DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-78-89 УДК 620.039

ИЗУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МАССИВА В РАМКАХ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНОЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ НА УЧАСТКЕ «ЕНИСЕЙСКИЙ» В КРАСНОЯРСКОМ КРАЕ

Д. А. Озерский, В. С. Гупало, К. С. Казаков, Г. Д. Неуважаев

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 21 октября 2022 г.

В статье приведена хронология работ по изучению условий участка «Енисейский» для оценки возможности создания на нем пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО). Отражены основные результаты первой очереди работ по доизучению условий площадки объекта, выполненных в период 2019—2021 гг. в рамках реализации мероприятий «Стратегии создания ПГЗРО». Раскрыты направления дальнейшего исследования района и участка «Енисейский» в процессе геологоразведочных работ на стадии обследования.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, захоронение радиоактивных отходов, подземная исследовательская лаборатория, характеризация массива, исследования прискважинной зоны, определение основных систем трещин, ОФР, водобалансовые исследования.*

Работы по выбору места для создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) начали проводиться с начала 80-х годов прошлого века и были сопряжены с планами по созданию радиохимического производства РТ-2 Горно-химического комбината. Участок «Енисейский» впервые выделен в 1994 г. в ходе региональной оценки потенциальных мест размещения ПГЗРО и в дальнейшем был обозначен как альтернатива «Верхнеитатскому». Его площадь составляет 70 км^2, он расположен на северо-западной окраине Нижнеканского гранитоидного массива, на водораздельной части верховьев р. Шумиха и левых притоков р. Большая Тель.

В 2002—2004 гг. на нем проводились геолого-геофизические, гидрогеологические и научно-исследовательские работы. Основанием для этого послужила необходимость сравнять степень изученности перспективных альтернативных участков — «Верхнеитатского» и «Енисейского» — в рамках проекта по выбору места размещения подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ). Изучение территории участка было направлено на оценку соответствия его геологического строения, степени тектонической нарушенности и гидрогеологических условий требованиям к размещению объекта подземной изоляции высокоактивных отходов (ВАО).

В период 2002—2009 гг. были выполнены обобщение, комплексный анализ всех результатов ранее проведенных на нем исследований и уточнение положения площадки для дальнейших изысканий с целью создания ПИЛ и, в перспективе, ПГЗРО. Площадка размером 0,6 км с запада на восток и 1,5 км с юга на север располагалась на водоразделе ручьев Байкал, Безымянный и р. Шумиха.

В период 2009—2011 гг. выполнены поисковая и оценочная стадии геологоразведочных работ, а в 2013—2014 гг. — комплекс проектно-изыскательских работ.

По их результатам в 2016 г. комиссия ФБУ «ГКЗ» сделала заключение о том, что участок «Енисейский» «по своим геологическим, гидрогеологическим, тектоническим и сейсмическим условиям был признан потенциально пригодным для глубинного захоронения радиоактивных отходов в архейских гнейсах Нижнеканского массива в целевом интервале глубин 450—525 метров...». Для принятия окончательного решения о возможности захоронения РАО было рекомендовано выполнить последующие стадии геологического изучения. В составе гелогоразведочных работ было рекомендовано:

1. Выполнить разведочные работы на площади участка «Енисейский», в ходе которых провести:

- геологическое картирование и составление карты поверхности участка с целью наиболее точного выявления тектонических нарушений;
- детальную высокоточную цифровую магнитную съемку по сети 50×5 м на участке строительства с последующей глубокой обработкой и созданием объемной модели массива;
- гидрометрические работы на р. Шумиха и оценку изменчивости стока с целью обоснования сброса и разбавления дренажных вод.

2. В период строительства и выполнения опытно-эксплуатационных работ провести исследования с целью уточнения следующих показателей:

- геологическое строение массива и дизъюнктивная тектоника;
- гидрогеологические характеристики массива горных пород в плане и по глубине;
- изменение pH и Eh подземных вод по глубине;
- изменение возраста подземных вод по глубине;
- геотермический градиент в массиве горных пород;
- коэффициенты и скорости фильтрации подземных вод по зонам тектонических нарушений;
- объемы водопритоков по интервалам глубин;
- распределение и размеры трещин по глубине;
- петрографический состав горных пород;
- физико-механические и теплофизические характеристики горных пород;
- параметры напряженно-деформированного состояния в массиве горных пород;
- параметры зон трещиноватости и характеристика материалов-заполнителей трещин;
- сорбционно-миграционные характеристики пород и материалов-заполнителей трещин.

3. Уточнить геологическое строение, гидрогеологические условия и геоэкологическую обстановку на вероятных путях миграции радионуклидов, начиная от промышленной площадки и заканчивая областями разгрузки загрязненных подземных вод.

