

ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ УЧАСТКА ЕНИСЕЙСКИЙ НА ТЕКУЩЕМ ЭТАПЕ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА ЗАХОРОНЕНИЯ

Б. Т. Кочкин

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 4 марта 2019 г.

В статье проведен анализ текущего состояния изученности опасных геологических процессов, явлений и факторов в районе и на участке Енисейский. Эта территория в Красноярском крае была выбрана для размещения первого в России объекта для захоронения высокорadioактивных отходов, в том числе содержащих долгоживущие радионуклиды. Анализ результатов выполненных работ показал, что степень изученности геологической среды на этом участке недостаточна для однозначной интерпретации данных о геологоструктурных, гидрогеологических и других условиях размещения будущего ПЗРО. Для их уточнения необходимо проведение дополнительных исследований главным образом в подземной исследовательской лаборатории, а также на поверхности.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, глубинное захоронение РАО, обоснование безопасности, геологические исследования.

Введение

Важность изучения геологической среды при захоронении РАО заключается в том, что она является составной частью мультибарьерной системы обеспечения безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО). Приоритетная роль геологической среды в обеспечении долгосрочной безопасности ПЗРО для РАО 1 и 2 классов зафиксирована в российских нормативных документах [1]. Проблемы изучения геологической среды обусловлены присутствием в ней веществ в разных фазах (твёрдой, жидкой и газообразной), высокой неоднородностью свойств этих фаз и сложностью строения по причине деления размеров линейных и блоковых структур на множество порядков (иерархичность). Процессы, протекающие в

этой среде, измеряются по своей длительности от секунд (землетрясения) до многих миллионов лет (тектогенез и метаморфизм).

ПЗРО на участке Енисейский является уникальным и первым для России объектом. Подземная исследовательская лаборатория (ПИЛ) на месте будущего ПЗРО создается для выполнения НИОКР в целях обоснования безопасной подземной изоляции РАО и апробации проектных решений [2]. По сути, это — научная мегаустановка, исследования на которой будут проводиться в течение полутора десятков лет (2025—2030 гг.). Создание ПИЛ — общемировая практика в процессе реализации проектов захоронения высокоактивных и долгоживущих РАО. Нет других способов для решения некоторых

важных вопросов обоснования безопасности. ПИЛ создаются в готовых шахтах или строятся специально как с целью изучения определенного типа геологической среды, так и для изучения среды непосредственно на месте будущего объекта [3]. Важно подчеркнуть, что ПИЛ и ПГЗРО не тождественны обычным шахтам, которые строятся с целью добычи полезных ископаемых. Строительство этих сооружений и работы в них регулируются федеральными законами и нормативными документами разных ведомств и касаются обращения с РАО, пользования недрами и строительства шахтных сооружений. Кроме того, не все работы регламентированы. Отсюда возможны противоречивые толкования содержания работ, если игнорировать иерархию действующих документов и цели сооружения ПИЛ. Цели и задачи строительства ПИЛ и ПГЗРО ставятся исходя из Закона 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами...» [4] и в соответствии с техническими регламентами, прежде всего «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности» [1] и «Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности...» [5] Ростехнадзора. Методом практического достижения целей, связанных с геологическим обеспечением безопасности захоронения, являются геологоразведочные работы, последовательность и содержание которых регулируются документами Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Минприроды России). Это, в первую очередь, «Методические рекомендации по обоснованию выбора участков недр для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых» [6] и «Правила подготовки проектной документации...» [7].

В настоящей статье дана общая характеристика опасных геологических процессов, явлений и факторов в районе и на участке Енисейский и направлений их дальнейшего изучения, исходя из требований нормативных документов и главенства обеспечения безопасности ПГЗРО, а также обозначены ближайшие задачи геологоразведочных работ.

История геологического изучения южной части Енисейского кряжа

Реализация проектов захоронения РАО подразделяется на этапы: размещения, сооружения, эксплуатации и закрытия пунктов захоронения [1, 4]. В рекомендациях МАГАТЭ имеется дробное деление этапа размещения (англ. — siting). Период размещения включает, кроме прочего, определение концепции размещения и оценку

площадки, состоящую из этапов выбора, проверки и подтверждения ее пригодности [8]. Этап выбора включает обзорное обследование обширной территории и последующее ее сокращение с более подробным исследованием альтернативных участков для обоснования предпочтительности выбора единственного кандидата для детального изучения [9]. Этим этапам в какой-то мере соответствуют стадии выполнения геологоразведочных работ: поисковая, оценочная и разведочная [6].

Исследования, направленные на размещение ПГЗРО в Красноярском крае, проводятся начиная с 1992 г. [10, 11, 12, 13, 2].

На начальной (обзорной) стадии работ в 1992—2001 гг. в южной части Енисейского кряжа были выполнены региональные исследования. До принятия Ростехнадзором российских критериев оценки геологической среды для размещения ПГЗРО в 2004 г. [14], ее пригодность могла оцениваться в соответствии с рекомендациями компетентных международных организаций (МАГАТЭ, например) [15, 16, 17 и др.]. Оценивались пригодность потенциальных вмещающих пород, гидрогеологические условия, тектоническая стабильность, особенно наличие разломных тектонических деформаций и перспективы обнаружения ценных полезных ископаемых, а также административное положение, особенности социальной структуры и другое. По комплексу этих критериев сначала из 20, а затем из 8 участков были отобраны два наиболее перспективных участка: первый — Верхнеитатский, второй — Енисейский. Участок Верхнеитатский, как оказалось, был разделен региональным разломом на обособленные блоки Итатский и Каменный [13]. Верхнеитатский участок изначально рассматривался в качестве приоритетного, а Енисейский — альтернативного. В дальнейшем единственным кандидатом на размещение ПГЗРО стал рассматриваться участок Енисейский. Оба участка отвечали действовавшим геологическим критериям, а решающую роль в выборе Енисейского участка сыграли социально-экономические критерии: его близость к инфраструктуре ГХК (4 км против 24 км у участков Итатский и Каменный) и расположение в пределах ЗАТО Железногорск [11].

Геологоразведочные работы в пределах участка Енисейский, выполнявшиеся с 2002 г., начались с комплексного геофизического изучения территории и проводились поэтапно, с последовательным сокращением площади и повышением детальности исследований. На первом этапе буровых работ (до 2005 г.) были пробурены три картировочные скважины (Е-1, Е-2, Е-3)

глубиной 100 метров и разведочная скважина (1-Е) глубиной 600 м с полным отбором керна. Были выполнены поинтервальные опытно-фильтрационные работы (ОФР) и комплекс геофизических исследований [18].

Из-за отсутствия соответствующих нормативных документов Минприроды России, которые появились в 2007 г. [6], изучение недр участка Енисейский с соблюдением современных регламентов началось только в 2009 году как поисковая стадия геологоразведочных работ. В 2010 году ОАО «Красноярскгеология» были пробурены 3 скважины (Р-1, Р-2, Р-3) глубиной по 700 м с проведением комплексных геологических, гидрогеологических и инженерно-геологических исследований. В 2010 г. результаты этих работ на участке Енисейском были впервые рассмотрены Федеральным агентством по недропользованию Российской Федерации (Роснедра). Участок Енисейский по своим геологическим, гидрогеологическим, тектоническим и сейсмическим условиям был признан перспективным для постановки на нем оценочных работ для целей обоснования его пригодности для захоронения радиоактивных отходов [13].

В 2011–2012 гг. ОАО «Красноярскгеология» выполнило следующую уже оценочную стадию геологоразведочных работ на участке. Главным методом выполнения этих работ стало бурение семи разведочных и четырех гидрогеологических скважин с полным комплексом геофизического каротажа и выполнением опытно-фильтрационных работ. С поверхности участок был изучен площадными геофизическими работами. Составлены геологические схемы коренных отложений для поверхности и для уровня целевого интервала. Роснедра (2012 г.) подтвердили пригодность участка Енисейский для глубинного захоронения радиоактивных отходов на основании его геологических, гидрогеологических, тектонических и сейсмических условий [2]. Одновременно Роснедрами были даны рекомендации устранить не решенные на оценочной стадии вопросы на последующей (разведочной) стадии работ. Часть этих рекомендаций была реализована уже при инженерно-геологических изысканиях для проектирования шахтного объекта как продолжение оценочной стадии работ (2013–2015 гг.). Работы по доизучению участка были предприняты для того, чтобы увеличить объем подземного хранилища РАО за счет расширения интервала их размещения с 25 до 75 м.

На этом этапе изучения было выполнено бурение скважин (2013 г.) на месте будущих стволов шахт ПИЛ (скважины Р-11, Р-12 и Р-13 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. В этих скважинах также был выполнен комплекс геофизических исследований и ОФР. В 2014 г. пройдена скважина ПР-1 глубиной 520 м для проведения специальных работ для уточнения гидрогеологической модели участка. В том же году были проведены дополнительные инженерно-геологические изыскания по площадкам наземных сооружений и автодорогам. Было пробурено 47 разведочных скважин глубиной до 45,0 м. Появление этих скважин картировочного характера не отразилось на детальности геологической карты участка, составленной в основном по геофизическим данным.

