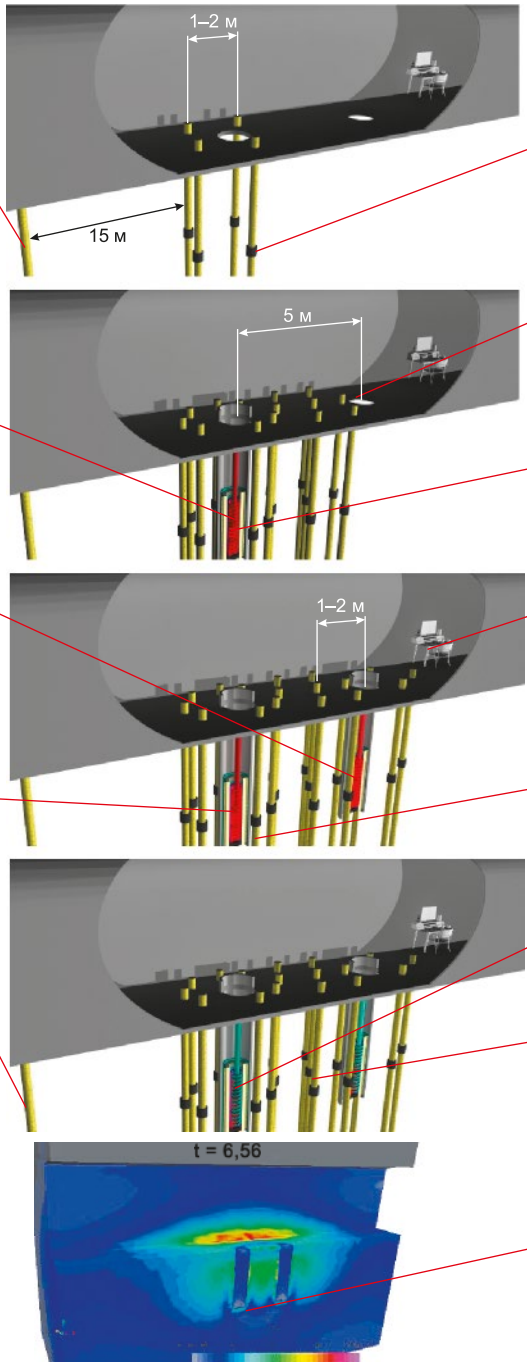
Контрольная наблюдательная скважина проходится за зоной разгрузки и влияния макетов захоронения, предназначена для фиксации состояния удаленных от скважин захоронения участков массива и отслеживания гидрогеологических параметров

Проходка первой скважины захоронения, ее загрузка контейнером с нагревательным элементом и прогрев массива. В этот же период бурятся «закрытые», дополнительные наблюдательные скважины, которые оснащаются оборудованием длительного наблюдения (термопары, давления, тензодатчики и проч.)

Вторая скважина проходится после того, как массив будет прогрет первой скважиной до 35°С. Это позволит сымитировать нагрев массива контейнерами с РАО

Массив прогревается двумя имитаторами контейнеров на протяжении 2–3 лет (в зависимости от фактических параметров массива, которые будут определены после сооружения выработок ПИЛ)

Изменения свойств массива периодически верифицируются с показаниями в контрольной наблюдательной скважине, в ней также отслеживается обводненность участка массива при нагреве и остывании



Проходка «пустых» наблюдательных скважин вблизи будущей скважины захоронения. Скважины предназначены для фиксации исходного состояния массива и в дальнейшем будут использоваться для зондирования при проходке скважины захоронения и в период проведения эксперимента

Перед проходкой второй скважины захоронения бурение «пустых» и «закрытых» наблюдательных скважин, которые в последующем будут включены в измерительную сеть эксперимента

Получение крупномасштабных параметров массива в условиях контролируемого нагрева

Все датчики, размещенные в скважинах, объединены в единую измерительную сеть эксперимента, позволяющую отслеживать изменение параметров массива и макета захоронения в непрерывном режиме

В пустых скважинах производится периодические исследования массива геофизическими методами, геофизическое обследование производится во всей выработке для фиксации параметров изменения свойств массива

После прогрева массива производится отключение нагревателей, и идет естественное охлаждение горных пород

Исследуемые параметры массива фиксируются с помощью измерительной аппаратуры, помещенной в закрытые скважины.

