

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ГЕОЛОГИЧЕСКОМ СТРОЕНИИ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ ПЗРО

В. А. Минаев¹, Б. Т. Кочкин^{1,2}, В. В. Полуэктов¹, В. А. Петров¹

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

²Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 11 сентября 2025 г.

Геологические условия среды, определяющие долговременную безопасность захоронения РАО, обусловлены несколькими принципиальными факторами, среди которых ключевое значение имеют особенности вмещающих пород и разрывные нарушения, свойственные изучаемому участку горного массива. Неопределенности в знаниях о геолого-структурных характеристиках массива непосредственно влияют на достоверность прогнозных расчетов миграции радионуклидов, необходимых для обоснования безопасности изоляции РАО. В статье показано влияние хода геологоразведочных работ на устранение проблем достоверности представлений о геологической среде участка «Енисейский», что проиллюстрировано несколькими итерациями геолого-структурных моделей разных лет. Обращается внимание на оставшиеся в геологическом строении неопределенности, влияющие на обоснование безопасности ПЗРО.

Ключевые слова: захоронение радиоактивных отходов, участок «Енисейский», породный массив, ПИЛ, ПЗРО, геолого-структурные исследования, радиоактивные отходы.

Введение

Успешная реализация планов по созданию подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ), а затем пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) на участке «Енисейский» во многом зависит от комплексного обоснования безопасности будущего объекта. Безопасность геологических хранилищ регламентируется на международном и национальном уровнях [1], [2]. Нормативные документы различного уровня устанавливают определенные требования к безопасности объекта. Существующие требования к геологической среде включают ведущую роль геолого-структурных особенностей горного массива, которые должны способствовать низкой обводненности

системы инженерных барьеров безопасности (ИББ) и низкой скорости миграции радионуклидов с подземными водами сквозь геосферу. Геолого-структурные факторы включены в каталог особенностей, событий, процессов (ОСП), влияющих на безопасность ПЗРО, составленный Агентством по ядерной энергетике Организации по сотрудничеству в Европе (АЯЭ ОБСЕ) [3] и повторенный Ростехнадзором РФ [4].

Обоснование безопасности (ОБ) хранилища базируется на моделировании системы изоляции и численного прогноза миграции радионуклидов в среду обитания. Неопределенности в знаниях о геолого-структурных особенностях массива — один из факторов, оказывающих

существенное влияние на достоверность расчетов. Неопределенности в геолого-структурных параметрах и данных связаны с неполнотой информации, недоступностью или невозможностью точных измерений [5], [6].

Повышение достоверности геолого-структурных знаний о среде захоронения — важная задача геологоразведочных работ (ГРР) на участке размещения ПГЗРО. Исходя из роли геолого-структурных факторов в обеспечении безопасности размещения РАО в геологической среде, задачи ГРР на территории влияния ПГЗРО в общем виде включают изучение особенностей состава пород вмещающего массива, разрывных нарушений тектонической природы и характера минерально-деформационных преобразований. В настоящей статье не рассматривается строение метаморфической гнейсовой толщи участка «Енисейский», а речь идет преимущественно о разрывной тектонике, которая является одним из важнейших факторов, определяющим структуру фильтрационного потока в кристаллических породах, которыми сложена геосфера участка «Енисейский», и скажется прежде всего на путях миграции подземных вод. Разрывы пород, как известно, в свою очередь, отличаются своей мощностью, интенсивностью дробления, наличием минерального выполнения и раскрытием в зависимости от положения в поле напряжений и деформаций [7], [8]. Это делает крайне сложной, но необходимой задачу изучения структуры среды фильтрации. Движение подземных вод останется практически неизменным в долгосрочной перспективе на весь период прогноза безопасности. Исключение может представлять минеральное выполнение трещин под влиянием изменчивости других факторов [9], важное для оценки сорбционной задержки радионуклидов. Пространственное положение крупных тектонических нарушений будет иметь значение при размещении упаковок с РАО в массиве, т.е. окончательную компоновку ИББ. Достоверность представления структуры фильтрационного потока уменьшает неопределенности в интерпретации результатов опытно-фильтрационных работ (ОФР) и оценки безопасности в целом.

Характеристика имеющихся моделей и причины их недостатков

Несовершенство существующих моделей геологического строения участка «Енисейский» целиком определяется недостаточной детальностью имеющихся на сегодняшний день данных.

Неопределенности в них лишь теоретически могут быть сведены к «нулю», а практически к некоторому достаточному минимуму, исходя из инженерных потребностей и экономических возможностей вместе с приемлемой достоверностью окончательной модели. Формализованные процедуры анализа данных, которые обычно используются при создании объемных геолого-структурных моделей в условиях обширных неопределенностей, основаны на методологии экспертной оценки и включают несколько этапов по мере повышения изученности геологического блока, включая дистанционные методы, бурение скважин и проходку горных выработок., изучение внутреннего строения разломов и ряд других данных [10].

По поводу причин основных неопределенностей в существующих геолого-структурных моделях имеется некоторый консенсус среди геологов, и они были неоднократно охарактеризованы [6], [11], [12]. Главная из них — редкая сеть глубоких скважин на плохо обнаженной лесистой территории. К этому добавляются вертикальное положение стволов скважин, буримых на ранних стадиях изучения участка, при крутом падении разрывных структур, отсутствие ориентированного керна и в целом невысокое качество кернового материала. К началу строительства горных выработок (2023 г.) на площади 1,75 км² пробурено 18 глубоких вертикальных скважин (до 600–700 м) со средним расстоянием между ними около 300 м [12]. Для сравнения: буровая изученность финской площадки на острове Олкилуото (площадь около 10 км²) включала к моменту начала строительства ПИЛ (2004 г.) 33 глубоких скважины. Предполагаемые структурные нарушения, выявленные на поверхности дистанционно и в траншеях, целенаправленно изучались наклонными скважинами, длина которых достигала 1050 метров. Первые 12 из них были пробурены с использованием двойной колонковой трубы, тогда как более поздние — с применением тройной трубы. Эта технология обеспечила высокое качество керна, что особенно важно для изучения внутренней структуры разломов и зон мелких тектонических нарушений [13].