Всего при проведении геологоразведочных и инженерно-геологических работ было пробурено 14 глубоких (до 700 м) скважин (рис. 1), бурение которых производилось с полным отбором керна. В некоторых скважинах были отобраны редкие образцы ориентированного керна, позволившие определиться с залеганием пород вмещающей метаморфической толщи. Геофизические работы этого этапа включали в себя магнитную съемку и геофизические исследования скважин. В 2016 г. получено положительное экспертное заключение ГКЗ Роснедра о пригодности участка для строительства объекта захоронения РАО с расстоянием между горизонтами 75 м [2].

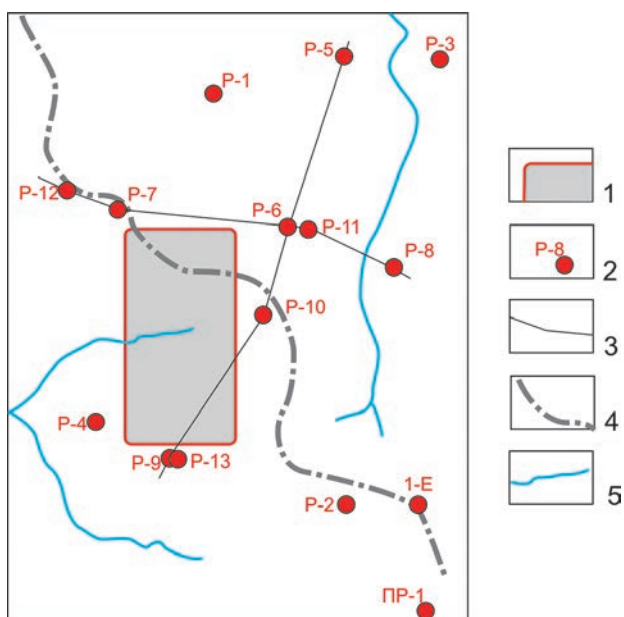


Рис. 1. Глубокие скважины на участке «Енисейский» (составлено по материалам ОАО «Красноярскгеология») 1 – контур зоны захоронения РАО в хранилище; 2 – скважины; 3 – схематические разрезы (рис. 2 и 3); 4 – главный водораздел; 5 – ручьи

Результаты геологоразведочных работ стали одним из оснований подготовки «Отчета по обоснованию безопасности... в составе подземной исследовательской лаборатории» (ООБ). В нем были приведены результаты моделирования процессов распространения загрязненных подземных вод из объекта через геологическую среду на долгосрочную перспективу. Были оценены дозовые нагрузки для населения, которые подтвердили соответствие будущего объекта нормативным документам России и международным рекомендациям [13].

После завершения в 2015 г. оценочных и инженерно-геологических работ, других геологоразведочных работ до начала 2019 г. на площади участка Енисейский не проводилось, что, с одной стороны, очевидно, приостановило продвижение проекта Енисейский, а с другой — дало возможность осмыслить его дальнейшее развитие. В этот период были проведены экспертизы проектных материалов и получены различные разрешительные документы Ростехнадзора (2016 г.), Роснедра (2016 г.), ФАУ «Главгосэкспертиза» (2016 г.) [2], разработан «Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения...» [1] и утверждена «Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов» [20]. Важным местом «Стратегии...» стало утверждение строительства ПИЛ и исследований в ней в качестве самостоятельного этапа в ходе реализации всего проекта создания ПГЗРО [2, 21].

Исходя из нормативных документов Минприроды России, строительство ПИЛ и проведение в ней экспериментов можно рассматривать как следующую (разведочную) стадию геологоразведочных работ. Формулировки этих документов [22 (п. 4.1.3), 6 (п. 4.4)] предоставляют широкие возможности для достижения целей обоснования безопасности захоронения РАО на участке Енисейский (намечено на 2029—2030 гг.) оптимальными для сложных геологических условий и разнообразными методами геологоразведочных работ, включая горнопроходческие. В настоящее время под методическим руководством ИБРАЭ РАН выполняются работы по корректировке проекта ПГЗРО под стадию ПИЛ и формулируются задачи, которые будут поставлены перед исполнителями геологоразведочных работ на поверхности и в процессе проходки подземных выработок, разрабатывается программа экспериментальных исследований в ПИЛ. Наличие ПИЛ обеспечит условия для выполнения исследований «...в целях уточнения характеристик массива пород и подземных вод в зоне захоронения РАО, важных для оценки долговременной

безопасности ПГЗРО в природных и лабораторных условиях...», как того требуют документы Ростехнадзора [5 (раздел 4.4, п. 190)].

Основные особенности, события и процессы геологической среды участка Енисейский

В соответствии с требованиями Ростехнадзора [5 (п. 3.1.1)], касающихся размещения ПГЗРО, необходимо получить информацию об опасных процессах, явлениях и факторах природного и техногенного происхождения в районе и на участке Енисейский.

По терминологии, принятой в международной практике, «опасные процессы, явления и факторы», именуемые как «особенности, события и процессы» (ОСП) Features, Events and Processes (FEPs) [23]. Опасность ОСП состоит в том, что они могут запустить негативные изменения в ПГЗРО и отрицательно воздействовать на его безопасность. В этой связи рекомендации российских и международных организаций по подготовке ООБ или его зарубежного аналога Досье безопасности (Safety Case) предусматривают обязательность процедуры выявления ОСП / FEPs, действительных для района (участка) захоронения [5, 24].

В ходе обзорных, поисковых и оценочных работ по выбору места получена обширная геологическая информация, касающаяся ОСП района и участка Енисейский. В общем виде перечень геологических ОСП, действительных для этого участка, рассмотрен в работе [25]. К сожалению, основная геологическая информация, полученная в ходе работ поисковой и оценочной стадий, по-прежнему находится в «серой зоне» отчетов ограниченного доступа. По этой причине фактические данные для анализа геологических ОСП в настоящей статье даны в ограниченном объеме.

Так, еще на этапе региональных изысканий [10] стало ясно, что в районе практически исключена вероятность особо сильных землетрясений (сейсмическая активность оценивается в 7 баллов по шкале MSK-64), вулканизма (отсутствует), размыва перекрывающей толщи пород (скорость вертикального поднятия земной поверхности за последние 5 млн лет не превышает одного метра за 10 тыс. лет), не ожидается обильного поступления подземных вод (вмещающие породы практически водоупорные, а их водонасыщенность низкая) и непреднамеренного проникновения человека (полезные ископаемые отсутствуют). Таким образом, для хранилища исключена подавляющая часть теоретически возможных путей эволюции, которые

могли бы привести к катастрофическим или высоко ущербным по своим последствиям сценариям [26]. В ходе последующих стадий геолого-разведочных работ изучались главным образом те ОСП, которые будут определять водную миграцию радионуклидов через геосферу. Именно водная миграция радионуклидов признается в качестве основного механизма переноса радионуклидов из подземного сооружения в биосферу, и именно этот механизм положен в основу математической модели геосферного транспорта для прогнозных расчетов доз и рисков для населения.

Положение участка Енисейский в региональной геологической структуре. Участок находится на стыке трех крупных геологических структур — Сибирской платформы на востоке, Западно-Сибирской плиты на западе и эпиплатформенной Алтае-Саянской орогенической зоны на юге. Район находится в юго-западной (Ангаро-Канской) части Енисейского кряжа, являющегося выступом на дневную поверхность очень древнего фундамента Сибирской платформы. По современным представлениям, Ангаро-Канская часть Енисейского кряжа представляет собой микроконтинент, присоединение которого к Сибирскому кратону произошло 650—550 млн лет назад в байкальскую эпоху [27]. Кряж и плита сочленяются по системе субмеридиональных взбросов и сопряженных с ними сдвигов северо-западного простирания. Амплитуда смещений поверхности докембрийского фундамента по ближайшему к участку Муратовскому взбросу оценивается величиной в 720 м [28].

Фундамент района представляет собой массив кристаллических пород различного состава. Если Верхнеитатский участок сложен гранитоидами Нижнеканского массива, то участок Енисейский сложен гнейсами. Гнейсы южной части Енисейского кряжа относятся к раннеархейскому гранулитовому комплексу, обрамляющему Нижнеканский гранитоидный массив. Данные о строении последнего и вмещающих его гнейсах [10] указывают на то, что все вместе они — это типичный гранитогнейсовый купол [26]. Такие геологические структуры длительно формируются в областях развития мощных осадочно-вулканогенных толщ под воздействием глубинных флюидов. В периферических частях гранитогнейсового массива преобладают метаморфические породы, тогда как гранитизированные и магматические породы тяготеют к центральным частям гранитогнейсовых куполов. В строении Нижнеканского кристаллического массива принимают участие магматические тела гранитоидов, мигматиты, в

различной степени гранитизированные гнейсы, гнейсы преимущественно гранитоидного состава, метабазиты, амфиболиты и диабазы. Наиболее древние нижнеархейские породы Ангаро-Канского микроконтинента были метаморфизованы в условиях гранулитовой фации 1,8—1,9 млрд лет назад, а возраст исходных осадочных пород предположительно еще более древний — 2,5—2,7 млрд лет [27]. Сложная многомиллиардная история формирования купола практически бесполезна в качестве источника информации для обоснования безопасности ПЗРО. Интерес представляют ОСП, относящиеся к последним миллионам лет. Именно за этот отрезок геологической истории произошли события и процессы, которые, возможно, повторятся в период потенциальной опасности захораниваемых РАО.