В период и после завершения эксперимента будет получена реальная модель, отражающая изменение термомеханических характеристик массива, принципиальных для обеспечения безопасности на различных фазах захоронения РАО, позволяющая оптимизировать концепцию захоронения и конструкцию пеналов для размещения РАО

Рис. 4. Эксперимент с нагревом имитатора РАО

В системе горных выработок ПИЛ выбираются участки, пройденные в различных типах пород

К каждому сорбирующему мату прикрепляется индикаторы насыщения

Участки горизонтальных выработок очищаются от набрызгбетонной крепи (на время проведения эксперимента)

Положение каждого мата фиксируется в БД

Выбираются монолитные участки, зоны повышенной трещиноватости, места пересечения выработками крупных трещин

Каждый сорбирующий мат проходит контрольное взвешивание и маркируется с занесением в систему обработки его данных исходных параметров

В выработке разворачивается мобильная крепь, производится монтаж промаркированных матов по периметру выбранного участка горной выработки

После насыщения каждый мат демонтируется, проходит взвешивание и результаты заносятся в БД

Рис. 5. Схема эксперимента по оценке обводненности горных выработок

трещинных зонах. Кроме того, планируется проведение экспериментов по изучению влияния геохимических и микробиологических процессов на материалы ИББ, в том числе их коррозию и газогенерацию материалов ИББ.

Блок работ 2.6, связанный с мониторингом, будет осуществляться и на этапе эксплуатации ПИЛ (блок 3.1). Эксперименты по отработке технологий загрузки РАО и работы по постановке долгосрочных экспериментов с материалами для закрытия горных выработок ПГЗРО (блок 2.7) начнутся позже, после конкретизации конструкторских решений по упаковкам РАО и скважинам для захоронения, и будут продолжены вплоть до завершения закрытия ПГЗРО.

Отметим несколько важных особенностей всех экспериментов:

- каждый из них должен дать материал для убедительного ответа на одно или несколько требований нормативных документов по содержанию отчета по обоснованию безопасности ПГЗРО;
- эксперименты будут организовываться в алгоритме:
  - постановка на основе расчетно-теоретической модели на основе существующих данных;
  - уточненная постановка с учетом фактических данных (сеть наблюдения, лабораторные исследования керна, подземных вод и т. д.) на момент определения места проведения эксперимента;
  - уточненная постановка с учетом фактических данных по месту проведения эксперимента;
  - возможная корректировка расчетной модели по факту изменений условий проведения эксперимента;
- наблюдения и исследования будут организовываться в максимально щадящем для массива режиме.

Последнее обстоятельство особенно важно, и здесь необходимо отметить, что уже имеющиеся замечания, вызванные опасениями чрезмерного нарушения целостности массива, зачастую исходят и от специалистов, принимавших участие в определении базовой компоновки ПГЗРО (два горизонта со сквозными скважинами захоронения и размещением РАО класса 2 в основном объеме горных выработок). В отличие от предлагавшегося ранее варианта компоновки ПГЗРО, в настоящее время прорабатываются варианты с тупиковыми скважинами захоронения.

В плане нарушений массива, не связанных с процессом строительства, а приуроченных к процессам получения данных, необходимых для обоснования долговременной безопасности окончательного захоронения РАО, необходимо отметить, что представления о планируемых объемах нарушений, вызванных исследовательской программой, сильно завышены. Безусловно, данные представления исходят от масштабности программы исследовательских работ, в т. ч. при проходке выработок. Объем исследований продиктован дефицитом данных, вызванным недостаточной степенью изученности массива, и в качестве базисного принят нейтральный прогноз по принципиальным для захоронения РАО свойствам и характеристикам горных пород. Соответственно, для опровержения данного прогноза целесообразно предусмотреть максимально возможный объем исследований, и лишь только часть из них приведет к незначительным нарушениям целостности массива. Как уже было упомянуто в данной статье, во главу исследовательских методов поставлены неразрушающие/щадящие методы. Достаточность и достоверность информации о характеристиках массива, получаемой в результате применения щадящих методов, будет определять целесообразность задействования методов исследований, связанных с незначительными дополнительными нарушениями целостности, например скважинные методы. До момента начала горнопроходческих работ щадящие и скважинные методы представлены в программе исследований в примерно равных пропорциях, но приоритетной является именно щадящая группа, несмотря на меньшую достоверность получаемых результатов. В качестве наглядного примера стоит привести процесс организации исследований в ходе научного сопровождения проходки стволов, где обработка данных штатного обследования, состоящего исключительно из щадящих методов, поступающих в расчетный комплекс сразу после того, как забой ствола очищен от первой отбитой горной массы, позволит детально определить места проходки коротких скважин и оптимизировать их количество в выбранных интервалах. Напомним, что интервалы выбраны на основании данных геологической модели, составленной на данных поисковой и оценочной стадий геологоразведочных работ. В целом, исходя из представлений научного сообщества, объем исследований, связанных с нарушениями массива, будет снижаться вместе с объемом актуальных фактических данных о массиве, получаемых в режиме реального времени с применением неразрушающих методов. Но полностью отказаться от заверки результатов неразрушающих исследований, а именно — скважинными методами, опасно с точки зрения характеризации массива в целях разработки обоснований долговременной безопасности.