Дополнительной проблемой работ на предыдущих стадиях изучения участка «Енисейский» послужило отсутствие нормативных документов Министерства природных ресурсов и экологии (МПП РФ), адекватно регулирующих проведения ГРР на участках создания ПГЗРО. На этапе предварительной разведки было выполнено поэтапное сгущение сети разведочных

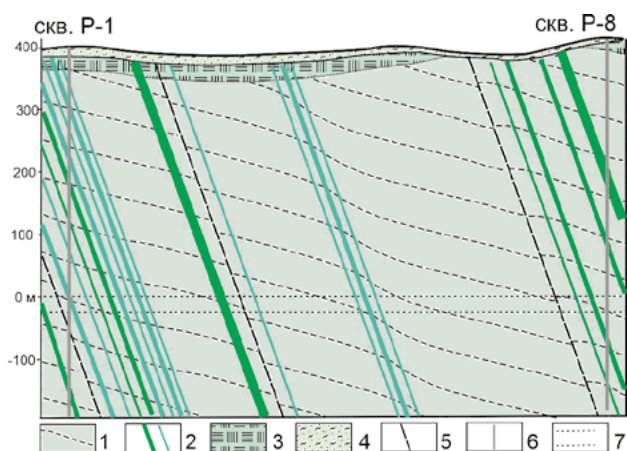
скважин, как того требуют действующие нормы МПР РФ [14].

Результатом такого выполнения работ стали неопределенности в физических данных о пространственном положении структурных элементов, которые отразились в неизбежной субъективности в картографическом отображении складчатости гнейсов и кристаллических сланцев, увязке в пространстве даек и разрывных нарушений в разрезах и на плане.

Общую хронологию работ по изучению геологических условий участка можно представить следующей последовательностью этапов работ.

Этап ГРР до 2008 г. включал характеризацию геологии участка дистанционными методами (дешифрирование мелкомасштабной топоосновы и космофотоснимков, геохимическая съемка поверхности и геофизическое профилирование) и бурение единичных скважин (только одна достигла глубины 600 м). Полученные данные легли в основу обоснования выбора местоположения площадки ПЗРО [12].

Начиная с момента выбора участка «Енисейский» наиболее перспективным в качестве места размещения ПЗРО в 2008 г., представления о его геологическом строении претерпели значительные изменения. Бурение первых трех глубоких скважин (до 700 м) с проведением комплексных геологических, гидрогеологических и инженерно-геологических исследований вскрыло наличие среди гнейсов и гранито-гнейсов крутопадающих диабазовых (метадолеритовых) даек. Результаты этих работ отразились в модели моноклиального крутого падения вмещающей толщи кристаллического массива (рис. 1).



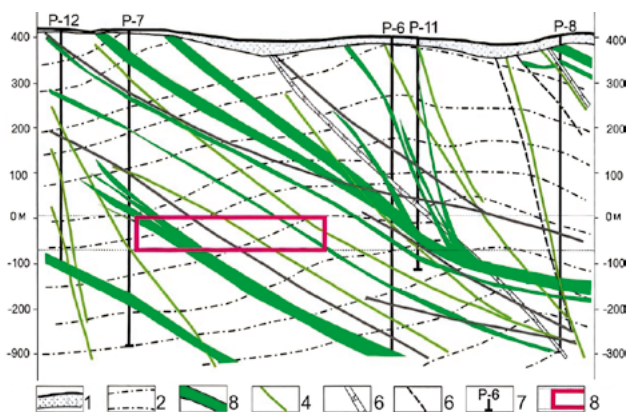
1 – гнейсы; 2 – дайки основного состава разного возраста; 3 – зона дезинтеграции; 4 – рыхлые отложения; 5 – разломы; 6 – скважины; 7 – уровень размещения ПЗРО

Рис. 1. Предварительная схема структуры массива пород на площадке расположения ПЗРО (по [15], упрощено)

В 2011–2012 гг. было пробурено еще 7 разведочных и 4 гидрогеологические скважины, в которых был выполнен полный комплекс геофизического каротажа и проведены опытно-фильтрационные работы (ОФР). С поверхности на участке были проведены исследования площадными геофизическими методами. Составлены геологические схемы коренных отложений для поверхности и уровня целевого интервала. В 2013–2015 гг. были продолжены работы по доизучению площадки и выполнено бурение скважин (2013 г.) на месте будущих шахтных стволов ПИЛ (3 скважины глубиной 508–539 м).

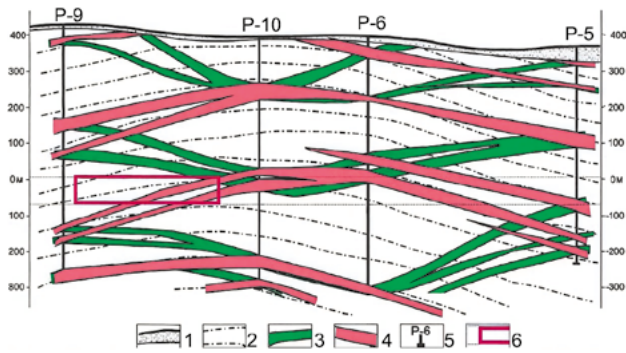
Для проведения опытно-фильтрационных исследований в районе скважины Р-11 пройдено две кустовых скважины Р-11-1 и К-1 глубиной 509 и 50,1 м соответственно. В них также был выполнен комплекс геофизических исследований и ОФР. В 2014 г. пройдена скважина РР-1 глубиной 520 м для проведения специальных работ по уточнению гидрогеологической модели участка. В том же году реализованы дополнительные инженерно-геологические изыскания по площадкам наземных сооружений и автодорогам. Было пробурено 47 разведочных скважин глубиной до 45,0 м. Их появление не отразилось на детальности геологической карты участка, поскольку они практически не достигли коренных пород.

По результатам тщательного анализа данных глубокого бурения, выполненного в ОАО «Красноярскгеология», в 2015 г. была предложена модель складчатых гнейсов, прорванных секущими дайками [16] (рис. 2).