В районном масштабе участок Енисейский находится в центральной части относительно однородного в геологическом отношении блока (Байкало-Шумихинская площадь). Этот блок ограничен крупными разломами, но внутри него таковые отсутствуют [18]. Слабая тектоническая активность, умеренная сейсмичность и незначительные скорости вертикальных движений земной поверхности соответствуют основным нормативным критериям пригодности [1]. Этого, однако, недостаточно, чтобы дать достоверный прогноз безопасности ПЗРО на отдаленную перспективу. Имеющиеся данные [29, 30, 31, 32 и др.], позволяют отнести разломы района к активным на новейшем тектоническом этапе (начался ок. 26 млн лет назад). В настоящее время нет определенных сведений о распределении активных разломов в районе участка Енисейский. Всего в 1 км севернее намеченной площадки проходит крупнейший в регионе Итатский правый сдвиг (выявлен по данным анализа топоосновы), протягивающийся в северо-западном направлении от р. Большой Итат к р. Шумиха и вдоль нее. Установленные по смещениям водотоков амплитуды горизонтальных перемещений по разломам этой системы за плейстоцен (последние 2,5 млн лет) достигают 800—900 м или 0,4—0,5 мм в год [30].

Особенно важно, что остались невыясненными масштабы и интенсивность активизации конкретных разломов в области потенциального распространения радиоактивного загрязнения, их проницаемость и роль в формировании структуры потока подземных вод. По данным математического моделирования, эта область протягивается от площадки ПЗРО в сторону р. Енисей. Моделирование распространения радиоактивного загрязнения

с потоком подземных вод показало, что наличие гипотетического субширотного (т. е. протягивающегося в направлении фильтрации) высокопроницаемого разлома не приведет к существенному снижению надежности геологической среды и безопасности ПГЗРО только в том случае, если расстояние между разломом и ПГЗРО будет измеряться километрами [26]. В районе участка выявлены не только вертикальные, но и современные горизонтальные движения верхней части земной коры [33]. Все эти движения определяют напряженно-деформированное состояние породного массива и опасность деформаций горных выработок и подвижек блоков пород по трещинным системам.

Породы участка Енисейский. Фундамент участка сложен преимущественно прочными гнейсами, которые по физико-механическим свойствам в состоянии обеспечить техническую безопасность подземного сооружения, а также безопасность захоронения РАО на длительную перспективу [18]. В строении гнейсовой толщи участка выделяются две серии, граница между которыми условно проводится по исчезновению гиперстена и появлению кордиерита в породообразующих количествах [26]. Залегание гнейсов субгоризонтальное. Преобладающие углы падения гнейсовидной полосчатости 5—30°, достигающие до 40—60° в местах локальных тектонических дислокаций, например на контактах с дайками долеритов [18].

На участке Енисейский гнейсовая толща прорвана дайковыми комплексами как минимум двух генераций. К первому относится комплекс даек долеритов мощностью от первых до 40 метров. Более поздние дайки габбро-диабазов, трахидолеритов и лампрофиров являются секущими по отношению к дайковому комплексу первого этапа. Их мощность варьирует от десятков сантиметров до нескольких метров. Образование комплекса даек на территории площадки относят к рубежу позднего архея — раннего протерозоя, что отвечает времени завершения прогрессивного регионального метаморфизма. Кроме даек, кристаллические породы пронизаны прожилками кварцевого, карбонатно-кварцевого, карбонатного и реже иного состава. Местами в них имеется вкрапленность дисульфидов железа — пирита и халькопирита [18].

Все древние породы многократно подвергались поверхностному выветриванию. Время последней эпохи выветривания и возраст соответствующего пенемена определяют как датско-палеоценово-эоценовый, т. е. 15—20 млн лет [34, 35]. Возможно, он характеризует основную водораздельную поверхность выравнивания, на которой

расположена площадка ПГЗРО. Ее абсолютные отметки от +370 до +430 метров. Отметка уреза воды р. Енисей +120,6 м [18]. Сохранившаяся часть элювия коры выветривания имеет мощность 5—25 м. Кроме того, древние породы перекрыты чехлом четвертичных, преимущественно делювиальных, отложений мощностью до 30 м [18]. Наличие рыхлого элювиально-делювиального покрова является существенным препятствием для составления детальной карты коренных пород участка.

Длительное воздействие поверхностных факторов привело к формированию в древних породах приповерхностной зоны экзогенной дезинтеграции и трещиноватости. На отдельных участках она достигает 80 м. По геофизическим данным подошва зоны разуплотнения залегает на глубинах 20—50 м, редко — до 100 м от дневной поверхности [18]. До глубины 80—120 м, а в ряде случаев много глубже, в керне встречаются псевдоморфные гидроксиды железа. Они фиксируют приповерхностную зону окисления — продукт проникновения на глубину поверхностных вод, содержащих кислород и окисляющих дисульфиды железа [36].

Геолого-структурные условия. Имеющиеся данные документации керна и общие геологические соображения позволяют считать, что дайки долеритов круто падают в восточном направлении при субмеридиональном простирании, а более поздние занимают секущее к ним положение (рис. 2). В такой интерпретации дайки долеритов разбивают участок на ряд пластин различной мощности, которые вытянуты в субмеридиональном направлении. На рис. 2 показана также проекция зоны захоронения РАО в такой пластине. Из рис. 1 следует, что по проекту зона захоронения находится южнее разреза, приведенного на рис. 2.

На настоящем уровне изученности информация, полученная при документации керна скважин об элементах залегания пород, даек, зон деформаций и других нарушений сплошности среды размещения хранилища, допускает альтернативные варианты увязки разнообразных структур в объеме изученного блока. Эту неопределенность иллюстрирует рис. 3. Сотрудники ОАО «Красноярскгеология» объединили самые крупные дайки долеритов в синклинальную структуру, сотрудники ИГЕМ РАН показали, что возможно их объединение в антиклинальную структуру [37]. Неопределенности с увязкой мелких даек и разрывных нарушений еще значительней. Очевидно, что реальное положение даек и других структур на уровне размещения окажет существенное влияние

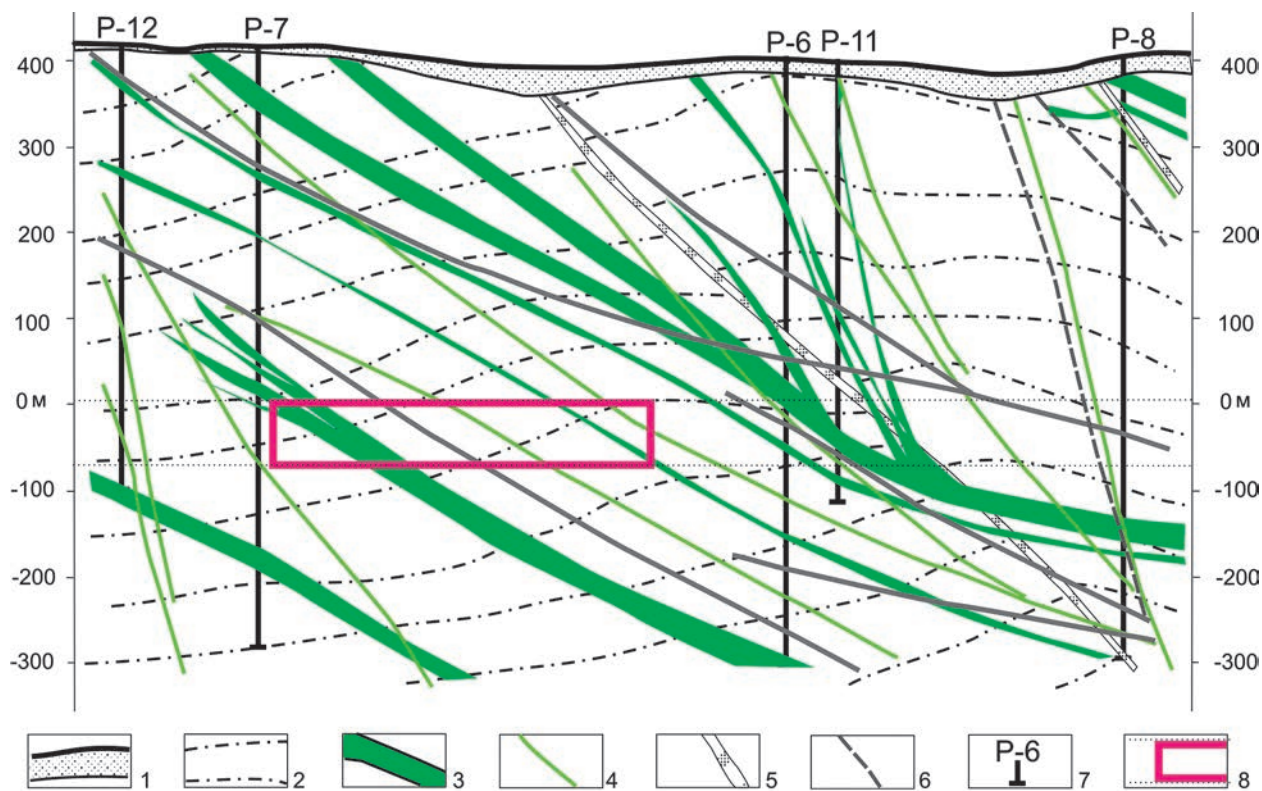


Рис. 2. Схематический субширотный разрез через скважины P-12, P-7, P-6, P-11 и P-8 (по данным ОАО «Красноярскгеология» с упрощениями и дополнениями):