Завершая краткое описание прогресса в проработке облика ПИЛ констатируем следующее:

1. Предложения по облику рассмотрены на совместном заседании НТС № 5 и № 10 Госкорпорации «Росатом». По результатам рассмотрения рекомендовано:

- предоставить в Госкорпорацию «Росатом» на утверждение предлагаемый перечень групп исследований в ПИЛ и внести предлагаемые решения в первоочередную корректировку проектной документации;
- при эксплуатации ПИЛ предусмотреть: термомеханические, геомеханические, гидрогеологические, микробиологические, геохимические эксперименты и работы по исследованию свойств барьерных материалов, эксплуатацию сети наблюдений и экспериментальных узлов на вертикальных стволах, отработку технологических решений по загрузке РАО и размещению закладочных материалов при закрытии горных выработок.

2. Детализированные предложения по облику готовятся к публикации в виде отдельного издания.

3. Не претендуя на исчерпанность, данные предложения, тем не менее, должны стать основой для детализации и развития, в том числе и главным образом в части методического и приборного обеспечения экспериментов.

4. Круг участников работ по формированию и реализации научной программы ПИЛ имеет тенденцию к расширению. Наиболее ценным в этом отношении явилось подключение к работам специалистов Сибирского государственного университета [20], который должен решить важную задачу подготовки кадров для работы в ПИЛ.

Формирование облика стало возможно благодаря участию большого количества специалистов, в том числе: ФГУП «НО РАО» (В. П. Бейгул, к.т.н.; В. Ю. Коновалов; С. В. Кирик), Санкт-Петербургского филиала АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» — «ВНИПИЭТ» (А. В. Демин), ИБРАЭ РАН (А. С. Баринов, к.т.н.; С. А. Богатов, к.ф.-м.н.; Д. В. Крючков, к.т.н.; Е. В. Моисеенко, к.ф.-м.н.; И. В. Капырин, к.ф.-м.н.; А. В. Расторгуев, к.т.н.; Г. Д. Неуважаев; К. А. Болдырев, к.т.н.; Е. А. Савельева, к.ф.-м.н.; В. С. Свительман, к.ф.-м.н.; О. А. Морозов, к.т.н.; А. Д. Токарчук; В. И. Шпиньков), ИГЕМ РАН (В. А. Петров, чл.-кор. РАН, Б. Т. Кочкин, д.г.-м.н.; В. В. Крупская, к.г.-м.н.; А. Н. Платэ, к.г.н.; С. А. Устинов, к.г-м.н.; И. О. Нафигин; А. Б. Лексин), ИФХЭ РАН (С. А. Кулюхин, д.х.н., Б. Г. Ершов, чл.-кор. РАН; Е. В. Захарова, к.х.н.; К. В. Мартынов, к.г.-м.н.; А. В. Сафонов, к.х.н.), МГУ им. М. В. Ломоносова (С. Н. Калмыков, чл.-кор. РАН, В. Г. Петров, к.х.н., И. Э. Власова, к.х.н.; А. Ю. Романчук, к.х.н.), НИТУ «МИСиС» (В. С. Гупало, д.т.н.), Геофизического центра РАН (В. Н. Морозов, д.т.н.; В. Н. Татаринов, д.т.н.; А. И. Маневич), СПбО ИГЭ РАН (В. Г. Румынин, чл.-кор. РАН; А. М. Никуленков, к.г.-м.н.; А. А. Шварц), Красноярскгеология (А. Ю. Озёрский, к.г.-м.н.; Д. А. Озёрский, к.т.н.; В. А. Караулов), ОАО «СПб-Гипрошахт» (А. В. Травин, А. А. Морин).