При этом необходимо отметить, что первое публичное научное рассмотрение проектных решений по ПГЗРО состоялось 05.09.2013 в рамках заседания НТС № 10 Госкорпорации «Росатом» [1]. Принимая во внимание большой объем проделанных за последние три десятилетия работ, члены НТС и приглашенные специалисты были единодушны в целесообразности их развития и привлечения широкого круга разнопрофильных специалистов. В дальнейшем, в ходе рассмотрения материалов по проекту создания ПИЛ и ПГЗРО, научным сообществом была определена необходимость в формировании общей программы (концепции) ведения работ, включающей детальный план исследований по изучению свойств выбранной площадки. Результатом этого явились разработка и утверждение руководством Госкорпорации «Росатом» «Стратегии создания ПГЗРО» (далее — Стратегия) [2] (2018 г.) и «Комплексной программы исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО» (2019 г.), а в 2020 году — назначение ИБРАЭ РАН научным руководителем по проекту создания ПГЗРО.

В 2019 году Госкорпорацией «Росатом» начата реализация первоочередных мероприятий в составе Стратегии [2], в т. ч. работы по подготовке к масштабному геологическому изучению района создания ПИЛ/ПГЗРО. В период с 2019 по 2021 год включительно научным руководителем — ИБРАЭ РАН — с участием исследовательских институтов РАН, профильных проектных и геологических организаций был начат комплекс работ по доизучению геологических характеристик участка и района размещения ПГЗРО, а также по испытанию и отработке методик и оборудования для научных исследований. Результаты работ за указанный период можно условно разделить на 2 группы:

1) подготовка программных и проектных материалов для последующих стадий изучения геологической среды в пределах лицензионной площади ПГЗРО и зоны его потенциального влияния, обработка и анализ данных действующих сетей долговременных наблюдений;

2) полевые исследования в районе строительства объектов ПИЛ и ПГЗРО для доизучения принципиальных (с точки зрения долговременной безопасности захоронения РАО) параметров горных пород, слагающих участок.

В рамках настоящей статьи рассматриваются результаты этих полевых исследований, проведенных в 2019—2021 гг. За это время были выполнены описанные ниже работы.

Геофизическое и геохимическое доизучение зоны потенциального влияния ПГЗРО в направлении наиболее вероятного пути разгрузки подземных вод

Геофизические работы позволяют провести первичное исследование геологического массива для локализации участков требующих выполнения дальнейших детальных, а следовательно, более трудоемких и дорогостоящих работ [3]. Реализация поэтапного подхода к изучению геологических условий участка предполагаемого расположения ПИЛ/ПГЗРО с учетом неравномерности детальности геологической информации обусловила уточнение положения площадки размещения и укрупнения масштабности работ (рис. 1).

Выполненный комплекс площадных геофизических работ позволил выбрать местоположение площадки размещения ПИЛ. Вместе с тем неравномерность геофизического покрытия прилегающей к этому участку территории привела к тому, что в пределах зоны потенциального влияния ПГЗРО остались недоизученные участки. Выявление положения зон нарушений в направлении ожидаемых путей движения подземных вод и оценка их проницаемости не были завершены. Поэтому было принято решение о включении геофизических работ в состав первоочередных.

Для разработки плана геофизического доизучения зоны потенциального влияния ПГЗРО были выполнены:

- ревизия результатов ранее проведенных геологических и геофизических исследований на участке «Енисейский»;
- актуализация разработанной по заказу ФГУП «НО РАО» программы в части определения приоритетности выполнения работ.

В соответствии с анализом результатов выполненного этапа работ участком первоочередного доизучения стал «Западный». Проведение геофизических исследований (рис. 1) было осуществлено в два этапа:

- на первом работы проводились комплексом бесконтактных методов: электропрофилирования (токов промышленной частоты) [5], магниторазведки [7], естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) — для выделения на качественном уровне крупных объемных структурных элементов массива и трассирования разделяющих их тектонических нарушений;
- на втором — проводилась детализация отдельных, выделенных на первом этапе аномалий, связанных с тектоническими нарушениями, для их заверки и оценки глубинности и структуры. Сейсмические работы выполнялись методом преломленных волн (МПВ) [4] в модификации сейсмотомографии. Дополнительно, в качестве опытных работ, на объекте были проведены исследования при помощи электротомографии и сейсморазведки методом отраженных волн (МОВ ОГТ).