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

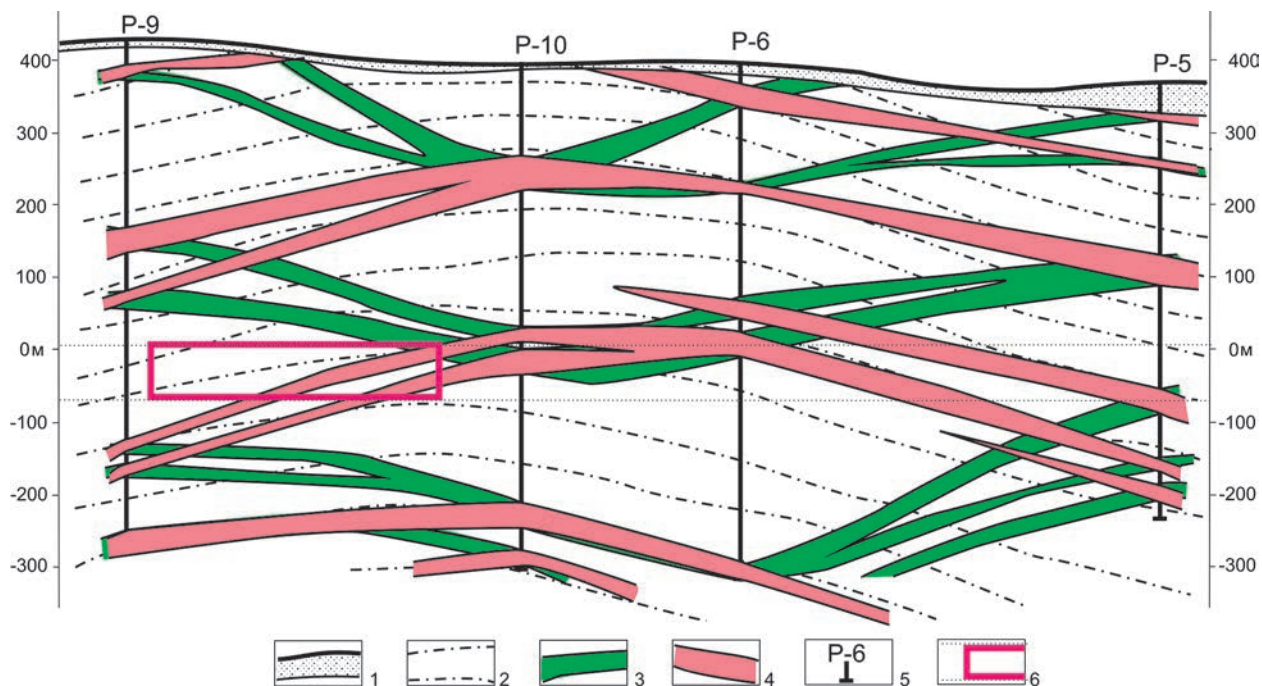


Рис. 3. Схематический разрез через скважины P-9, P-10, P-6 и P-5 с альтернативной увязкой даек долеритов в субмеридиональном направлении (по материалам ОАО «Красноярскгеология» с упрощениями и дополнениями):

- 1 – чехол рыхлых отложений; 2 – гнейсы; 3 – дайки долеритов согласно ОАО «Красноярскгеология»;
- 4 – дайки долеритов согласно ИГЕМ РАН; 5 – скважины и их номера; 6 – горизонт размещения и позиция зоны захоронения РАО (красный контур)

на окончательную привязку проекта размещения РАО. Особую роль в этом сыграют тектонические нарушения.

Разрывные нарушения тектонической природы, имеющиеся на участке, являются одним из важнейших факторов, влияющих на безопасность размещения РАО в геологической среде. Влияние этих ОСП скажется на размещении упаковок с РАО в массиве, т. е. на окончательную компоновку инженерных барьеров. По существующему проекту упаковки размещаются в строгом геометрическом порядке, с максимальным использованием подземного пространства. В реальности часть этого пространства будет занята тектонически нарушенными породами. В этих участках размещение упаковок исключается по двум возможным причинам: (1) тектонические подвижки по трещинам способны деформировать упаковки и (2) тектонически ослабленные зоны могут оказаться хорошими проводниками подземных вод, что будет способствовать деградации инженерных барьеров.

На сегодняшний день установлено, что внутри блока размещения развиты тектонические нарушения только высоких порядков, т. е. относительно мелкие. Они имеют разную природу, минеральное выполнение, проницаемость. Характеризуя состояние изученности тектонических нарушений пород участка Енисейский, можно констатировать следующее. Древние тектонические деформации, нередко сопровождавшиеся внедрением даек, залечены процессами, связанными с ультраметаморфизмом и гранитизацией. Наследующие их более поздние разрывы в виде зон брекчирования, дробления и трещиноватости часто залечены процессами регрессивного метаморфизма (диафтореза). Минеральное выполнение этой стадии разнообразно. Оно проявляется в виде прожилков карбоната, кварца, хлорита, эпидота, хлорита с кальцитом и выполнения ими цемента брекчий. Одновременно в породах присутствуют открытые трещины, связанные с новейшими тектоническими движениями и по этой причине не залеченные новообразованными минералами [26].

В связи с наличием разномасштабной трещиноватости в блоке размещения, на целевом уровне встает проблема установления интервалов ненарушенных (слабо нарушенных, монолитных) пород. Статистическое изучение разнопорядковой трещиноватости показало, что на фоне регулярной первичной трещиноватости (5-й порядок) неравномерное распределение имеют более протяженные зоны трещиноватости (4-й порядок) и наиболее крупные — зоны дробления (3-й порядок). Более крупные разломы (2-й и

1-й порядок) 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. Протяженность зон дробления и зон трещиноватости 10—100 м и 1—10 м соответственно. Мощность зон дробления более 2 м, а вертикальная периодичность в нижних частях изученного разреза порядка 50—100 м. Мощность зон трещиноватости обычно составляет 10—15 см и реже — более. Вертикальный интервал между ними непостоянен. Максимальная частотность приходится на интервал 1—2 м, минимальная — до 18 м локальными максимумами 5—6, 7—8 и 12—13 м. В целом авторы цитируемого доклада считают, что зоны трещиноватости и дробления распределены в массиве крайне неравномерно [38].

Структура фильтрационного потока в кристаллических породах определяется главным образом наличием разрывных нарушений. Они, как известно, в свою очередь отличаются своей мощностью, интенсивностью дробления, наличием минерального выполнения и раскрытием в зависимости от положения в поле напряжений. Это делает крайне сложной задачу изучения структуры среды фильтрации. Кроме того, решение задачи сопряжено с проблемой неопределенностей в интерпретации результатов ОФР. Общие представления о структуре потока, полученные гидрогеологическими методами, должны быть уточнены в ходе специальных экспериментов уже непосредственно в ПИЛ.

Особенностью *региональной гидродинамики* в гидрогеологическом массиве трещинных и трещинно-жильных вод является дифференциация фильтрационного потока между верхней сильно трещиноватой частью разреза мощностью до 150 м и нижележащей слабо трещиноватой частью разреза. В верхней части поток контролируется преимущественно топографическими особенностями местности. В нижней части в силу вступают и другие факторы, прежде всего региональная гидродинамика. Применительно к району ПГЗРО существование разделенных фильтрационных потоков подземных вод в массиве исключает короткие пути миграции радионуклидов к поверхности с горизонта размещения и их вынос в поверхностную гидросеть вблизи ПГЗРО. Для уточнения районной гидродинамики требуются дополнительные исследования распределения напоров в глубоких скважинах за пределами площадки ПГЗРО по пути к области разгрузки, которой считается р. Енисей [38, 39].

Методы изучения локальной гидродинамики недр участка Енисейский включали гидрогеологические исследования и ОФР в разведочных скважинах до глубины 700 м, геофизический каротаж, изучение проницаемости пород лабораторными методами в монолитах горных пород, отобранных из керна скважин и другое. Поинтервальные ОФР проводились приблизительно через каждые 50 м. Всего было выполнено 129 опытов, а после анализа и отбраковки результатов достоверными были признаны 125 определений коэффициента фильтрации [40, 41, 42].