Литература

1. *Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Капырин И. В., Медянцев Н. В., Шамина А. В., Линге И. И., Поляков Ю. Д.* Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО / под ред. И. И. Линге, Ю. Д. Полякова. М. : Комтехпринт, 2015. 208 с.
2. *Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Коновалов В. Ю.* Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть II. Актуальное состояние проектов создания пунктов глубинного геологического захоронения в США, Канаде и странах Азиатского региона. М. : ИБРАЭ РАН, 2017. 41 с.
3. *Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Пронь И. А., Коновалов В. Ю.* Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть III. Зарубежный опыт создания и эксплуатации подземных исследовательских лабораторий. М. : ИБРАЭ РАН, 2017. 34 с.
4. *Линге И. И., Уткин С. С., Пронь И. А., Цебаковская Н. С.* Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть 1. Актуальное состояние проектов создания пунктов глубинного геологического захоронения в европейских странах. М. : ИБРАЭ РАН, 2017. 35 с.
5. *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 № IBRAE-2019-03. М.: ИБРАЭ РАН, 2019. 40 с.
6. *Гупало В. С., Казаков К. С., Крючков Д. В., Панкратенко А. Н., Плешко М. С., Вознесенский А. С., Гайсин Р. М., Мосейкин В. В.* Изучение состояния массива пород при строительстве подземной исследовательской лаборатории как этап получения исходных данных для оценок безопасности ПГЗРО // Радиоактивные отходы. 2019. № 1 (6). С. 90—99.
7. *Морозов В. Н., Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И., Татаринова Т. А.* Подземная исследовательская лаборатория: задачи геодинамических исследований // Радиоактивные отходы. 2019. № 1 (6). С. 77—89.

8. *Кафтан В. И., Гвишиани А. Д., Морозов В. Н., Татаринов В. Н.* Методика и результаты определения движений и деформаций земной коры по данным ГНСС на геодинамическом полигоне в районе захоронения радиоактивных отходов // Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса. 2019. № 1. С.83—94. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-15-1-83-94.

9. *Kamnev E. N, Morozov V. N., Tatarinov V. N., Kaftan V. I.* Geodynamics aspects of investigations in underground research laboratory (Niznekansk massif) // Eurasian mining. 2018. No 2. Pp.11—14. DOI: 10.17580/em.2018.02.03.

10. *Tatarinov V., Tatarinova T.* Observations by Space Geodesy Methods on Objects of Using Atomic Energy // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. Volume 221. Issue (2019). DOI:10.1088/1755-1315/221/1/012065.

11. *Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Сеелев И. Н.* Изучение современной геодинамики Нижне-Канского массива для безопасного захоронения радиоактивных отходов // Атомная энергия. 2016. Т. 121. № 3. С. 157—160.

12. *Кочкин Б. Т.* Задачи изучения геологической среды участка Енисейский на текущем этапе реализации проекта захоронения // Радиоактивные отходы. 2019. № 2 (7). С. 76—91. DOI: 10 25283/2587-9707-2019-2-76-91.

13. *Сафонов А. В., Болдырев К. А.* Исследование биогенных процессов в ПИЛ ПГЗРО в Нижнеканском массиве // Радиоактивные отходы. 2019. № 2 (7). С. 92—100. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-92-100.

14. *Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Маневич А. И., Татаринова Т. А.* Подземная исследовательская лаборатория: к программе геомеханических исследований // Радиоактивные отходы. 2019. № 2 (7). С. 101—118. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-101-118.

15. *Савельева Е. А.* Международная кооперация по геологическому захоронению РАО в кристаллических горных породах (Кристаллический клуб) // Радиоактивные отходы. 2019. № 2 (7). С. 58—64. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-58-64.

16. *Свительман В. С., Савельева Е. А., Бирюков Д. В.* Новости. Прошедшие научно-технические мероприятия // Радиоактивные отходы. 2018. № 4 (5). С. 99—101.

17. Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 114—120.

18. ФГУП «НО РАО». Комплексная программа исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров. Утв. Директором по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО ГК «Росатом» О. В. Крюковым 09.01.2019.

19. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 599 от 11.12.2013.

20. *Линге И. И., Уткин С. С., Кулагина Т. А., Трохов Н. Н.* Подземная исследовательская лаборатория на участке «Енисейский» Нижнеканского массива Красноярского края // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 12. № 7. С. 830—841. DOI: 10.17516/1999494X-0183.

21. *Butov R., Drobyshevsky N., Moiseenko E., Tokarev Yu., Konovalov V.* Planned coupled thermo-mechanical experiments in Nizhnekansk underground research facility. DECOVALEX 2019 Symposium on Coupled Processes in Radioactive Waste Disposal and Subsurface Engineering Applications. November 4—5, 2019, Brugg, Switzerland.

22. *J. Christer Andersson.* Äspö Pillar Stability Experiment, Final report. Rock mass response to coupled mechanical thermal loading. TR-07-01. Svensk Kärnbränslehantering AB. January 2007. 220 p.

23. *Lönnqvist M., Hökmark H.* Thermal and thermo-mechanical evolution of the Äspö Prototype Repository rock mass. Modelling and assessment of sensors data undertaken in connection with the dismantling of the outer section. R-13-10. Svensk Kärnbränslehantering AB. January 2015. 179 p.

24. *Siren T.* ONKALO in Situ Concrete Spalling Experiment — Fracture Mechanics Prediction. Working Report 2013-48. October 2015.