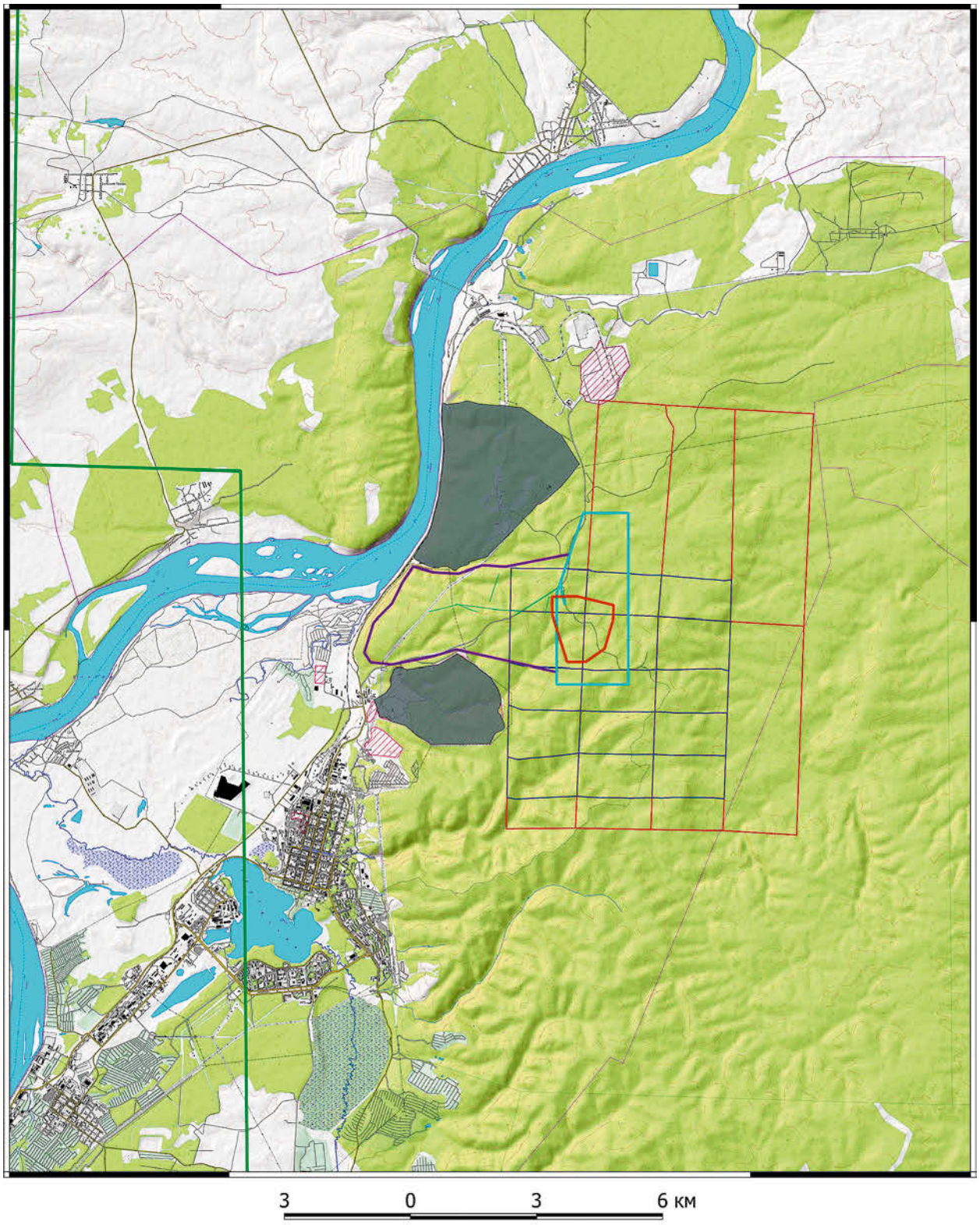
Объем геофизических исследований на участке «Западный» составил более 30 пог. км по каждому методу: работы были выполнены по сети профилей на площади 1,8 × 3,4 км (рис. 1).

Для оценки влияния выделяемых зон разрывных нарушений на гидрогеологические условия массива, к геофизическим работам был добавлен комплекс геохимических исследований, который позволяет с большой надежностью составить представление о гидрогеологических условиях породного массива в области изучаемой территории [9], [10]. В состав этих исследований вошли следующие съемки:

- наземная гидрогеохимическая, по поверхностным водопроявлениям с сопутствующей водногелиевой. Были опробованы все встреченные в ходе маршрутного изучения территории водопроявления: ручьи, родники, мочажины;
- газово-эманационная (радоновая), по намеченным геофизическим профилям.

Количество точек гидрогеохимического опробования устанавливалось требованиями к детальности исследований при проведении гидрогеологической съемки масштаба 1 : 25 000 (6 точек наблюдения на 1 км^2). Общая протяженность профилей определялась протяженностью намеченных геофизических профилей.

По результатам анализа данных геофизических и геохимических работ первого и второго этапов на исследуемой территории уточнено положение тектонических нарушений, которые являются продолжением тектонических нарушений, выявленных на прилегающей местности (изыскания 2002—2005 гг.). Заверочные сейсморазведочные и электроразведочные работы в модификации томографии позволили получить глубинные параметры выделенных геофизических аномалий.