Ниже зоны экзогенной дезинтеграции гнейсы и дайки (без учета тектонических трещин) являются практически водонепроницаемыми. Они способны пропускать через себя воду только под действием достаточно больших градиентов давлений. При этом небольшое количество гравитационной воды, способной к фильтрации, обнаруживается как в проницаемых, так в практически непроницаемых участках массива, находящихся ниже зоны аэрации.

Данные, характеризующие фильтрационные свойства монолитных нетрещиноватых пород, получены при лабораторных испытаниях образцов керна. Для них характерны коэффициенты фильтрации порядка $n \cdot 10^{-5}$ — $n \cdot 10^{-6}$ м/сут. Присутствие трещин выветривания, контактов долеритов и гнейсов или редких тектонических разрывов может дать коэффициенты фильтрации массива порядка $n \cdot 10^{-3}$ м/сут и выше [41]. Трещинно-жильный тип коллекторов имеет крайне ограниченное распространение, но его наличие в испытуемом интервале может поднять водопроницаемость выше $0,3 \text{ м}^2/\text{сут}$. ОФР показали, что хотя от поверхности участка до изученной глубины 700 м преобладают водонепроницаемые породы со средним коэффициентом фильтрации около $0,0007 \text{ м}/\text{сут}$, средней водопроницаемостью $0,002 \text{ м}^2/\text{сут}$ и водоотдачей от $0,02\%$ до $0,4\%$, изученный участок недр не может рассматриваться как классический гидрогеологический массив, имеющий гидравлически единую систему трещиноватости. Об этом говорят разнонаправленные изменения уровней, достигающие десятков метров [40, 42]. Разная направленность вертикальных напорных градиентов для смежных интервалов показывает отсутствие единого направления миграции подземных вод. Наличие интервалов, имеющих более низкие отметки уровней по сравнению с вышележающими интервалами, однозначно указывает на преобладание горизонтального перемещения над вертикальным. Нет явных закономерностей между уровнем воды и

проницаемостью в испытуемых интервалах. Это указывает на сложный, многофакторный характер движения подземных вод, который не может быть описан единой формальной моделью, содержащей стандартный набор фильтрационных и миграционных параметров [41].

Совокупность геологических и гидрогеологических данных показывает, что единый непрерывный поток подземных вод в недрах массива, по-видимому, отсутствует. Сравнение положения разрывных нарушений разных порядков и данных ОФР показало, что прямого соответствия между наличием в кернах разрывных нарушений и фильтрационными параметрами нет [36]. Низкую чувствительность ОФР к зонам трещиноватости объясняют слабой гидравлической взаимосвязью этих зон [38]. Инфильтрационные воды, поступающие на глубинный интервал по относительно раскрытой трещинной системе, перераспределяются в соседние трещинные системы через монолитные породы. По мнению специалистов, проводивших исследования гидрогеологических условий на участке Енисейский, использованные методы не дали возможности выявить действительные направления движения подземных вод в трехмерном пространстве массива [40]. Значимость этой неопределенности для оценки безопасности необходимо определить до начала строительства ПИЛ, поскольку после начала проходки стволов, которая будет сопровождаться осушением прилегающих пород, гидрогеологические условия в массиве необратимо изменятся. В целом результаты ОФР говорят об отсутствии гидравлической связи предполагаемого уровня размещения РАО с дневной поверхностью. Однако такая связь может проявиться по какой-либо отдельной системе трещин в процессе эксплуатации подземного сооружения, поэтому в ходе строительства и экспериментов в ПИЛ следует выявить и изучить каждую значимую трещинную систему в отношении такой связи. Гидроксиды железа, обнаруженные в некоторых трещинах на больших глубинах, как раз свидетельствуют о такой возможности.

Обсуждение данных

Анализ доступных материалов по геологической изученности массива выявил наличие существенных пробелов в информации о соответствующих ОСП, важных для обоснования безопасности будущего ПЗРО. По некоторым ОСП информация просто отсутствует, например по микрофлоре и по коллоидам в подземной гидросфере.

Неопределенности в интерпретацию геологической информации привнесит редкая сеть глубоких скважин. Все глубокие скважины пройдены за пределами блока размещения (см. рис. 1). Это напрямую связано с необходимостью технически не нарушать существующую минимальную гидравлическую связь горизонта размещения с поверхностью [1]. Детализация внутренней структуры блока размещения будет возможна при изучении вертикальных и горизонтальных выработок ПИЛ, а также путем бурения исследовательских скважин изнутри ПИЛ.

Другая причина структурных неопределенностей — отсутствие ориентированного керна в имеющихся скважинах. По этой причине возможны различные варианты интерпретации внутреннего строения зоны захоронения в ПГЗРО. Специальные работы в ПИЛ позволят минимизировать и эти неопределенности.

Отсутствие достоверной геологической карты поверхности масштаба 1:2000 затрудняет построение объемной геолого-структурной модели участка размещения объекта. Учитывая значительную мощность рыхлых отложений, достоверно установить положение даек и разрывных нарушений на поверхности поможет бурение неглубоких картировочных скважин.

Неопределенности в интерпретации гидрогеологической информации связаны с неравномерной и низкой в целом обводненностью горных пород, сложной структурой среды фильтрации, состоящей из пор и трещин разного масштаба, с методологическими недостатками выполненных гидрогеологических исследований.

Устранение всех указанных неопределенностей — задача разведочной стадии геологоразведочных работ.

Цели, стоящие перед работами разведочной стадии, прямо определяются требованием НП-100-17 [5 (раздел 4.4, п. 190)] — уточнить характеристики ОСП массива пород и подземных вод в зоне захоронения РАО. Рабочим инструментом должна стать постоянно действующая цифровая объемная модель распределения горных пород, каркаса трещинной сети и ее обводненности.

Создание качественной геолого-гидрогеологической основы позволит решить следующие основные задачи:

- уже на первых этапах горнопроходческих работ — обосновать места заложения специализированных выработок и скважин для проведения будущих экспериментов *in situ*;
- привязать проект выработок и скважин размещения упаковок с РАО в ПГЗРО к участкам, находящимся вне зон, опасных в отношении

структурных, гидрогеологических и инженерно-геологических условий;

- получить фактические данные для решения вопросов моделирования транспорта радионуклидов из подземного объекта в дальнее поле и биосферу.

Начиная с этапа строительства ПИЛ недопустима потеря любого вида информации, необходимой для достоверного обоснования безопасности будущего ПГЗРО [5]. Успешное достижение целей геологических исследований потребует создания определенных организационных и технических условий и, соответственно, дополнительных финансовых расходов в сравнении со строительством обычной шахты для добычи руд.

- На месте строительства должна быть сформирована команда квалифицированных специалистов, вооруженная современным оборудованием.
- Выполнение наблюдений должно начинаться одновременно с началом проходки выработок без существенных перерывов в наблюдениях.
- Документированию и опробованию подлежат все выработки в непрерывном режиме.
- Поверхность выработок на время документирования должна быть свободна от крепи любого типа.
- В процессе проходки выработок должны быть предусмотрены достаточные технологические перерывы для доступа исследователей к забою.

Выводы

1. На этапе исследований в ПИЛ наибольший интерес представляют геологические ОСП, относящиеся к последним миллионам лет геологической истории района. Именно в этот период протекали процессы и совершались события, которые, возможно, проявятся в период потенциальной опасности захораниваемых РАО. Важнейшие из них относятся к формированию активных разрывных структур и водопроницаемых трещинных систем в массиве вмещающих пород.

2. В настоящее время нет определенных сведений о распределении активных разломов и их водопроницаемости в районе участка Енисейский. Особенно важно, что остались невыясненными масштабы и интенсивность активизации конкретных разломов в области потенциального распространения радиоактивного загрязнения, их проницаемость и роль в формировании структуры регионального потока подземных вод. Достоверность активных разломов, выделенных на сегодня преимущественно

геоморфологическими методами, предстоит проверить геодезическими наблюдениями. Для этого потребуются выполнение специальных исследований для идентификации и определения положения сейсмогенных и асейсмичных активных разломов в окрестностях участка Енисейский. Для уточнения районной гидродинамики требуются дополнительные исследования распределения напоров в глубоких скважинах за пределами площадки ПЗРО по пути к области вероятной разгрузки.

3. Очевидно, что реальное положение геологических структур на уровне размещения сооружения окажет существенное влияние на окончательную привязку (компоновку) проекта расположения выработок для захоронения РАО. Особую роль в этом сыграют активные или/и водопроницаемые тектонические нарушения. Их выявление — важная задача в процессе строительства и проведения экспериментов в ПИЛ.

4. Результаты гидрогеологических исследований в целом говорят об отсутствии прямой гидравлической связи предполагаемого уровня размещения РАО с дневной поверхностью. Однако такая связь может проявиться по какой-либо отдельной системе трещин, поэтому в ходе строительства и экспериментов в ПИЛ следует выявить и изучить каждую значимую трещинную систему в отношении такой связи.

Благодарность

Автор выражает благодарность сотрудникам ИБРАЭ РАН А. С. Баринову и С. А. Богатову за ценные замечания, сделанные в процессе подготовки статьи.