25. *Белоусов П. Е., Крупская В. В.* Бентонитовые глины России и стран ближнего зарубежья // Георесурсы. 2019. Т. 21. № 3. С. 79—90. DOI: 10.18599/grs.2019.3.79-90.

26. *Крупская В. В., Закусин С. В., Доржиева О. В., Чернов М. С., Тюпина Е. А.* Структурные критерии стабильности монтмориллонитов в условиях техногенного воздействия // VI Российская Школа по глинистым минералам «Argilla Studium-2019» и IV Российское совещание по глинам и глинистым минералам «ГЛИНЫ-2019»: Материалы докладов. Москва, 07—15 ноября 2019 г. М. : ИГЕМ РАН, 2019. С. 320.

Информация об авторах

Абрамов Александр Анатольевич, заместитель директора по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭЯРОО — начальник Управления разработки и реализации программ реабилитации объектов наследия, Госкорпорация «Росатом» (119017, Москва, ул. Большая Ордынка, 24), e-mail: AAAbramov@rosatom.ru.

Большов Леонид Александрович, академик РАН, профессор, доктор физико-математических наук, научный руководитель, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, ул. Большая Тульская, д.52), e-mail: bolshov@ibrae.ac.ru.

Дорофеев Александр Николаевич, кандидат технических наук, руководитель проектного офиса «Формирование единой государственной системы обращения с РАО», Госкорпорация «Росатом» (119017, Москва, ул. Большая Ордынка, 24), e-mail: ANDorofeev@rosatom.ru.

Игин Игорь Михайлович, генеральный директор, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, ул. Пятницкая, д.49А, стр.2), e-mail: info@norao.ru.

Казаков Константин Сергеевич, заместитель заведующего лабораторией Разработки и аналитического сопровождения программ ЯРБ, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: kks@ibrae.ac.ru.

Красильников Виктор Яковлевич, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по развитию — научный руководитель, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 49А, стр.2), e-mail: info@norao.ru.

Линге Игорь Иннокентьевич, доктор технических наук, заместитель директора, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, ул. Большая Тульская, 52), e-mail: Linge@ibrae.ac.ru.

Трохов Николай Николаевич, заместитель генерального директора — директор филиала «Железногорский», ФГУП «НО РАО» (662971, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Школьная, д.30), e-mail: fe@norao.ru.

Уткин Сергей Сергеевич, доктор технических наук, заведующий отделением, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, ул. Большая Тульская, 52), e-mail: uss@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание статьи

Абрамов А. А., Большов Л. А., Дорофеев А. Н., Игин И. М., Казаков К. С., Красильников В. Я., Линге И. И., Трохов Н. Н., Уткин С. С. Подземная исследовательская лаборатория в Нижнеканском массиве: эволюционная проработка облика // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 9–21. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-9-21.

UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY IN THE NIZHNEKANSKIY MASSIF: EVOLUTIONARY DESIGN STUDY

Abramov A. A.[1], Bolshov L. A.[2], Dorofeeev A. N.[1], Igin I. M.[3], Kazakov K. S.[2], Krasilnikov V. Y.[3], Linge I. I.[2], Trokhov N. N.[4], Utkin S. S.[2]

[1]State Corporation "Rosatom", Moscow, Russia

[2]Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[3]The Federal State Unitary Enterprise "National Operator for Radioactive Waste Management", Moscow, Russia

[4]Branch "Zheleznogorskiy", The Federal State Unitary Enterprise "National Operator for Radioactive Waste Management", Zheleznogorsk, Russia

Article received on February 10, 2020

The role of underground research laboratories (hereinafter URL) is generally recognized and involves the following points: URL enables to perform research and demonstration activities aimed at evaluating the feasibility of technological processes under actual spatial scales and geological setup. In recent years, quite a lot of articles and

reviews was published [1–5], concerning the issues associated with URLs established to demonstrate the safety of radioactive waste deep geological disposal. It should be noted that 25 URLs were developed globally for various purposes. Most similar to the Russian one by their purpose are those being site-specific (located at the potential disposal site) and excavated in crystalline bedrock (granite and gneiss), namely: operating URL ONKALO (Finland) and the one planned for construction in 2020 in China (Beishan Province). Among all the publications there are several articles [6–14] focused on particular studies planned to be carried out in the Russian URL being under construction at the site of Nizhnekanskiy massif near Zheleznogorsk city (Krasnoyarsk region). This paper presents the designs of the Russian URL being for the first time ever discussed in a holistic and dynamic manner starting with the construction stage and up to the closure of the disposal facility.