Условные обозначения:

- Аэрогеофизическая съемка масштаба 1:50000 1999-2000 гг.
- Область геофизических работ первой очереди 2020 г.
- Площадь геолого-геофизических работ 2011-2015 гг.
- Площадь магнитной съёмки масштаба 1:2500
- Профили геолого-геофизических работ 2002 г.
- Профили геолого-геофизических работ 2003 г.
- Территории соседних предприятий

Рис. 1. Схема геофизической изученности зоны потенциального влияния проектируемого ПГРО на участке «Енисейский»

На основании результатов их оценки (в границах возможностей метода) проведено их ранжирование по степени риска возможной фильтрации из подземных водоносных горизонтов от строящегося объекта в сторону р. Енисей. Наиболее значимыми тектоническими нарушениями признавались те, которые имеют большее распространение на глубину. К ним относятся разломы: Байкальский, Безымянный, Енисейский, Студеный (рис. 2).

Рис. 2. Схема расположения геофизических профилей на участке 1-го этапа исследований и основная система тектонических нарушений (разломов) по данным предшествующих работ (2002—2005 гг.)

Результаты гидрогеохимических исследований подтверждают ранее сделанный вывод, что общий вектор движения подземных вод на Западном участке направлен с востока на запад — от линии главного водораздела к пойме Енисея. Результаты эманационного зондирования исследованного района позволили сделать вывод об отсутствии четко выраженных аномальных мест повышенного содержания радона в пробах грунтового воздуха, связанных, например, с линейными участками разгрузки подземных вод, которые, в свою очередь, определялись бы областями повышенной тектонической трещиноватости или дизъюнктивными дислокациями. Это обстоятельство является безусловно положительным фактором для обоснования экологической безопасности проектируемых объектов ПГЗРО.

По результатам проведенных исследований разработана схема проектного расположения буровых участков для последующего изучения массива с использованием скважинных методов, подготовлены рекомендации для выполнения геофизических исследований скважин (ГИС) и опытно-фильтрационных работ (ОФР), определены места установки геодезических знаков.

Работы по отбору проб горных пород с целью уточнения геологических условий участка и района размещения ПГЗРО

В настоящее время для территории участка «Енисейский» существует Государственная геологическая карта масштаба 1:200000, более крупных масштабов нет. При этом требованиями [11] определена необходимость представления тектонической, геологической, сейсмотектонической карт, схем разломов, включая выделение активных разрывов и геодинамических зон, района (площадки) в масштабе 1:50000.

Для уточнения геологических карт и схем участка «Енисейский» (а также укрупнения их масштаба), полученных по результатам отдельных геологических и геофизических работ на предыдущих стадиях его изучения и требующих детализации и заверки, в 2020—2021 гг. были выполнены рекогносцировочные полевые обследования, включающие поиск на земной поверхности обнажений горных (дочетвертичных) пород, отбор образцов, их последующее петрографическое изучение и химический анализ. С учетом созданных при строительстве обнажений на основе полученных в ходе полевых работ материалов (43 образца пород и 129 прозрачных, прозрачно-полированных шлифов) также было проведено изучение их петрографического и минерально-химического составов. Исследованные породы имеют характер высоко-, средне- и низкотемпературных метасоматических и деформационных преобразований.

Анализ сопоставления существующей предварительной геологической карты дочетвертичных образований участка масштаба 1:50000 и результатов исследования образцов, полученных при наземном обследовании, выявил, что большинство данных, взятых с маршрутных точек исследования, соответствуют материалам карты (рис. 3).

Также при сопоставлении явно выделяются закономерности в изменениях пород относительно их локализации, о которых сказано выше, а именно типы трансформаций, которые

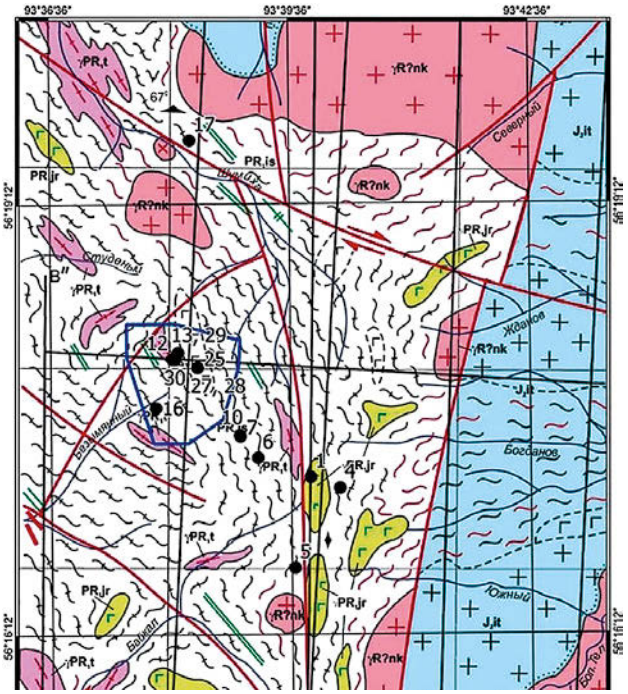


Рис. 3. Предварительная геологическая карта дочетвертичных образований участка масштаба 1:50 000 с нанесенными точками отбора образцов. Синим контуром обозначены границы лицензионного участка

претерпела порода в зависимости от близости к интрузивным образованиям или разрывным нарушениям. Несмотря на высокую степень совпадения результатов изучения образцов данным карты, приведенной в отчете, имеются и некоторые геологические несоответствия. Для формирования однозначного вывода необходимо в рамках геолого-разведочных работ последующих стадий геологических исследований, выполнение которых планируется в составе подготовленной «Комплексной программы доизучения характеристик площадки ПИЛ», произвести ряд буровых работ, в т. ч. в ближней и дальней зонах.