Работа выполнена при частичном финансировании по госзаданию ИГЕМ РАН (тема НИР 0136-2018-0018).

Литература

1. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности. НП-055-14. М.: Ростехнадзор, 2014, 29 с.
2. *Абрамов А. А., Бейгул В. П.* Создание подземной исследовательской лаборатории на участке «Енисейский» Нижнеканского массива: состояние и дальнейшее развитие работ. — URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2017/08/22/78690>.
3. Underground research laboratories (URL). NEA/RWM/R (2013)2 // OECD/NEA, No. 78122. 2013. 54 p.
4. Федеральный закон Российской Федерации от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении

изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

5. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов. НП-100-17. — М.: Ростехнадзор, 2017. 122 с.

6. Методические рекомендации по обоснованию выбора участков недр для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых. — М.: ФБУ «ГКЗ», 2007, 36 с.

7. Правила подготовки проектной документации на проведение геологического изучения недр и разведки месторождений полезных ископаемых по видам полезных ископаемых. Утверждено приказом Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 14 июня 2016 г. № 352.

8. Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности, № SSR-5. — Вена: МАГАТЭ, 2007. 104 с.

9. Siting of Geological Disposal Facilities. A Safety Guide. Safety series. No 111-G-4.1. — VIENNA: IAEA, 1994. 24 p.

10. Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО // Материалы КНТС. — Железногорск, 16—20 марта 1998 г. — СПб.: ГХК, НПО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», 1999. С. 14—23.

11. *Кудрявцев Е. Г., Гусаков-Станюкович И. В., Камнев Е. Н., Лобанов Н. Ф., Бейгул В. П.* Федеральный объект подземного захоронения отвержденных радиоактивных отходов в России: практические шаги к созданию // Безопасность окружающей среды, 2008. № 4. С. 106—112.

12. *Порсов А. Ю., Бейгул В. П., Паленов М. В.* Создание подземной исследовательской лаборатории в Красноярском крае // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2013. № 1 (29). С. 14—21.

13. *Лобанов Н. Ф., Бейгул В. П., Лопатин П. В., Озерский А. Ю.* Выбор расположения и обоснование пригодности участка для создания подземной исследовательской лаборатории на Нижнеканском массиве горных пород // Горный журнал. 2015. № 10. С. 59—64.

14. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности. НП-055-04. — М.: Ростехнадзор, 2004. 21 с.

15. Site selection factors for repositories of solid high-level and alpha-bearing wastes in geologic formations // Technical Report Series № 177. — Vienna: IAEA, 1977. 64 p.

16. Подземное захоронение радиоактивных отходов. Основное руководство. Серия изданий по безопасности № 54. — Вена: МАГАТЭ, 1981. 45 с.

17. Принципы безопасности и технические критерии для подземного захоронения радиоактивных

- отходов высокого уровня активности. Серия изданий по безопасности № 99. — Вена: МАГАТЭ, 1990. 32 с.
18. Материалы обоснования лицензии на размещение и сооружение не относящегося к ядерным установкам пункта хранения РАО, создаваемого в соответствии с проектной документацией на строительство объектов окончательной изоляции РАО (Красноярский край, Нижнеканский массив) в составе подземной исследовательской лаборатории (включая материалы оценки воздействия на окружающую среду). В 4-х т. — М.: ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами», 2015. — URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/>.
19. Дорощев А. Я., Большов Л. А., Линге И. И., Уткин С. С., Савельева Е. А. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 33—42.
20. Стратегия создания пункта глубинного захоронения РАО / М.: Госкорпорация «Росатом», 2018 // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 114—120.
21. Крюков О. В. Краткий комментарий к утверждению «Стратегии создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов» // Радиоактивные отходы. № 2 (3), 2018. С. 16—17.
22. Положение о порядке проведения геологоразведочных работ по этапам и стадиям (твердые полезные ископаемые): утв. распоряжением Минприроды России № 83-р от 5 июля 1999 г.
23. Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste. An International Database. Paris: OECD-NEA, 2000.
24. Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Outcomes of the NEA MeSA Initiative. Paris: OECD/NEA Publishing, 2012. 242 p.
25. Кочкин Б. Т. Принцип консерватизма в оценке безопасности могильников высокорadioактивных отходов // Геоэкология, 2012. № 5. С. 436—448.
26. Кочкин Б. Т., Мальковский В. И., Юдинцев С. В. Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект). — М.: ИГЕМ РАН, 2017. 384 с.
27. Ножкин А. Д. Докембрий юго-западной окраины Сибирского кратона // Изв. Томского политехнического университета. 2009. Т. 314. № 1. С. 5—16.
28. Андерсон Е. Б., Савоненков В. Г., Любцева Е. Ф. и др. Результаты поисковых и научно-исследовательских работ по выбору площадок для подземной изоляции ВАО и ОЯТ на Нижнеканском массиве гранитоидов (Южно-Енисейский кряж) // Труды Радиового института им. В. Г. Хлопина. Т. XI. 2006. С. 8—64.
29. Лукина Н. В. Активные разломы зоны сочленения Сибирской платформы и Алтае-Саянской орогенической области // Бюллетень московского общества испытателей природы. Отд. Геологическое. 1996. Т. 71. Вып. 5. С. 25—32.
30. Лобацкая Р. М. Неотектоническая разломно-блоковая структура зоны сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 12. С. 141—150.
31. Морозов В. Н., Колесников И. Ю., Белов С. В., Татаринов В. Н. Напряженно-деформированное состояние Нижнеканского гранитоидного массива района возможного захоронения радиоактивных отходов // Геоэкология. 2008. № 3. С. 232—243.
32. Несмеянов С. А., Воейкова О. А. Активные разрывы в зоне сочленения юга Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты и их значимость для строительства // Геоэкология. 2008. № 3. С. 197—213.
33. Морозов В. Н., Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И. Подземная исследовательская лаборатория: геодинамические и сейсмотектонические аспекты безопасности // Радиоактивные отходы. 2018. № 3 (4). С. 16—29.
34. Миляева Л. С. Возраст исходной поверхности выравнивания горного пояса Сибири // В кн.: Поверхности выравнивания гор Сибири. — Новосибирск: Наука, 1971. С. 50—60.
35. Коржуев С. С. Морфотектоника и рельеф земной поверхности (на примере происхождения и возраста рельефа Восточной Сибири). — М.: Наука, 1974. 530 с.
36. Подготовка материалов в рамках разработки основных положений по обоснованию долгосрочной безопасности ПГЗРО, создаваемого на участке «Енисейский» в Нижнеканском кристаллическом массиве: Технический отчет. / Жариков В. А., Кочкин Б. Т., Крупская В. В., Мальковский В. И., Тарасов Н. Н., Юдинцев С. В. — М.: ИГЕМ РАН, 2014.
37. 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.
38. Румынин В. Г., Никуленков А. М.; Озерский А. Ю., Караулов В. А. Лопатин П. В., Богатов С. А. Макро-, мезо- и микроструктурные уровни изучения водо- и массообменных процессов в массиве трещиноватых пород (в связи с прогнозом миграции радионуклидов в зоне воздействия ПГЗРО в Нижнеканском гранитоидном массиве) // Материалы междунар.

научно-практич. конф. «Философия обращения с радиоактивными отходами: плюсы и минусы существующих технологий». — М.: ООО «Винпресс», 2016. С. 157—172.

39. Румынин В. Г. Опыт изучения глинистых толщ и кристаллических массивов как геологических сред для окончательной изоляции РАО // Радиоактивные отходы. № 1. 2017. С. 43—54.

40. Озерский А. Ю. Особенности фильтрации подземных вод в массиве кристаллических пород в южной части Енисейского кряжа // Комплексные проблемы гидрогеологии: тез. докл. науч. конф. — Санкт-Петербург, Россия, 23—25 октября 2013 г. — СПб.: Санкт-Петербургский гос. ун-т, 2013. С. 110—113.

41. Озерский А. Ю., Караулов В. А. Формирование подземных вод в практически водонепроницаемых породах южной части Енисейского кряжа // М-лы XXI Сессии по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. — г. Якутск, 22—28 июня 2015 г. — Якутск, 2015. С. 307—311.

42. Озерский А. Ю., Караулов В. А. Гидрогеологическая структура водонепроницаемых кристаллических пород в южной части Енисейского кряжа // В сб.: Современные проблемы геохимии, геологии и поисков месторождений полезных ископаемых. М-лы межд. научной конф., посвящённой 110-летию со дня рождения академика Константина Игнатьевича Лукашёва (1907—1987). — Минск, 2017. С. 53—56.

Информация об авторах

Кочкин Борис Тимофеевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., 35), e-mail: btk@igem.ru.

Библиографическое описание статьи

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.

INVESTIGATING THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT AT THE YENISEISKY SITE: TASKS FOR THE CURRENT STAGE OF THE DISPOSAL PROJECT

Kochkin B. T.