Keywords: *radioactive waste, safety assessment, underground research laboratory, research program at construction stage, long-term experiments, massif characterization, complex of in situ studies of rock mass state, URL construction.*

Formation of the Russian URL design became possible thanks to participation of a large number of specialists, including:

- The Federal State Unitary Enterprise "National Operator for Radioactive Waste Management": Beigul V. P., Konovalov V. Yu, Kirik S. V.;
- St. Petersburg branch of JSC "FCNIVT" SNPO "Eleron" — "VNIPIET": Demin A.V.;
- IBRAE RAS: Barinov A. S., Bogatov S. A., Krychkov D. V., Moiseenko E. V., Kapyrin I. V., Rastorguev A. V., Neuvazhayev G. D., Boldyrev K. A., Saveleva E. A., Svitelman V. S., Morozov O. A., Tokarchuk A. D. Spynkov V. I.;
- IGEM RAS: Petrov V. A., Cochkin B. T., Krupskaya V. V., Platé A. N., Ustinov S. A., Nafigin I. O., Lexin A. B.;
- IPCE RAS: Kulukhin S. A., Ershov B. G., Zakharova E. V, Martynov K. V., Safonov A. V.;
- Lomonosov Moscow State University: Kalmykov S. N., Petrov V. G., Vlasova I. E., Romanchuk A. Yu.;
- NUST MISIS: Gupalo V. S, etc.,
- Geophysical Center of RAS: Morozov V. N., Tatarinov V. N., Maneuevich A. I.;
- Saint-Petersburg Division of the RAS Environmental Geoscience Institute: Rumynin V. G., Nikulenkov A. M., Schwartz A. A.;
- OJSC "Krasnoyarskgeologiya": Ozersky A. Yu., Ozersky D. A., Karaulov V.A.;
- OJSC "SPb-Giproshakht": Travin A. V., Morin A. A.

Reference

1. Tsebakovskaya N. S. et al. *Obzor zarubezhnyh praktik zahoroneniya OYAT i RAO* [Revew of foreign practices for the disposal of spent nuclear fuel and radioactive waste]. Ed. by I. I. Linge, Yu. D. Poljakov. Moscow, Komtehprint Publ., 2015. 208 p.

2. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Konovalov V. Yu. Zarubezhnye proekty zahoroneniya OYAT i RAO. Chast' II. Aktual'noe sostoyanie proektov sozdaniya punktov glubinnogo geologicheskogo zahoroneniya v SSHA, Kanade i stranah Aziatskogo regiona. [International Experience in Deep Geological Disposal of SNF and RW. Part II. Current Progress in Deep Geological Disposal of Radioactive Waste and Spent Fuel in the U.S., Canada and Asian Countries]. *Preprint IBRAE no. IBRAE-2017-04.* Moscow, Nuclear Safety Institute Publ., 2017. 41 p.

3. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Pron I. A., Konovalov V. Yu. Zarubezhnye proekty zahoroneniya OYAT i RAO. CHast' III. Zarubezhnyj opyt sozdaniya i ekspluatacii podzemnyh issledovatel'skih laboratorij [Internetional Experience in Deep Geological Disposal of SNF and RW. Part 3. International experience in development and operation of underground research laboratories]. *Preprint IBRAE no. IBRAE-2017-02.* Moscow, Nuclear Safety Institute Publ., 2017. 35 p.

4. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Linge I. I., Pron I. A. Zarubezhnye proekty zakhoroneniya OYAT i RAO. Chast' 1. Aktual'noe sostoyanie proektov sozdaniya punktov glubinnogo geologicheskogo zakhoroneniya v evropeiskikh stranakh [Foreign SNF and RW disposal projects. Part I. Current status of projects for the creation of deep geological burial sites in European countries]. *Preprint IBRAE no. IBRAE-2017-03.* Moscow, Nuclear Safety Institute Publ., 2017. 35 p.

5. Abalkina I. L., Bolshov L. A., Kapyrin I. V., Linge I. I., Saveleva E. A., Svitelman V. S., Utkin S. S. Obosnovanie dolgovremennoj bezopasnosti zahoroneniya OYAT i RAO na 10 000 i bolee let: metodologiya i sovremennoe sostoyanie [Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel Deep Geological Disposal Long-Term Safety Assessment for 10 000 Years and Over: Methodology and the Current State]. *Preprint IBRAE no. IBRAE-2019-03.* Moscow, Nuclear Safety Institute Publ., 2019. 40 p.