С учетом актуальных данных, полученных при полевых исследованиях в районе строительства ПИЛ/ПГЗРО, выполнена корректировка геологических карт участка и района расположения ПГЗРО (масштабов 1:50 000 и 1:200 000 соответственно).

Комплекс работ по уточнению водобалансовых характеристик условий размещения планируемого ПГЗРО

Комплекс работ выполнялся с участием специалистов СПбО ИГЭ РАН. В качестве полигона для развития водобалансовых исследований была выбрана территория водосборного бассейна р. Шумиха как представительного для участка «Енисейский». Факторы и процессы формирования стока на данной территории являются репрезентативными для всего района исследований.

Организация гидрологического полигона включала работы по выбору размещения ключевых участков, характеризующих различные ландшафтные зоны, гидрологических постов, а также по монтажу и установке необходимого оборудования.

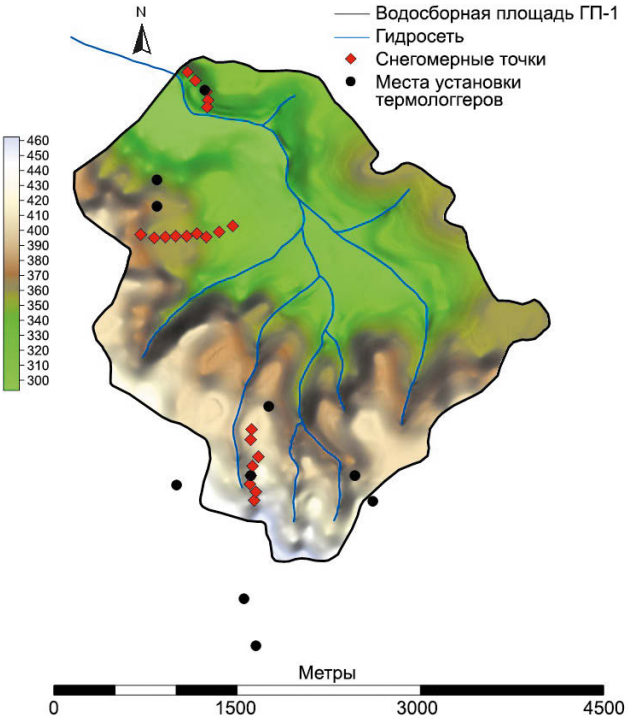


Рис. 4. Места расположения пунктов водобалансовых наблюдений

Для выполнения наблюдений в составе полигона «Шумихинский» были созданы (рис. 4):

- гидрологические посты на реке Шумиха и ее притоках;
- метеорологические посты, расположенные на водораздельном участке водосборного бассейна реки Шумиха, для наблюдений и фиксации следующих параметров:
  - температура воздуха;
  - относительная влажность;
  - атмосферное давление;
  - направление и скорость ветра;
  - количество и интенсивность атмосферных осадков;
  - солнечная радиация;
- посты наблюдений за влажностью и температурой почвенных горизонтов на ключевых участках, расположенных на разных гипсометрических отметках и в разных ландшафтных зонах;
- снегомерные профили.

Для учета неоднородности распределения осадков на водосборной площади было произведено дооборудование метеорологической сети осадкомерами, измерителями влажности и температуры почвы (рис. 5), расположенными на разных гипсометрических уровнях.

Рис. 5. Работы по установке датчиков контроля за влажностью и температурой почвенных горизонтов и снятие показаний с измерителей количества атмосферных осадков

Оценка количества воды в твердых осадках проводилась по результатам площадной снегомерной съемки, выполненной в пределах полигона «Шумихинский» (рис. 6, 7).

Рис. 6. Работы по снегомерной съемке

Рис. 7. Общий вид пунктов наблюдений за режимом поверхностного стока

По результатам обработки данных водобалансовых наблюдений уточнена величина инфильтрационного питания, являющаяся одним из ключевых параметров, необходимых для создания гидрогеологической модели, а также определено, что максимальный модуль подземного стока 3,29 л/(с·км^2) имеет часть водосбора, в которую попадает строительная площадка ПГЗРО. Чуть меньший модуль (2,99 л/(с·км^2)) имеет водораздельная территория. Минимальный модуль (2,34 л/(с·км^2)) приурочен к части водораздела, характеризующейся среднеминимальными отметками рельефа.