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of RAS, Moscow, Russia
Nuclear Safety Institute of RAS, Moscow, Russia

Article received 4 March 2019

The article analyzes the current exploration level of hazardous geological features, events and processes in the area and on the Yeniseisky site. This territory in the Krasnoyarsk Krai was selected to host the first Russian repository for HLW, including those containing long-lived radionuclides. Analysis of the results of the work performed has shown that the level of exploration of the geological environment in this area is insufficient for unambiguous interpretation of data on the geological, structural, hydrogeological and other conditions of the location of the future facility. To clarify them, it is necessary to conduct additional research, mainly in the underground research laboratory, as well as on the surface.

Key words: radioactive waste, geological repository, safety assessment.

Acknowledgements

The author expresses gratitude to the staff of IBRAE RAS A. S. Barinov and S. A. Bogatov for valuable comments made during the preparation of the article.

The work was carried out with partial funding for the state assignment of Igem RAS (research topic 0136-2018-0018).

References

1. *Zahoronenie radioaktivnykh othodov. Principy, kriterii i osnovnye trebovaniya bezopasnosti. NP-055-14.* [Disposal of radioactive waste. Principles, criteria and main safety requirements. NP-055-14]. Moscow, Rostekhnadzor, 2014, 29 pp.
2. Abramov A. A., Bejgul V. P. *Sozdanie podzemnoj issledovatel'skoj laboratorii na uchastke "Enisejskij"*

- Nizhnekanskogo massiva: sostoyanie i dal'nejshee razvitie rabot* [Establishment of an underground research laboratory at “Yeniseysky” site in Nizhnekansk massif: current state and future works] // Available at: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2017/08/22/78690>.
3. Underground research laboratories (URL). NEA/RWM/R (2013)2 // OECD/NEA, No. 78122. 2013. 54 pp.
4. *Federal'nyj zakon Rossijskoj Federacii ot 11 iyulya 2011 g. № 190-FZ «Ob obrashchenii s radioaktivnymi othodami i o vnesenii izmenenij v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii»* [Federal Law of July 11, 2011 No 190-FZ “On Management of Radioactive Waste and Amendment of some acts of Law of the Russian Federation”].
5. *Trebvaniya k sostavu i sodержaniyu otcheta po obosnovaniyu bezopasnosti punktov zahoroneniya radioaktivnyh othodov. NP-100-17* [Requirements to the content of safety justification report for radioactive waste disposal facilities. NP-100-17]. Moscow, Rostekhnadzor, 2017. 122 p.
6. *Metodicheskie rekomendacii po obosnovaniyu vybora uchastkov neдр dlya celej, ne svyazannyh s dobychej poleznyh iskopaemyh.* [Methodical recommendations subsoil site selection for purposes not connected to mining of natural resources]. Moscow, GKZ, 2007, 36 p.
7. *Pravila podgotovki proektnoj dokumentacii na provedenie geologicheskogo izucheniya neдр i razvedki mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh po vidam poleznyh iskopaemyh. Utverzhdeno prikazom Ministerstva prirodnyh resursov i ekologii RF ot 14 iyunya 2016 g. № 352* [Rules for preparing design documentation on geological study of subsoil and investigation of mineral resource deposits for types of mineral resources. Approved by the order of the Ministry of natural resources and environment of the Russian Federation of 14 June 2016, no. 352].
8. *Zahoronenie radioaktivnyh othodov. Konkretnye trebovaniya bezopasnosti* [Disposal of radioactive waste. Specific safety requirements] № SSR-5. Vienna: IAEA, 2007, 104 p.
9. *Siting of Geological Disposal Facilities. A Safety Guide. Safety series. No 111-G-4.1. VIENNA: IAEA, 1994. 24 p.*
10. *Issledovaniya granitoidov Nizhnekanskogo massiva dlya zahoroneniya RAO. Materialy KNTS. g. Zheleznogorsk, 16–20 marta 1998 g. SPb.: GHK, NPO «Radiyevyj institut im. V. G. Hlopina».* [Study of granitoids of Nizhnekansk range for RW disposal. Materials of KNTS. Zheleznogorsk, March 16–20 of 1998. St-Petersburg, MCC, SPA “Khlopin Radium Institute”]. 1999. Pp. 14–23.
11. Kudryavcev E. G., Gusakov-Stanyukovich N. V., Kamnev E. N., Lobanov N. F., Bejgul V. P. *Federal'nyj ob'ekt podzemnogo zahoroneniya otverzhdennyh radioaktivnyh othodov v Rossii: prakticheskie shagi k sozdaniyu* [Federal site for underground disposal of solidified radioactive waste in Russia: practical steps to establishment]. *Bezopasnost' okruzhayushchej sredy — Environmental safety*, 2008, no. 4, pp. 106–112.
12. Porsov A. Yu., Bejgul V. P., Palenov M. V. *Sozdanie podzemnoj issledovatel'skoj laboratorii v Krasnoyarskom krae* [Establishment of underground research laboratory in Krasnoyarsk Krai]. *Bezopasnost' yadernyh tekhnologij i okruzhayushchej sredy — Safety of nuclear technology and environment*, 2013, no. 1 (29), pp. 14–21.
13. Lobanov N. F., Bejgul V. P., Lopatin P. V., Ozerskij A. Yu. *Vybor raspolozheniya i obosnovanie prigodnosti uchastka dlya sozdaniya podzemnoj issledovatel'skoj laboratorii na Nizhnekanskom massive gornyh porod* [Site selection and justification for siting for underground research laboratory in Nizhnekansk rock massif] // *Gornyj zhurnal — Mining journal*, 2015, no. 10, pp. 59–64.
14. *Zahoronenie radioaktivnyh othodov. Principy, kriterii i osnovnye trebovaniya bezopasnosti. NP-055-04* [Disposal of radioactive waste. Principles, criteria and main safety requirements. NP-055-04]. Moscow, Rostekhnadzor, 2004. 21 p.
15. *Site selection factors for repositories of solid high-level and alpha-bearing wastes in geologic formations. Technical Report Series № 177. Vienna: IAEA, 1977. 64 p.*
16. *Podzemnoe zahoronenie radioaktivnyh othodov. Osnovnoe rukovodstvo. Seriya izdanij po bezopasnosti № 54.* [Underground disposal of radioactive waste. Basic guidance. Safety Series No. 54]. Vienna: IAEA, 1981. 45 p.
17. *Principy bezopasnosti i tekhnicheskie kriterii dlya podzemnogo zahoroneniya radioaktivnyh othodov vysokogo urovnya aktivnosti. Seriya izdanij po bezopasnosti № 99.* [Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Waste. Safety Series No. 99]. Vienna: IAEA, 1990. 32 p.
18. *Materialy obosnovaniya licenzii na razmeshchenie i sooruzhenie ne odnosyashchegosya k yadernym ustanovkam punkta hraneniya RAO, sozdavaemogo v sootvetstvii s proektnoj dokumentaciej na stroitel'stvo ob'ektov okonchatel'noj izolyacii RAO (Krasnoyarskij kraj, Nizhne-Kanskij massiv) v sostave podzemnoj issledovatel'skoj laboratorii (vkl'yuchaya materialy ocenki vozdejstviya na okruzhayushchuyu sredu). V 4-h t.* [Materials for justification of license application for siting and construction of non-nuclear installations of a RW storage facility developed in accordance with the design documents for construction of a RW final isolation facility (Krasnoyarsk Krai, Nizhnekansk Range) as a part of underground research laboratory” (including environmental impact