6. Gupalo V. S., Kazakov K. S., Kryuchkov D. V., Pankratenko A. N., Pleshko M. S., Voznesensky A. S., Gaisin R. M., Moseykin V. V. Izuchenie sostoyaniya massiva porod pri stroitel'stve podzemnoj issledovatel'skoj laboratorii kak etap polucheniya

iskhodnyh dannyh dlya ocenok bezopasnosti PGZRO [The Study of the State of Rock Mass During Construction of Underground Research Laboratory as a Stage of Obtaining Initial Data for the Safety Assessments of Deep Geological Disposal]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2019, no. 1 (6), pp. 90—99.

7. Tatarinov V. N., Morozov V. N., Kaftan V. I., Manevith A. I., Tatarinova T. A. Podzemnaya issledovatel'skaya laboratoriya: zadachi geodinamicheskih issledovanij [Underground Research Laboratory: Problems of Geodynamic Research]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2019, no. 1 (6), pp. 77—89.

8. Kaftan V. I., Gvishiani A. D., Morozov V. N., Tatarinov V. N. Metodika i rezul'taty opredeleniya dvizhenij i deformacij zemnoj kory po dannym GNSS na geodinamicheskom poligone v rajone zahoroneniya radioaktivnyh othodov [Methods and results of determination of movements and deformations of the Earth's crust according to GNSS data at the Nizhne-Kansk geodynamic test network in the area of radioactive waste disposal]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa — Current problems in remote sensing of the Earth from space.* 2019, vol. 16, no. 1, pp. 83—94. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-83-94.

9. Kamnev E. N., Morozov V. N., Tatarinov V. N., Kaftan V. I. Geodynamics aspects of investigations in underground research laboratory (Niznekansk massif). *Eurasian mining,* 2018, no. 2, pp. 11—14. DOI: 10.17580/em.2018.02.03.

10. Tatarinov V., Tatarinova T. Observations by Space Geodesy Methods on Objects of Using Atomic Energy. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.* Volume 221. Issue, 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/221/1/012065.

11. Tatarinov V. N., Kaftan V. I., Seelev I. N. Study of the Present-Day Geodynamics of the Nizhnekansk Massif for Safe Disposal of Radioactive Wastes. *Atomnaya energiya — Atomic Energy,* 2017, vol. 121, no. 3, pp. 203—207. DOI: 10.1007/s10512-017-0184-5.

12. Kochkin B. T. Zadachi izucheniya geologicheskoj sredy uchastka Enisejskij na tekushchem etape realizacii proekta zahoroneniya [Investigating the Geological Environment at the Yeniseisky Site: Tasks for the Current Stage of the Disposal Project]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2019, no. 2 (7), pp. 76—91. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-76-91.

13. Safonov A. V., Boldyrev K. A. Issledovanie biogennyh processov v PIL PGZRO v Nizhnekanskom massive [URL in the Nizhnekanskiy Massif: Studying Biogenic Processes under HLW Disposal Project]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2019, no. 2 (7), pp. 92—100. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-92-100.

14. Tatarinov V. N., Morozov V. N., Manevith A. I., Tatarinova T. A. Podzemnaya issledovatel'skaya laboratoriya: k programme geomekhanicheskih issledovanij [Underground Research Laboratory: to the Program of Geomechanical Research]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2019, no. 2 (7), pp. 101—118. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-101-118.

15. Saveleva E. A. Mezhdunarodnaya kooperaciya po geologicheskomu zahoroneniyu RAO v kristallicheskih gornyh porodah (Kristallicheskij klub) [International Cooperation in Radioactive Waste Disposal in Crystalline Rocks (Crystalline Club)]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2019, no. 2 (7), pp. 58—64. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-58-64.

16. Svitelman V. S., Saveleva E. A., Biryukov D. V. Proshedshie nauchno-tekhnicheskie meropriyatiya [Latest events in nuclear science and technologies]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2018, no. 4 (5), pp. 99—101.

17. Strategiya sozdaniya punkta glubinnogo zahoroneniya radioaktivnyh othodov [Strategy for the development of RW deep disposal facility]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2018, no. 2 (3), pp. 114—120.

18. FGUP "NO RAO". Kompleksnaya programma issledovanii v obosnovanie dolgovremennoi bezopasnosti zakhoroneniya RAO i optimizatsii ehkspluatatsionnykh parametrov [National Operator for Radioactive Waste management FSUE. Comprehensive research program in support of long-term safety of radioactive waste disposal and optimization of operational parameters]. 2019.

19. Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezopasnosti "Pravila bezopasnosti pri vedenii gornykh rabot i pererabotke tverdykh poleznykh iskopaemykh" [Federal standards and rules of industrial safety "Safety rule at conducting mining operations and processing of solid minerals"]. 2013.