1 – чехол рыхлых отложений; 2 – гнейсы; 3 – ранние дайки; 4 – поздние дайки; 5 – зоны древних сцементированных брекчий; 6 – зоны открытой трещиноватости; 7 – скважины и их номера; 8 – горизонт размещения и проекция предполагаемой зоны захоронения РАО на плоскость разреза (красный контур)

Рис. 2. Схематический субширотный разрез через скважины Р-12, Р-7, Р-11 и Р-8 (по данным АО «Красноярскгеология» [16] с упрощениями и дополнениями)

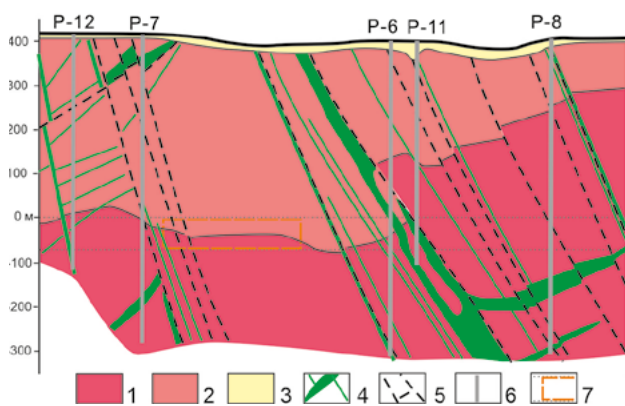


1 — чехол рыхлых отложений; 2 — гнейсы; 3 — дайки долеритов согласно АО «Красноярскгеология»; 4 — дайки долеритов согласно ИГЕМ РАН; 5 — скважины и их номера; 6 — горизонт размещения и проекция предполагаемой зоны захоронения РАО на плоскость разреза (красный контур)

Рис. 3. Схематический разрез через скважины P-9, P-10, P-6 и P-5 с альтернативной увязкой даек метадолеритов в субмеридиональном направлении (по данным АО «Красноярскгеология» с упрощениями и дополнениями)

Неопределенность, связанную с отсутствием ориентированного ядра, иллюстрирует рис. 3. Если геологи ОАО «Красноярскгеология» совместили самые крупные дайки метадолеритов на продольных разрезах в синклинальную структуру, то сотрудники ИГЕМ РАН показали возможность их объединения в антиклинальную структуру [17].

Геологами ИБРАЭ РАН была показана возможность интерпретации данных в виде разрывно-складчатой модели [11]. На рис. 4 представлена новая версия того же самого разреза, который изображен на рис. 2.



1 — нижняя толща архейских гнейсов; 2 — верхняя толща архейских гнейсов; 3 — четвертичные отложения и образования коры выветривания; 4 — дайки основного состава; 5 — разломы; 6 — скважины; 7 — проекция ПГЗРО на уровне размещения

Рис. 4. Схематический субширотный разрез через скважины P-12, P-7, P-6, P-11 и P-8 (по [11], упрощено)

С целью снижения неопределенностей в геологическом строении участка «Енисейский» за

годы, прошедшие после бурения глубоких скважин, в рамках работ научного руководителя по проекту ПГЗРО — ИБРАЭ РАН были выполнены геологические исследования, которые позволили уточнить особенности строения и актуализировать геологическую модель участка «Енисейский».

Работы по актуализации геологической модели 2020—2025 гг.

В 2020 году сотрудниками ИБРАЭ РАН и ИГЕМ РАН произведено видеообследование доступных на тот момент скважин [18]. Использование специализированного оборудования и методик интерпретации цифровых изображений позволило определить приблизительную ориентировку систем трещиноватости, установить параметры трещинной сети и зафиксировать мощность нарушений, а также заверить первичную геологическую информацию — результаты изучения ядра скважин. В итоге было получено достоверное представление о пространственном распределении трещиноватости в стволах скважин. Были выявлены и описаны наиболее нарушенные участки их стенок, а также вычислены фильтрационные параметры изучаемого массива.

В 2021 году подготовлена сводная схема разрывных нарушений дальней и ближней зон ПГЗРО [19] (рис. 5). В ходе этих работ была получена детальная цифровая модель рельефа. На ее основе и дешифрирования космоснимков высокого разрешения осуществлен линейно-ампунтный и структурно-геоморфологический анализ территории. При изучении разломной тектоники учитывались работы предшественников.

В том же году в ходе работ по актуализации геологических карт были пройдены геологические маршруты с отбором образцов коренных пород. В лабораторных условиях проведено петрографическое и петрохимическое изучение собранной коллекции образцов. Результаты были сопоставлены с разномасштабными геологическими картами района исследования.

Как уже было упомянуто, тектонические нарушения относятся к числу наиболее значимых элементов геологического строения с точки зрения безопасности ПГЗРО, в первую очередь как потенциальные пути миграции радионуклидов, а также геомеханически ослабленные зоны. В связи с этим в 2022—2023 гг. сотрудниками ИГЕМ РАН выполнено детальное петрографическое исследование образцов ядра скважин из зон разрывных нарушений [20].

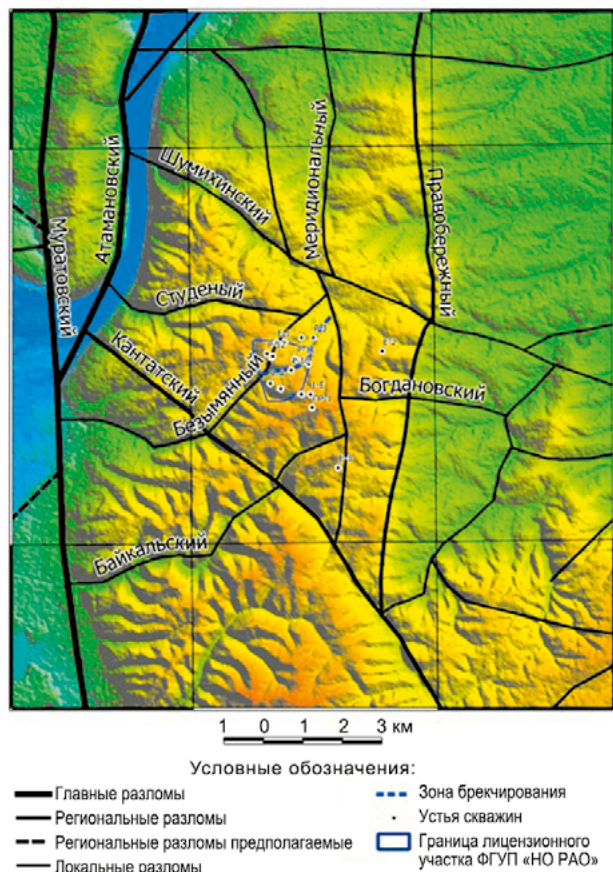


Рис. 5. Фрагмент схемы разрывных нарушений. В качестве фона представлена цифровая модель рельефа (под разрывными нарушениями в данном случае показаны линейные элементы, тектоническая природа которых, за редким исключением и на локальных участках, не подтверждена бурением или наблюдениями с поверхности)