Полученные значения позволили перейти к величине инфильтрационного питания, которая на полигоне «Шумихинский» в соответствии с этими показателями варьируется от 72 до 104 мм/год.

Исследования в существующих скважинах, пробуренных в предшествующие периоды, для геологического изучения и уточнения гидрогеологических характеристик массива пород, в том числе параметров трещиноватости массива

Существующее на сегодняшний день представление о количественных характеристиках разрывных нарушений в массиве горных пород базируется на результатах изучения керна, отобранного при проходке скважин поисковой и оценочной стадий геологоразведочных работ. К числу актуальных вопросов, порождающих противоречия в процессе характеризации массива горных пород, относится действительное пространственное положение систем трещиноватости различных порядков. Данное обстоятельство усугубляется редкой сетью разведочных скважин (в некоторых случаях расстояние между ними превышает 200 м), что затрудняет создание геологической модели участка.

Для снятия части вопросов об определении пространственного положения основных систем трещин и анизотропии массива пород была определена необходимость в проведении дополнительных исследований прискважинных зон. Они выполнялись с использованием специально разработанного скважинного зонда, позволяющего осуществлять ориентированное визуальное изучение строения стенок разведочных скважин (диаметром от 56 мм и выше) и фиксировать положение трещин в массиве (рис. 8).

По итогам обследований было определено, что на целевом интервале глубин (400—500 м)

массив в большей своей части можно охарактеризовать как монолитный. Были получены данные о пространственном распределении трещиноватости, обнаружены более нарушенные участки массива, а также дано описания выявленных неоднородностей. Древние тектонические деформации зачастую сопровождаются внедрением даек, швы и трещины залечены вторичными минералами в ходе процессов ультраметаморфизма и гранитизации. Наследующие их более поздние разрывы в виде зон брекчирования, дробления и трещиноватости часто залечены процессами регрессивного метаморфизма (диафтореза), который проявлен в виде прожилков карбоната, кварца, хлорита, эпидота, хлорита с кальцитом, которые участвуют и в цементе брекчий.

Рис. 8. Выполнение работ по обследованию прискважинных зон

Статистическое изучение разнопорядковой трещиноватости показало, что на фоне регулярной первичной трещиноватости (5-й порядок) неравномерное распределение имеют более протяженные зоны (4-й порядок) и наиболее крупные — зоны дробления (3-й порядок). Более значительные разломы (2-й и 1-й порядки) блок размещения не затрагивают. Тектонические нарушения 3-го порядка (зоны дробления) формируют блоковую структуру массива, нарушения 4-го порядка (зоны локальной трещиноватости) представляют внутриблоковую трещиноватость. Единичные трещины образуют трещиноватость 5-го порядка.

Параллельно с изучением неоднородностей массива, в 2021 году в существующих скважинах начаты работы по детальному изучению гидрогеологических характеристик участка размещения ПИЛ.

Особенности геологических условий этого породного массива, заключающиеся в наличии крутопадающих водопроводящих зон нарушений, слабой обводненности массива и его низкой проницаемости, определяют недостаточную информативность, а в ряде случаев и неприемлемость традиционных подходов и методов гидрогеологического изучения. К методам, требующим развития, в первую очередь относятся:

- определение фильтрационных свойств слабопроницаемых массивов скальных пород;
- гидрохимическое опробование скальных слабопроницаемых массивов;
- гидрогеологическая характеризация разрезов, в том числе определение направления потока подземных вод;
- долговременный гидрогеологический мониторинг.

Это определило необходимость создания соответствующего методического и аппаратурного оснащения [12].

Для выполнения опытно-фильтрационных работ была реализована исследовательская установка. В основе ее использована двухпакерная система с регулируемым расстоянием между пакерами, имеющими длину 1 м, для более качественной изоляции исследуемых интервалов, их расширение осуществляется водой. Установка предназначена для выполнения опытных нагнетаний и откачек из выделяемых интервалов. При проведении исследований фиксируется давление не только в межпакерном интервале, но и под нижним и над верхним пакерами. Давление измеряется датчиками, локализованными над верхним пакером, и каждый из них гидравлически связан с зоной измерений.

С использованием разработанного ИБРАЭ РАН оборудования, в скважине Р-8 выполнены полевые исследовательские работы по уточнению гидрогеологических характеристик исследуемого массива (рис. 9). В итоге были получены следующие результаты:

- определено, что пакерная система заводского изготовления обеспечивает надежную изоляцию изучаемых интервалов скважин, что позволяет рекомендовать ее для дальнейшего использования;
- ствол скважины исследован на предмет проницаемости отдельных интервалов с получением качественных и количественных характеристик для каждого рассматриваемого интервала;
- интервалы 250—500 м и 650—700 м соответствуют категории непроницаемых пород, поскольку водопонижения в них при экспериментах не фиксировались даже при превышении

Рис. 9. Отработка технологии гидрогеологической характеризации массива с высокой дискретностью

давлений столба воды на 0,2—0,3 МПа относительно естественных значений;

- интервалы 500—650 м от устья оголовка скважины исследованы с шагом 10 м и были выбраны интервалы для последующих детальных исследований в силу малых значений проницаемости на них;
- водообмен в скважине Р-8 практически отсутствует.