- assessment materials). In 4 vol. M.: FSUE National operator for radioactive waste management, 2015. Available at: <http://www.norao.ru/ecology/mol/>.
19. Dorofeev A.N., Bolshov L. A., Linge I. I., Utkin S. S., Saveleva E. A. Strategicheskij master-plan issledovanij v obosnovanie bezopasnosti sooruzheniya, eksploatacii i zakrytiya punkta glubinnogo zahoroneniya radioaktivnyh othodov. [Strategic Master Plan for R&D Demonstrating the Safety of Construction, Operation and Closure of a Deep Geological Disposal Facility for Radioactive Waste]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste*, 2017, no. 1, pp. 33–42.
20. Strategiya sozdaniya punkta glubinnogo zahoroneniya RAO. M.: Goskorporaciya «Rosatom» [Strategy for establishment of a deep radioactive waste disposal facility. State Corporation "Rosatom"]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 114–121.
21. Kryukov O. V. Kratkij kommentarij k utverzhdeniyu «Strategii sozdaniya punkta glubinnogo zahoroneniya radioaktivnyh othodov» [Brief commentary to the approval of "Strategy for establishment of a deep radioactive waste disposal facility"]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 16–17.
22. *Polozhenie o poryadke provedeniya geologorazvedochnyh rabot po etapam i stadiyam (tverdye poleznye iskopaemye)*. MPR RF № 83-r. [Regulation on the procedure of geologic survey works, including steps and stages (solid minerals). Ministry of Natural Resources of the Russian Federation No. 83-r]. 1999.
23. Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste. An International Database. Paris: OECD-NEA, 2000.
24. Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Outcomes of the NEA MeSA Initiative. Paris: OECD/NEA Publishing, 2012. 242 p.
25. Kochkin B. T. Princip konservatizma v ocenke bezopasnosti mogil'nikov vysokoradioaktivnyh othodov. [Conservatism Principle for the Safety Assessment of the High-Level Radioactive Waste Repository] // *Geoekologiya — Geoecology*, 2012, no 5, pp. 436–448.
26. B. T. Kochkin, V. I. Malkovskiy, S. V. Yudinsev. *Nauchnye osnovy ocenki bezopasnosti geologicheskoy izolyacii dolgozhivushchih radioaktivnyh othodov (Enisejskij projekt)*. [Scientific basis for the safety assessment of long-lived radioactive waste geological disposal (the Eniseyskiy project)]. Moscow: IGEM RAS, 2017. 384 p.
27. Nozhkin A. D. Dokembrij yugo-zapadnoj okrainy Sibirskogo kratona [Pre-Cambrian of the South-West margin of Siberian craton]. *Izv. Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 1, pp. 5–16.
28. Anderson E. B., Savonenkov V. G., Lyubceva E. F. i dr. Rezul'taty poiskovyh i nauchno-issledovatel'skih rabot po vyboru ploschadok dlya podzemnoj izolyacii VAO i OYAT na Nizhnekanskom massive granitoidov (Yuzhno-Enisejskij kryazh). [Results of survey and research works on site selection for underground disposal of HLW and SNF in Nizhnekansk granitoid massif (South Yenisey Ridge)]. *Trudy Radievogo instituta im. V. G. Hlopina — Works of V. G. Khlopin Radium Institute*, 2006, vol. XI, pp. 8–64.
29. Lukina N. V. Aktivnye razlomy zony sochleneniya Sibirskoj platformy i Altae-Sayanskoj orogenicheskoy oblasti [Active ruptures of the conjunction zone of the Siberian Platform and Altay-Sayany orogenic area]. *Byulleten' moskovskogo obshchestva ispytatelej prirody. Otd. Geologicheskoe — Bulletin of the Moscow society of naturalists. Geological section*, 1996, vol. 71, no. 5, pp. 25–32.
30. Lobackaya R. M. Neotektonicheskaya razlomno-blokovaya struktura zony sochleneniya Sibirskoj platformy i Zapadno-Sibirskoj plity [Neotectonic rupture-block structure of the conjunction zone of Siberian Platform and West Siberian Plate]. *Geologiya i geofizika — Geology and Geophysics*, 2005, vol. 46, no. 12, pp. 141–150.
31. Morozov V. N., Kolesnikov I. Yu., Belov S. V., Tatarinov V. N. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie Nizhnekanskogo granitoidnogo massiva — rajona vozmozhnogo zahoroneniya radioaktivnyh othodov [Stress-deformed state of Nizhnekansk granitoid massif — the region for location of a potential radioactive waste disposal facility site]. *Geoekologiya — Geoecology*, 2008, no. 3, pp. 232–243.
32. Nesmeyanov S. A., Voejkova O. A. Aktivnye razryvy v zone sochleneniya yuga Sibirskoj platformy i Zapadno-Sibirskoj plity i ih znachimost' dlya stroitel'stva [Active ruptures in the conjunction zone of the south of Siberian Platform and West Siberian Plate and their importance for construction]. *Geoekologiya — Geoecology*, 2008, no. 3, pp. 197–213.
33. Morozov V. N., Tatarinov V. N., Kaftan V. I., Manevich A. I. Podzemnaya issledovatel'skaya laboratoriya: geodinamicheskie i sejsmotektonicheskie aspekty bezopasnosti [Underground Research Laboratory: Geodynamic and Seismotectonics Aspects of Safety]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste*, 2018, no. 3 (4), pp. 16–29.
34. Milyaeva L. S. *Vozrast iskhodnoj poverhnosti vyravnivaniya gornogo poyasa Sibiri* [Age of initial peneplanation plane of Siberian mountain belt]. In *Peneplanation planes of Siberian mountains*. Novosibirsk, Nauka, 1971. Pp. 50–60.
35. Korzhuev S. S. *Morfotektonika i rel'ef zemnoj poverhnosti (na primere proiskhozhdeniya i vozrasta rel'efa Vostochnoj Sibiri)* [Morphotectonics and landscape (on the example of the origin and age of

- Eastern Siberian landscapes)]. Moscow, Nauka, 1974. 530 p.
36. *Podgotovka materialov v ramkah razrabotki osnovnykh polozhenij po obosnovaniyu dolgoversmennoj bezopasnosti PGZRO, sozdavaemogo na uchastke "Enisejskij" v Nizhnekanskom kristallicheskom massive. Tekhnicheskij otchet* [Preparation of materials in the framework of development of basic guidelines for long-term safety case of DRWDF at "Yeniseysky" site in Nizhnekansk crystalline massif. Technical Report]. Zharikov V. A., Kochkin B. T., Krupskaya V. V., Mal'kovskij V. I., Tarasov N. N., Yudincev S. V. Moscow, IGEM RAN, 2014.
37. *Radiacionno-ekologicheskaya bezopasnost' rabot, vypolnyaemykh na nachal'nom i konechnom etapah yadernogo toplivnogo cikla RF. Otchet po teme Prezidiuma RAN.* [Radiation and environmental safety of works implemented at the initial and final stages of the nuclear fuel cycle in the RF. Report of RAS Presidium]. / Petrov V. A., Kochkin, B. T., Tarasov N. N. i dr. / Moscow, IGEM RAN, 2016.
38. Rumynin V. G., Nikulenkov A. M.; Ozerskij A. Yu., Karaulov V. A. Lopatin P. V., Bogatov S. A. Makro-, mezo- i mikrostrukturnye urovni izucheniya vodo- i massoobmennyyh processov v massive treshchinovatykh porod (v svyazi s prognozom migracii radionuklidov v zone vozdejstviya PGZRO v Nizhne-Kanskom granitognejsovom massive) [Macro-, meso- and microstructural levels for study of water- and mass-exchange processes in the masses of fractured rocks (in connection to the forecast of radionuclide migration in the impact area of DRWDF in Nizhnekansk granite-gneiss massif)]. *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Filosofiya obrashcheniya s radioaktivnymi othodami: plyusy i minusy sushchestvuyushchih tekhnologij". Sbornik nauchnykh trudov* [Materials of international scientific conference "Philosophy of radioactive waste management: pros and cons of the existing technology". Collecte papers]. Moscow, LLC "Vinpress", 2016. Pp. 157–172.
39. Rumynin V. G. Opyt izucheniya glinistykh tolshch i kristallicheskih massivov kak geologicheskikh sred dlya okonchatel'noj izolyacii RAO [Experience of Studying the Clay Masses and Crystalline Core-areas as Geological Environment for RW Final Isolation]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste*, 2017, no. 1, pp. 43–54.
40. Ozerskij A. Yu. Osobennosti fil'tracii podzemnykh vod v massive kristallicheskih porod v yuzhnoj chasti Enisejskogo kryazha [Features of ground water filtration in crystalline rock mass in the southern part of Yeniseysky Ridge]. *Kompleksnyye problemy gidrogeologii: tez. dokl. nauch. konf.* [Comprehensive problems of hydrogeology: proceedings of the scientific conference]. Saint Petersburg, Saint Petersburg State University, 2013, pp. 110–113.
41. Ozerskij A. Yu., Karaulov V. A. Formirovanie podzemnykh vod v prakticheski vodonepronicaemykh porodah yuzhnoj chasti Enisejskogo kryazha [Formation of ground waters in virtually non-water-permeable rocks of the southern part of Yeniseysky Ridge]. *M-ly XXI Soveshchaniya po podzemnym vodam Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Materials of XXI Meeting on underground waters of Siberia and Far East]. Yakutsk, 2015, pp. 307–311.
42. Ozerskij A. Yu., Karaulov V. A. Gidrogeologicheskaya struktura vodonepronicaemykh kristallicheskih porod v yuzhnoj chasti Enisejskogo kryazha [Hydrogeological structure of water-impermeable crystalline rocks in the southern part of Yeniseysky Ridge]. *Sovremennyye problemy geohimii, geologii i poiskov mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh. M-ly mezhd. nauchnoj konf., posvyashchyonnoj 110-letiyu so dnya rozhdeniya akademika Konstantina Ignat'evicha Lukashyova (1907–1987)* [Modern problems of geochemistry, geology and mineral resource prospecting, Materials of the scientific conference dedicated to 110 years from the birthday of academician Konstantin Ignatovich Lukashov (1907–1987)]. Minsk, 2017, pp. 53–56.

Information about the authors

Kochkin Boris Timofeevich, Dr. of Science, Principal scientist, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of RAS (35, Staromonetnyi st., Moscow, 119017 Russia), Senior scientist, Nuclear Safety Institute of RAS (52, Bolshaya Tulskaaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: btk@igem.ru.

Bibliographic description

Kochkin B. T. Investigating the Geological Environment at the Yeniseysky Site: Tasks for the Current Stage of the Disposal Project. *Radioactive Waste*, 2019, no. 2 (7), pp. 76–91. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-76-91. (In Russian).