В результате этих и предыдущих работ [21] выделены деформационные преобразования двух типов: первого (I) — связанные с элементами прототектоники, катаклаза и бластеза, сформированные в условиях высоких и средних температур (бластокатаклазиты-I и бластомилониты-I); второго (II) — образовавшиеся в процессе околотрещинных низкотемпературных гидротермально-метасоматических (НТГМ) преобразований (катаклазиты-II, бластокатаклазиты-II, бластомилониты-II и милониты-II). Такие разрывные нарушения зачастую представлены в керне зонами дробления.

Данные деформационные преобразования различаются по масштабу, времени формирования и интенсивности проявления и сопровождаются соответствующими минеральными ассоциациями и парагенезисами. Для типа I характерно наличие следующих минералов: кварц, полевые шпаты (калиевый полевой шпат, плагиоклаз), мусковит, амфиболы, биотит, пироксен (орто-/клинопироксен), оливин, эпидот-цоизитовые минеральные агрегаты, кордиерит,

силлиманит, гранат, тальк и др. К типу II отнесены кварц, альбит, серицит, группа глинистых минералов (гидрослюда/иллит, смешаннослойный иллит-сметтит, каолинит, монтмориллонит и др.), карбонаты, Fe-Ti лейкоксеноподобный агрегат, сульфиды и др. Ряд минералов переменного состава и различного генезиса могут быть отнесены к обоим типам деформационных преобразований — хлориты (Mg-Fe хлорит, низкотемпературный хлорит-сметтит), гематит, магнетит.

Важно учитывать тот факт, что в интервале развития одного вида разрывных нарушений (ранние или поздние зоны брекчирования) зачастую встречаются наложения обоих типов деформационных преобразований, что свидетельствует о проявлении процесса подновления (реактивации) данного разрывного нарушения. Эти интервалы зачастую совмещены с гипергенными преобразованиями (гидробиотит, каолинит, смектит, гидрооксиды Fe).

Результаты макроскопических, петрографических и минерально-химических исследований образцов керна скважин в сочетании с комплексной интерпретацией имеющейся геолого-геофизической информации позволили составить актуализированную модель геологического строения участка «Енисейский» [20]. На рис. 6 приведен разрез из состава этой модели по тому же профилю, что и на рис. 2 и 4.

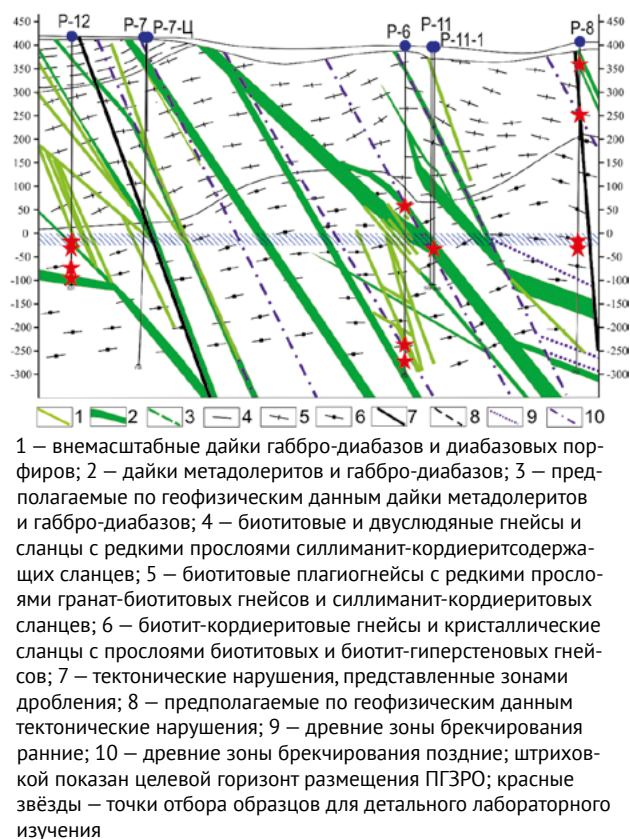


Рис. 6. Разрез по линии скважин P-12 – P-8

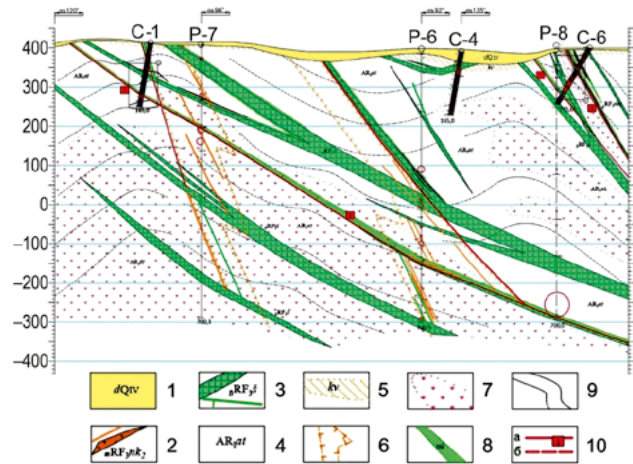
Отличительными особенностями этой модели являются четкая классификация разрывных нарушений и крутое падение даек и разрывных нарушений. По предположениям сотрудников ИГЕМ РАН, водопроницаемость древних залеченных зон брекчирования практически не отличается от водопроницаемости пород ненарушенного кристаллического массива, сложенного метаморфическими гнейсами, гранито-гнейсами, кристаллическими сланцами и амфиболитизированными дайками габбро-долеритов, долеритов, метадолеритов (диабазов) и лампрофиров.

Новым важнейшим этапом развития геологической изученности участка «Енисейский» стало начало выполнения ГРП разведочной стадии. В 2023 г. силами АО «Красноярскгеология» проведено бурение десяти наклонных картировочно-наблюдательных скважин глубиной до 165 м с получением ориентированного в пространстве керна [22].