Результаты выполненных исследований также показали, что долговременный мониторинг в скважине Р-8 целесообразен в интервале ствола от 500 до 650 м, который показал себя слабопроницаемым.

Кроме того, установлено, что при репрессии на исследуемый интервал реакция проницаемых участков на повышение уровня со временем замедляется, что может быть как свойством массива, так и следствием кольматажа трещин механической взвесью в воде, заполняющей ствол скважины. Это определяет необходимость перехода к более длительным тестам, т. к. для полноценного анализа фильтрационных свойств трещин и их систем следует обязательно обеспечивать установление статических уровней как до, так и во время эксперимента.

Проведенные исследования являются первой очередью работ по доизучению участка размещения ПГЗРО, выполняемых в рамках реализации мероприятий Стратегии. По их результатам были получены уточненные данные по геологическим, гидрогеологическим, гидрологическим и метеорологическим условиям участка «Енисейский», выполнена отработка методик исследований для их применения на последующих стадиях доизучения. Для дальнейшего системного развития исследовательских работ в настоящее время подготовлены «Комплексная программа дополнительного исследования принципиальных для обеспечения долговременной безопасности захоронения РАО характеристик участка и района строительства ПИЛ» и «Проект геологоразведочных работ (разведочная стадия)», предусматривающие:

- детализацию геологического строения и структурно-тектонических условий участка «Енисейский»;
- уточнение фильтрационных и миграционных параметров геологических элементов, в том числе зон разрывных нарушений и повышенной трещиноватости, непосредственно на участке строительства и в области потенциального влияния ПГЗРО;
- уточнение инженерно-геологических, горнотехнических, физико-механических, теплофизических, деформационных свойств пород целевого интервала глубин и элементов геологического строения по всей зоне изучения на участке строительства ПИЛ;
- проведение инженерно-геологических, инженерно-гидрогеологических, геофизических и экологических изысканий по направлению линии разгрузки потока подземных вод от ПГЗРО до р. Енисей;
- определение возраста вод и сорбционных свойств массива на участке возможного распространения загрязненных подземных вод от ПГЗРО до зоны разгрузки в р. Енисей;
- изучение сопротивления русловых отложений р. Енисей в месте вероятной разгрузки подземных вод;
- получение водобалансовых характеристик, необходимых для создания численной математической модели процессов фильтрации подземных вод и миграции техногенных радионуклидов;

- выполнение многофакторного анализа результатов изысканий и моделирование процессов миграции радионуклидов с целью оценки негативного воздействия ПГЗРО на наблюдаемые компоненты.

Литература

1. Решение заседания НТС № 10 Госкорпорации «Росатом» «Экологическая, ядерная и радиационная безопасность» от 05.09.2013.
2. *Крюков О. В.* Стратегия создания пункта глубинного захоронения РАО // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 114—120.
3. СП 11-105-97. Часть VI. Правила производства геофизических исследований. — Москва, Госстрой России, 2004.
4. РСН 66-87. Инженерные изыскания для строительства. Технические требования к производству геофизических работ. Сейсморазведка.
5. РСН 64-87. Инженерные изыскания для строительства. Технические требования к производству геофизических работ. Электроразведка.
6. Инструкция по магниторазведке. — Л. : Недра, 1981. 263 с.
7. Магниторазведка. Справочник геофизика. — М. : Недра, 1990. 470 с.
8. Электроразведка. Справочник геофизика в двух книгах. — М. : Недра, 1990. 438 с.
9. Временные указания по охране окружающей природной среды при проведении гидрогеологических и инженерно-геологических работ: Утв. М-вом геологии СССР 10.05.79. — Москва, ВСЕГИНГЕО, 1979. 34 с.
10. *Гавич И. К., Ковалевский В. С., Язвин Л. С. и др.* Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. — Новосибирск : Наука, 1983. 241 с.
11. НП-100-17. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов.
12. *Тесля В. Г., Расторгуев А. В.* Особенности планирования детального изучения гидродинамических и гидрохимических свойств участка «Енисейский» Нижнеканского массива // Радиоактивные отходы. 2020. № 4 (13). С. 58—70. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-58-70.

Информация об авторах

Озерский Дмитрий Андреевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: oda@ibrae.ac.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.

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

Неуважаев Георгий Дмитриевич, младший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: neyvazhaev@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание статьи

Озерский Д. А., Гупало В. С., Казаков К. С., Неуважаев Г. Д. Изучение параметров геологического массива в рамках создания и эксплуатации подземной исследовательской лаборатории на участке «Енисейский» в Красноярском крае // Радиоактивные отходы. 2022. № 4 (21). С. 78—89. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-78-89.