20. Linge I. I., Utkin S. S., Kulagina T. A., Trokhov N. N. Podzemnaya issledovatel'skaya laboratoriya na uchastke "EniseiskiI" Nizhnekanskogo massiva Krasnoyarskogo kraya [Underground research laboratory in "the Yenisei" section of the Nizhnekansky massif of the Krasnoyarsk Region]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii — Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies,* 2019, vol. 12, no. 7, pp. 830—841. DOI: 10.17516/1999-494X-0183.

21. Butov R., Drobyshevsky N., Moiseenko E., Tokarev Yu., Konovalov V. Planned coupled thermo-mechanical experiments in Nizhnekansk underground research facility. *DECOVALEX 2019 Symposium on Coupled Processes in Radioactive Waste Disposal and Subsurface Engineering Applications.* November 4—5, 2019, Brugg, Switzerland.

22. J. Christer Andersson. Äspö Pillar Stability Experiment, Final report. Rock mass response to coupled mechanical thermal loading. TR-07-01. Svensk Kärnbränslehantering AB. January 2007. 220 p.
23. Lönnqvist M., Hökmark H. Thermal and thermo-mechanical evolution of the Äspö Prototype Repository rock mass. Modelling and assessment of sensors data undertaken in connection with the dismantling of the outer section. R-13-10. Svensk Kärnbränslehantering AB. January 2015. 179 p.
24. Siren T. ONKALO in Situ Concrete Spalling Experiment — Fracture Mechanics Prediction. Working Report 2013-48. October 2015.
25. Belousov P. E., Krupskaya V. V. Bentonitovye gliny Rossii i stran blizhnego zarubezh'ya [Bentonite clays of Russia and neighboring countries]. *Georesursy — Georesources,* 2019, vol. 21, no. 3, pp. 79—90. DOI: 10.18599/grs.2019.3.79-90.
26. Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Dorzhievaa O. V., Chernov M. S., Tyupina E. A. Strukturnye kriterii stabil'nosti montmorillonitov v usloviyakh tekhnogennogo vozdeistviya [Structural criteria for the stability of montmorillonites in man-made conditions]. Materials of Reports: Clay and Clay Minerals: VI Russian School on Clay Minerals "Argilla Studium-2019" and IV Russian Meeting on Clay and Clay Minerals "CLAYS-2019". Moscow, IGEM RAS Publ., 2019. P. 320.

Information about the authors

Abramov Aleksandr Anatolyevich, Deputy Director for the Public Policy on Radioactive Waste, Spent Nuclear Fuel and Nuclear Decommissioning — Head of the Department for the Development and Implementation of Nuclear Legacy Remediation Programs, State Corporation "Rosatom" (24, Bolshaya Ordynka st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: AAAbramov@rosatom.ru.

Bolshov Leonid Aleksandrovich, Member of the Russian Academy of Sciences, professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Research, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: bolshov@ibrae.ac.ru.

Dorofeev Aleksandr Nikolaevich, PhD, Head of the Project Office on the Development of a Unified Radioactive Waste Management System, State Corporation "Rosatom" (24, Bolshaya Ordynka St., Moscow, 119017, Russia), e-mail: ANDorofeev@rosatom.ru.

Igin Igor Mikhailovich, General Director, The Federal State Unitary Enterprise "National Operator for Radioactive Waste Management" (49A, b. 2, Pyatnitskaya St, Moscow, 119017, Russia), e-mail: info@norao.ru

Kazakov Konstantin Sergeevich, Deputy chief of NRS programs development and analytical support Laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: kks@ibrae.ac.ru.

Krasilnikov Victor Yakovlevich, Deputy General Director for Development — Head of Research, The Federal State Unitary Enterprise "National Operator for Radioactive Waste Management" (49A, b. 2, Pyatnitskaya St., Moscow, 119017, Russia), e-mail: info@norao.ru.

Linge Igor Innokentevich, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: linge@ibrae.ac.ru.

Trokhov Nikolay Nikolaevich, Deputy General Director — Branch "Zheleznogorskiy" Director, The Federal State Unitary Enterprise "National Operator for Radioactive Waste Management" (30, Shkolnaya St., Geleznogorsk of the Krasnoyarsk region, 662971, Russia), e-mail: fe@norao.ru.

Utkin Sergey Sergeevich, Doctor of Technical Sciences, Head of Department, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: uss@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description

Abramov A. A., Bolshov L. A., Dorofeeev A. N., Igin I. M., Kazakov K. S., Krasilnikov V. Y., Linge I. I., Trokhov N. N., Utkin S. S. Underground Research Laboratory in the Nizhnekanskiy Massif: Evolutionary Design Study. *Radioactive Waste,* 2020, no. 1 (10), pp. 9—21 (In Russian). DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-9-21.