Осуществлена полевая геологическая и геомеханическая документация керна, отбор литохимических и инженерно-геологических проб, проведены опытно-фильтрационные работы и геофизические исследования в скважинах. В лабораториях были выполнены химические, γ -спектрометрические исследования горных пород, полные гидрохимические анализы воды, определение ее α - и β -активности, газохимического состава, измерено содержание трития, а также изучены физико-механические свойства и сделано петрографическое описание горных пород. После камеральной обработки материалов выполненных работ специалистами АО «Красноярскгеология» была составлена геологическая модель в масштабе 1 : 5 000 (рис. 7).

На рис. 7, как и в более ранних моделях АО «Красноярскгеология» (см. рис. 2), вновь закладывается представление о пологом залегании даек и части разрывных нарушений. Возможность альтернативных увязок даек и разломов на одном и том же разрезе (см. рис. 6 и 7) — следствие отсутствия ориентированного керна.

Важным результатом работ 2023 года стало обнаружение в пределах изучаемой площади лампрофировых даек, представленных преимущественно вогезитами и в меньшей мере спесартитами. По мнению специалистов АО «Красноярскгеология», они являются образованиями второго этапа внедрения, которые секут все породы в пределах участка строительства ПИЛ. Размещение тел лампрофиров контролируется долгоживущими разломами северо-западного и северо-восточного простираний. Они образуют рои параллельных даек шириной 70—200 м и протяженностью 600—900 м.



- 1 — четвертичные элювиально-делювиальные отложения;
- 2 — Нижнеканский комплекс (поздний протерозой-рифей). Вторая фаза, жильная: дайки вогезитов и, в меньшей мере, спесартитов;
- 3 — Шишинский комплекс (поздний протерозой-рифей). Дайки амфиболитизированных долеритов, габбро-долеритов, долеритовых порфиритов;
- 4 — Канский метаморфический комплекс (ранний архей). Атамановская метасерия. Гнейсы и кристаллические сланцы биотитовые, биотит-кордиеритовые, биотитовые силлиманит- и гиперстенсодержащие;
- 5 — коры выветривания остаточные и редко переотложенные;
- 6 — поля развития (рои) даек лампрофиров;
- 7 — интенсивно мигматизированные гнейсы (мигматиты);
- 8 — динамометаморфические породы (тектониты);
- 9 — линии падения текстур гнейсов — структурные линии;
- 10 — локальные разрывные нарушения: достоверные (а), предполагаемые (б); кругами обозначены интервалы гидротермально-метасоматических изменений (микроклинизация)

Рис. 7. Геологический разрез по линии скважин C-1 — P-7 — P-6 — C-4 — P-8 — C-6 (по [22])

Другим значимым результатом буровых работ 2023 года является картирование в структуре участка ПИЛ семи разрывных нарушений, которые уточняют и дополняют ранее выделенные. Большой амплитуды смещения вдоль них не наблюдалось. Из элементов кинематики уверенно фиксировались сдвиговые борозды скольжения в некоторых дайках долеритов [22].

Малая глубина скважин 2023 г. не позволила уточнить геологическую модель целевого интервала глубин участка «Енисейский». Необходимые данные будут получены в результате реализации программы научного сопровождения горнопроходческих работ по сооружению выработок ПИЛ. Наряду с этим, итоги бурения внесли некоторую ясность в строение верхних частей разреза и привнесли новую информацию о дайковых образованиях, что заставляет задуматься о необходимости их более детального анализа на основе имеющегося керна скважин.

В настоящее время специалистами ИБРАЭ РАН [23] и ИГЕМ РАН проводится углубленное изучение результатов бурения 2023 г., в связи с чем в ближайшее время запланирована актуализация геологических моделей площадки и участка сооружения ПИЛ.

Заключение

Разрывные нарушения в горном массиве участка строительства ПИЛ/ПЗРО представляют собой области структурной неоднородности, в пределах которых развиты серии дизъюнктивов второго порядка — зоны повышенной трещиноватости, дробления и расланцевания.

Выявленные разломы отличаются минерально-деформационными преобразованиями двух типов: первый (I) связан с элементами прототектоники, катаклаза и бластеза, возникшими в условиях высоких и средних температур; второй (II) сформировался в процессе околотрещинных низкотемпературных гидротермально-метасоматических преобразований. Такие разрывные нарушения зачастую представлены в керне зонами дробления и, как следствие, могут иметь значительную проницаемость, тогда как водопроницаемость древних залеченных зон брекчирования (I тип) практически не отличается от пород ненарушенного кристаллического массива.

Признаков новейших (активных) тектонических движений по изученным разрывным нарушениям, вскрытых имеющимися буровыми скважинами, не выявлено. В некоторых изученных тектонических швах встречены единичные трещины с зеркалами скольжения разной ориентировки.

Следующую стадию разработки, принципиально снижающую геологические неопределенности, можно ожидать после завершения разведочной стадии ГРП и проходки горных выработок ПИЛ. Другой потенциальный источник уточняющей информации — строительство спирального пандуса вокруг ПИЛ/ПЗРО [24].

Благодарности

Исследования реализованы в рамках Комплексной программы исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров Стратегического мастер-плана исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия ПЗРО в Нижнеканском массиве (Красноярский край), утвержденной Госкорпорацией «Росатом» с горизонтом планирования до 2030 г., а также в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

Литература

1. Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности, № SSR-5. Вена, МАГАТЭ, 2011. 104 с.

2. НП-055-14. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности // Ядерная и радиационная безопасность. 2015. № 4 (78). С. 59—87.

3. International Features, Events and Processes (IFEP). List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: Version 3.0 // Radioactive Waste Management. NEA/RWM/R (2019). 1 July 2019 — URL: <http://www.oecd-nea.org> (дата обращения: 14.03.2025).

4. РБ-003-21. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов. 2021.

5. Кочкин Б. Т. Оценка безопасности геологических хранилищ ВАО и ОЯТ: международный опыт в приложении к Енисейскому проекту // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 18—29.

6. 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.