STUDYING THE PARAMETERS OF A GEOLOGICAL ROCK MASS FOR THE ESTABLISHMENT AND OPERATION OF AN UNDERGROUND RESEARCH FACILITY AT THE YENISEYSKIY SITE IN THE KRASNOYARSK REGION

Ozerskiy D. A., Gupalo V. S., Kazakov K. S., Neuvazhaev G. D.

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

Article received on October 21, 2022

The article presents the milestones in the investigation of siting conditions seeking to assess the feasibility of establishing a deep disposal facility for radioactive waste (DGR) at the Yeniseiskiy site. It considers certain findings from the first stage of an additional study focused on the DGR siting conditions carried out in 2019—2021 implemented under the Strategy for DGR Development. The paper also summarizes the key focus areas provided for further studies of siting conditions in the area and the site proposed for DGR construction under the geological exploration performed at the exploration stage of the project.

Keywords: *radioactive waste, radioactive waste disposal, underground research facility, rock mass characterization, studies of the near-wellbore area, identification of the main fracture systems, aquifer testing, water balance studies.*

References

1. *Reshenie zasedaniya NTS No. 10 Goskorporatsii Rosatom "Ehkologicheskaya, yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'"* [Decision made at the meeting of SC Rosatom's Research and Development Board No. 10 Environmental, Nuclear and Radiation Safety on September 5, 2013].
2. Kryukov O. V. Strategiya sozdaniya punkta glubinnogo zakhoroneniya RAO [Strategy for the development of RW deep disposal facility]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2018, no. 2 (3), pp. 114—120.
3. SP 11-105-97. Part VI. *Pravila proizvodstva geofizicheskikh issledovaniy* [Rules for the implementation of geophysical surveys]. Moscow, Gosstroy Rossii Publ., 2004.
4. RSN 66-87. *Inzhenernyye izyskaniya dlya stroitel'stva. Tekhnicheskiye trebovaniya k proizvodstvu geofizicheskikh rabot. Seysmorazvedka* [Engineering surveys for construction purposes. Technical requirements for the implementation of geophysical operations. Seismic exploration].
5. RSN 64-87. *Inzhenernyye izyskaniya dlya stroitel'stva. Tekhnicheskiye trebovaniya k proizvodstvu geofizicheskikh rabot. Elektrorazvedka* [Engineering surveys for construction purposes. Technical requirements for the implementation of geophysical operations. Electrical exploration].
6. *Instruktsiya po magnitorazvedke* [Instructions for magnetic prospecting]. Leningrad, Nedra Publ., 1981. 263 p.
7. *Magnitorazvedka. Spravochnik geofizika* [Magnetic exploration. Handbook of geophysics]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 470 p.
8. *Elektrorazvedka. Spravochnik geofizika v dvukh knigakh* [Electrical exploration. Handbook of geophysics in two books]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 438 p.
9. *Vremennyye ukazaniya po okhrane okruzhayushchey prirodnoy sredy pri provedenii gidrogeologicheskikh i inzhenerno-geologicheskikh rabot* [Temporary instructions for the protection of the natural environment during hydrogeological and engineering-geological operations]. Approved by the Ministry of Geology of the USSR 10.05.79. Moscow, VSEGINGEO Publ., 1979. 34 p.
10. Gavich I. K., Kovalevskii V. S., Yazvin L. S. et al. *Osnovy gidrogeologii. Gidrogeodinamika* [Fundamentals of hydrogeology. Hydrogeodynamics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 241 p.
11. NP-100-17. Trebovaniya k sostavu i soderzhaniyu otcheta po obosnovaniyu bezopasnosti punktov zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov [Requirements for the Structure and Content of Safety Analysis Reports for Radioactive Waste Disposal Facilities].
12. Teslia V. G., Rastorguev A. V. Osobennosti planirovaniya detal'nogo izucheniya gidrodinamicheskikh i gidrokhimicheskikh svoistv uchastka "Eniseiskii" Nizhnekanskogo massiva [Features of Planning a Detailed Study of the Hydrodynamic and Hydrochemical Properties of the Yeniseiskiy Site of the Nizhnekanskiy Massif]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2020, no. 4 (13), pp. 58—70. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-58-70.

Information about the authors

Ozerskiy Dmitriy Andreevich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: oda@ibrae.ac.ru.

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

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

Neuvazhaev Georgiy Dmitrievich, Junior research associate, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: neyvazhaev@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description

Ozerskiy D. A., Gupalo V. S., Kazakov K. S., Neuvazhaev G. D. Studying the Parameters of a Geological Rock Mass for the Establishment and Operation of an Underground Research Facility at the Yeniseyskiy Site in the Krasnoyarsk Region. *Radioactive Waste,* 2022, no. 4 (21), pp. 78—89. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-78-89. (In Russian).