7. Лаверов Н. П., Петров В. А., Величкин В. И., Полуэктов В. В., Жариков А. В., Насимов Р. М., Дьяур Н. И., Бурмистров А. А., Петрунин Г. И., Попов В. Г., Сибгатулин В. Г., Линд Э. Н. Петрофизические свойства гранитоидов Нижнеканского массива: к вопросу о выборе участков для изоляции ВАО и ОЯТ // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2002. № 4. С. 293—310.

8. Petrov A. A., Poluektov V. V., Zharikov A. V., Nasimov R. M., Diaur N. I., Terentiev V. A., Burmistrov A. A., Petrunin G. I., Popov V. G., Sibgatulin V. G., Lind E. N., Grafchikov A. A., Shmonov V. M. Microstructure, filtration, elastic and thermal and thermal properties of granite rock samples: Implication to the HLW disposal. In: Harvey P. K., Brewer T. S., Pezard P. A., Petrov V. A. (eds). Petrophysical Properties of Crystalline Rocks. Geological Society of London, Special Publication. 2005. No. 240. Pp. 237—253.

9. Кочкин Б. Т., Богатов С. А., Баринов А. С., Савельева Е. А., Уткин С. С. Эволюция геосферы на территории размещения ПЗРО в Нижнеканском массиве // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 56—65. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-56-65.

10. Кочкин Б. Т. Достоверность объемных геолого-структурных моделей // Геология рудных месторождений. 2011. Т. 53. № 1. С. 95—104.

11. Морозов О. А., Распоргуев 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. Захоронение РАО на участке Енисейский в Красноярском крае: история выбора площадки и современное состояние исследований. — М. : Наука, 2024. 368 с.

13. Olkiluoto site description 2004: POSIVA 2005. Vols. 1–3. Eurajoki, Finland, PosivaOy, 2005. 444 p.
14. Методические рекомендации по обоснованию выбора участков недр для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых. — М. : ФБУ«ГКЗ», 2007. 36 с.
15. Лобанов Н. Ф., Бейгул В. П., Камнев Е. Н. и др. Федеральный объект окончательной подземной изоляции долгоживущих РАО на Горно-химическом комбинате // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2011. № 1. С. 10–23.
16. Геологическое доизучение (оценочная стадия) горного массива участка «Енисейский» для обоснования расширения интервала захоронения радиоактивных отходов до глубин 450–525 метров (+5 – –70 м БС) объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижне-Канский массив). 4 тома. Отчет по договору № 319/576-Д от 09.04.2015 г. / Караулов В. А., Заблоцкий К. А. и др. — Красноярск, ОАО «Красноярскгеология», 2015.
17. Радиационно-экологическая безопасность работ, выполняемых на начальном и конечном этапах ядерного топливного цикла РФ : Отчет по теме Президиума РАН / Петров В. А., Кочкин Б. Т., Тарасов Н. Н. и др. — М. : ИГЕМ РАН, 2016.
18. Гупало В. С., Казаков К. С., Минаев В. А., Озерский Д. А., Устинов С. А., Нафигин И. О. Результаты исследований в существующих скважинах на участке недр «Енисейский», в т. ч. для определения основных систем трещин и анизотропии массива пород // Радиоактивные отходы. 2021. № 1 (14). С. 76–86. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-76-86.
19. Анализ тектонической нарушенности территории зоны потенциального влияния ПГЗРО и формирование рекомендаций к планированию буровых работ на данной площади : Отчет по договору № ИБРАЭ-2020 от 23.10.2020 / Минаев В. А., Нафигин И. О., Устинов С. А. — М. : ИГЕМ РАН, 2021.
20. Актуализация моделей геологического и структурно-тектонического условий участка : Отчет по договору по договору № 1040-3 от 18.05.2022 / Минаев В. А., Полуэктов В. В., Мурашов К. Ю. — М. : ИГЕМ РАН, 2023.
21. Петров В. А., Полуэктов В. В., Хаммер Й. Р., Цулауф Г. Исследование минеральных и деформационных преобразований горных пород Нижнеканского массива и складчатого обрамления в целях определения их удерживающей способности при геологическом захоронении и изоляции радиоактивных отходов // Горный журнал. 2015. № 10. С. 67–77. DOI: 10.17580/gzh.2015.10.13.
22. Сооружение картировочно-наблюдательных скважин на лицензионном участке филиала «Железногорский» ФГУП «НО РАО» (ЗАТО Железногорск, Красноярский край) : Технический отчет / Пушкарева О. В., Озерский А. Ю., Караулов В. А. и др. — Красноярск, АО «Красноярскгеология», 2023.
23. Морозов О. А. Разведочное бурение с отбором ориентированного керна на участке «Енисейский»: первые результаты // Радиоактивные отходы. 2024. № 2 (27). С. 69–79. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-2-69-79.
24. Дерябин С. А., Уткин С. С., Шевцова Е. В., Казаков К. С., Кузьмин Е. В., Баринов А. С., Дёмин А. В., Свительман В. С., Озёрский Д. А., Бамборин М. Ю. Анализ международного опыта технологий строительства объектов подземной изоляции РАО // Радиоактивные отходы. 2025. № 1 (30). С. 57–72. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-1-57-72.

Информация об авторах

Минаев Василий Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: minaev2403@mail.ru.

Кочкин Борис Тимофеевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Москва, Старомонетный пер., 35), e-mail: btk@igem.ru; старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52).

Полуэктов Валерий Викторович, старший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: varol-52@mail.ru.

Петров Владислав Александрович, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор, директор, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: vlad243@igem.ru.

Библиографическое описание статьи

Минаев В. А., Кочкин Б. Т., Полуэктов В. В., Петров В. А. Развитие представлений о геологическом строении ближнего поля ПЗРО // Радиоактивные отходы. 2025. №4(33). С. 94–104. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-4-94-104.

DEVELOPMENT OF CONCEPTS ON THE GEOLOGICAL STRUCTURE OF THE NEAR FIELD IN A DGR

Minaev V. A.¹, Kochkin B. T.^{1,2}, Poluektov V. V.¹, Petrov V. A.¹

¹Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

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

Article received on September 11, 2025

The geological environmental conditions essential for the long-term safety of radioactive waste disposal are influenced by several fundamental factors, including the features of the host rocks and faults inherent in the studied section of the geological massif. Uncertainties in the knowledge of the geological and structural features of the massif directly affect the reliability of predictive calculations of radionuclide migration required to demonstrate the RW disposal safety. The article shows how the progress in geological exploration eases the problems increasing the reliability of ideas about the geological environment at the Yeniseyskiy site, which is illustrated by several iterations of geological and structural models developed in different years. The article draws attention to the remaining uncertainties associated with the geological structure that affect the safety assessment of the DGR and considers some options for further studies.

Keywords: disposal of radioactive waste, Yeniseyskiy site, rock massif, URL, DGR, geological and structural studies, radioactive waste.

Acknowledgments

The research was carried out under the “Comprehensive research program aimed to substantiate the long-term safety of radioactive waste disposal and optimization of operational parameters (Strategic master plan for research aimed to substantiate the safety of the construction, operation and closure of the DGR in the Nizhnekansky massif (Krasnoyarsk Territory))” approved by the State Corporation Rosatom with a planning horizon up to 2030, as well as within the framework of the state assignment of IGEM RAS.

References

1. Disposal of Radioactive Waste. Specific Safety Requirements, No. SSR-5. Vienna, IAEA, 2011. 104 p.
2. NP-055-14. Zakhoroneniye radioaktivnykh otkhodov. Printsipy, kriterii i osnovnyye trebovaniya

bezopasnosti [Disposal of radioactive waste. Principles, criteria and basic safety requirements]. *Yadernaya i radiatsionnaya bez-opasnost' – Nuclear and radiation safety journal*, 2015, no. 4 (78), pp. 59–87.

3. International Features, Events and Processes (IFEP). List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: Version 3.0. Radioactive Waste Management. NEA/RWM/R (2019). 1 July 2019 — URL: <http://www.oecd-nea.org> (accessed on: 14.03.2025).

4. RB-003-21. *Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoy energii. Otsenka dolgovremennoy bezopasnosti punktov glubinnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov* [Safety Guide for Atomic Energy Use. Long-Term Safety Assessment of Deep Disposal Facilities for Radioactive Waste]. 2021.

5. Kochkin B. T. Otsenka bezopasnosti geologicheskikh khranilishch VAO i OYAT: mezhdunarodnyy opyt v prilozhenii k Yeniseyskomu projektu [The Safety Assessment of Geological Repositories of HLW and SNF: the International Experience in

the Application to the Yenisei Project]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 18–29.

6. Kochkin B. T. Zadachi izucheniya geologicheskoy sredy uchastka Yeniseyskiy na tekushchem etape realizatsii proyekta zakhoroneniya [Investigating the Geological Environment at the Yeniseisky Site: Tasks for the Current Stage of the Disposal Project]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2019, no. 2 (7), pp. 76–91. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2 76 91.

7. Laverov N. P., Petrov V. A., Velichkin V. I., Poluektov V. V., Zharikov A. V., Nasimov R. M., Dyaur N. I., Burmistrov A. A., Petrunin G. I., Popov V. G., Sibgatulin V. G., Lind E. N. Petrofizicheskiye svoystva granitoidov Nizhnekanskogo massiva: k voprosu o vybore uchastkov dlya izolyatsii VAO i OYAT [Petrophysical properties of granitoids inherent in the Nizhnekanskiy massif: on the site selection for HLW and SNF disposal]. *Geoecologiya. Inzhenernaya Geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya — Environmental Geoscience*, 2002, no. 4, pp. 293–310.

8. Petrov A. A., Poluektov V. V., Zharikov A. V., Nasimov R. M., Diaur N. I., Terentiev V. A., Burmistrov A. A., Petrunin G. I., Popov V. G., Sibgatulin V. G., Lind E. N., Grafchikov A. A., Shmonov V. M. Microstructure, filtration, elastic and thermal and thermal properties of granite rock samples: Implication to the HLW disposal. In: Harvey P. K., Brewer T. S., Pezard P. A., Petrov V. A. (eds). *Petrophysical Properties of Crystalline Rocks*. Geological Society of London, Special Publication. 2005. No. 240. Pp. 237–253.

9. Kochkin B. T., Bogatov S. A., Barinov A. S., Savel'eva E. A., Utkin S. S. Evolyutsiya geosfery na territorii razmeshcheniya PGZRO v Nizhnekanskom massive [Evolution of geosphere at the site in Nizhnekanskiy massif meant for deep geological disposal]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 1 (10), pp. 56–65. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-56-65.

10. Kochkin B. T. Dostovernost' ob'yemnykh geologo-strukturnykh modeley [Reliability of volumetric geological structural models]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy — Geology of Ore Deposits*, 2011, vol. 53, no. 1, pp. 95–104. DOI: 10.1134/S1075701511010041.

11. Morozov O. A., Rastorguev A. V., Neuvazhaev G. D. Otsenka sostoyaniya geologicheskoy sredy uchastka Yeniseyskiy (Krasnoyarskiy kray) [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. Zakhoroneniye RAO na uchastke Yeniseyskiy v Krasnoyarskom kraye: istoriya vybora ploshchadki i sovremennoye sostoyaniye issledovaniy [Disposal of radioactive waste at the Yeniseisky site in the Krasnoyarsk Territory: history of site selection and

current research progress]. Moscow, Nauka Publ., 2024. 368 p.

13. Olkiluoto site description 2004: POSIVA 2005. Vols. 1–3. Eurajoki, Finland, PosivaOy, 2005. 444 p.

14. *Metodicheskiye rekomendatsii po obosnovaniyu vybora uchastkov nedr dlya tseley, ne svyazannykh s dobychey poleznykh iskopayemykh* [Methodological recommendations supporting the selection of subsoil areas for purposes not related to the extraction of minerals]. Moscow, FBU “GKZ” Publ., 2007. 36 p.

15. Lobanov N. F., Beygul V. P., Kamnev E. N. et al. Federal'nyy ob'yekt okonchatel'noy podzemnoy izolyatsii dolgozhivushchikh RAO na Gorno-khimicheskom kombinatе [Federal facility for the final underground disposal of long-lived RW at the Mining and Chemical Combine]. *Bezopasnost' yadernykh tekhnologiy i okruzhayushchey sredy — Safety of nuclear technologies and the environment*, 2011, no. 1, pp. 10–23.

16. *Geologicheskoye doizucheniye (otsenochmaya stadiya) gornogo massiva uchastka “Yeniseyskiy” dlya obosnovaniya rasshireniya intervala zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov do glubin 450–525 metrov (+5 – -70 m BS) ob'yektov okonchatel'noy izolyatsii radioaktivnykh otkhodov (Krasnoyarskiy kray, Nizhne-Kanskiy massiv)* [Additional geological study (evaluation stage) of the Yenisei Mountain range supporting the expansion of the radioactive waste disposal interval to depths of 450–525 meters (+5 – -70 m BS) of the final RW disposal facilities (Krasnoyarsk Territory, Nizhne-Kanskiy massif)]. 4 volumes. Report on contract No. 319/576-D of April 9, 2015. Karaulov V. A., Zablotsky K. A. et al. Krasnoyarsk, OJSC Krasnoyarskgeologiya Publ., 2015.

17. *Radiatsionno-ekologicheskaya bezopasnost' rabot, vpolnyayemykh na nachal'nom i konechnom etapakh yadernogo toplivnogo tsikla RF: Otchet po teme Prezidiuma RAN* [Radiation and environmental safety of operations performed at the initial and final stages of the nuclear fuel cycle in the Russian Federation: Report on the topic of the Presidium of the Russian Academy of Sciences]. Petrov V. A., Kochkin B. T., Tarasov N. N. et al. Moscow: IGEM RAS, 2016.

18. Gupalo V. S., Kazakov K. S., Minaev V. A., Ozerskiy D. A., Ustinov S. A., Nafigin I. O. Rezul'taty issledovaniy v sushchestvuyushchikh skvazhinakh na uchastke nedr “Yeniseyskiy”, v t. ch. dlya opredeleniya osnovnykh sistem treshchin i anizotropii [Results of studies in the existing wells of the Yeniseyskiy subsurface site including those performed to identify the main fracture systems and rock anisotropy]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2021, no. 1 (14), pp. 76–86. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-76-86.

19. *Analiz tektonicheskoy narushennosti territorii zony potentsial'nogo vliyaniya PGZRO i formirovaniye*

rekomentatsiy k planirovaniyu burovnykh rabot na dan-noy ploshchadi [Assessment of tectonic disturbances within the zone potentially influenced by the DGR and recommendations on further drilling plans in this area]. Report on the contract No. IBRAE-2020 of October 23, 2020 / Minaev V. A., Nafigin I. O., Ustinov S. A. Moscow, IGE M RAS Publ., 2021.

20. *Aktualizatsiya modeley geologicheskogo i strukturo-tektonicheskogo usloviy uchastka* [Updating the models of geological and structural-tectonic conditions of the site]. Report on the contract No. 1040-3 of May 18, 2022 / Minaev V. A., Poluektov V. V., Murashov K. Yu. Moscow, IGE M RAS Publ., 2023.

21. Petrov V. A., Poluektov V. V., Hammer J. R., Zulauf G. Issledovaniye mineral'nykh i deformatsionnykh preobrazovaniy gornyykh porod Nizhnekanskogo massiva i skladchatogo obramleniya v tselyakh opredeleniya ikh uderzhivayushchey sposobnosti pri geologicheskoy zakhoroneni i izolyatsii radioaktivnykh otkhodov [Study of mineral and deformation transformations of rocks within the Nizhnekanskiy massif and folded frame aimed at evaluating their containment capacity during the geological disposal and isolation of radioactive waste]. *Gornyy zhurnal – Mining Journal*, 2015, no. 10, pp. 67–77. DOI: 10.17580/gzh.2015.10.13.

22. *Sooruzheniye kartirovochno-nablyudatel'nykh skvazhin na litsenzionnom uchastke filiala “Zheleznogorskiy” FGUP “NO RAO” (ZATO Zheleznogorsk, Krasnoyarskiy kray)* [Construction of mapping and observation wells in the license area of the Zheleznogorsk branch of the Federal State Unitary Enterprise NO RAO (ZATO Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Krai)]. Technical report. Pushkareva O. V., Ozerskiy A. Yu., Karaulov V. A. et al. Krasnoyarsk, JSC Krasnoyarsk-geologiya Publ., 2023.

23. Morozov O. A. Razvedochnoye bureniye s otborom oriyentirovannogo kerna na uchastke “Yeniseyskiy”: pervyye rezul'taty [Exploratory Drilling with Oriented Core Sampling at the Yeniseisky Site, the First Results]. *Radioaktivnyye otkhody – Radioactive Waste*, 2024, no. 2 (27), pp. 69–79. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-2-69-79.

24. Deryabin S. A., Utkin S. S., Shevtsova E. V., Kazakov K. S., Kuzmin E. V., Barinov A. S., Demin A. V., Svitelman V. S., Ozerskiy D. A., Bamborin M. Yu. Analiz mezhdunarodnogo opyta tekhnologiy stroitel'stva ob'yektov podzemnoy izolyatsii RAO [Construction methods for underground RW disposal facilities: analysis of international experience]. *Radioaktivnyye otkhody – Radioactive Waste*, 2025, no. 1 (30), pp. 57–72. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-1-57-72.

Information about the authors

Minaev Vasily Alexandrovich, Ph.D., Head of Laboratory, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetny Lane, Moscow, 119017, Russia), e-mail: minaev2403@mail.ru.

Kochkin Boris Timofeevich, Doctor of Geology and Mineralogy, Chief Researcher, Institute of Ore Deposit Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences (35, Staromonetny Lane, Moscow, 119017, Russia), e-mail: btk@igem.ru; Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tuskaya St., Moscow, 115191, Russia).

Poluektov Valery Viktorovich, Senior Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetny Lane, Moscow, 119017, Russia), e-mail: vapol-52@mail.ru.

Petrov Vladislav Aleksandrovich, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Director, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetny Lane, Moscow, 119017, Russia), e-mail: vlad243@igem.ru.

Bibliographic description

Minaev V. A., Kochkin B. T., Poluektov V. V., Petrov V. A. Development of Concepts on the Geological Structure of the Near Field in a DGR. *Radioactive Waste*, 2025, no. 4 (33), pp. 94–104. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-4-94-104. (In Russian).