

МЕСТОРОЖДЕНИЯ УРАНА ПОД ЭКРАНОМ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД КАК ПРИРОДНАЯ АНАЛОГИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ХРАНИЛИЩА НА ПЕРИОД ПРЕДСТОЯЩЕГО ПОХОЛОДАНИЯ КЛИМАТА

Б. Т. Кочкин^{1, 2}

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

²Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 3 июня 2023 г.

В статье представлена оценка условий в среде размещения пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) для сценария предстоящего похолодания климата. Оценка выполнена методом аналогии с современными условиями, изученными на урановых месторождениях, которые локализованы в зоне многолетнемерзлых пород. Основой для такого сравнения служат современные гидрогеологические данные, полученные при эксплуатации месторождений в Забайкалье методом скважинного подземного выщелачивания. При его использовании не происходит существенного нарушения среды фильтрации подземных вод. Проведено сравнение климатических, геологических и гидрогеологических условий района ПГЗРО в Красноярском крае и района урановых месторождений в Забайкалье. Обоснованы пределы применимости данной аналогии. Очерчены основные характеристики движения подземных вод в подмерзлотных водоносных горизонтах. Эти результаты могут быть полезны при разработке модели миграции радионуклидов из ПГЗРО, проектируемого на участке «Енисейский».

Ключевые слова: радиоактивные отходы, пункт захоронения радиоактивных отходов, оценка безопасности, природные аналогии, зона многолетнемерзлых пород.

Введение

Аналогии с природными объектами — один из методологических подходов к рассмотрению условий геологической изоляции радиоактивных отходов (РАО). Такая информация используется с разными целями: продемонстрировать безопасность технологии, идентифицировать опасные процессы, уменьшить неопределенности в расчетных параметрах и др. [1]. Часто в качестве аналога ПГЗРО рассматривают месторождения урана. Эта аналогия используется, например, для иллюстрации геологических обстановок,

потенциально пригодных для размещения ПГЗРО [2], геохимических условий, благоприятных для долгосрочной изоляции РАО в глубоких недрах [3], и другого.

Безопасность ПГЗРО оценивается на основе численного моделирования для расчета поступления радионуклидов в окружающую среду и не должна превышать установленных критериев безопасности [4]. Основным агентом миграции радионуклидов из него — подземные воды. Одним из важных факторов, влияющих на

интенсивность их потока, является климат [5], [6]. Прогноз будущих климатических изменений в районе ПГЗРО при захоронении долгоживущих РАО необходим на период их потенциальной опасности, который может измеряться сотнями тысяч — миллионами лет. За такие продолжительные периоды времени неизбежны существенные изменения в гидродинамическом режиме подземных вод, связанные, в частности, с глобальными потеплением или похолоданием. Например, в случае похолодания многие участки, которые сегодня планируются под захоронение РАО в Северном полушарии (Олкилото в Финляндии, Форсмарк в Швеции, участки в Великобритании и Канаде) рано или поздно окажутся в зоне многолетнемерзлых пород [7]. Участок «Енисейский», выбранный для размещения ПГЗРО в Красноярском крае, не является исключением [8], [9], [10]. Его отличие от северо-европейских и канадского заключается в отсутствии на нем покровных ледников и, наоборот, в большей мощности многолетнемерзлых пород во всех предшествующих и прогнозируемых холодных эпохах. Очевидно, что мерзлая горная порода, поры и трещины которой заполнены льдом, практически непроницаема для подземных вод и водоносные горизонты, находящиеся под водоупором из мерзлых пород, имеют ограниченное водное питание с поверхности. Мерзлые породы также рассматриваются в качестве экрана на пути поступления загрязненных вод к поверхности [11], [12].

О том, как образование слоя многолетнемерзлых пород скажется на гидрогеологических условиях в массиве на уровне размещения РАО, можно представить по аналогии с условиями на урановых месторождениях, локализованных в области современного распространения зоны многолетнемерзлых пород. Таким примером в некоторой степени могут служить месторождения Хиагдинского рудного поля (ХРП), расположенного в Витимском районе Забайкалья (Бурятия), относящиеся к палеодолинному подтипу месторождений в песчаниках и открытые в 1977 г. В настоящее время руды ХРП активно обрабатываются методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ). Для этого продуктивный горизонт вскрывается скважинами, проникающими под слой многолетнемерзлых пород. Для рассматриваемой аналогии важно, что метод СПВ не приводит к существенным нарушениям среды фильтрации подземных вод. Проведение такого непрерывного процесса невозможно без детального изучения подземных вод и их гидродинамического режима. Благодаря этому появились данные о их поведении под

экраном многолетнемерзлых пород [13], [14]. Эта информация представляет интерес в отношении разработки модели миграции радионуклидов из ПГЗРО, проектируемого на участке «Енисейский», для сценария наступления периода оледенения. Характеристика этих данных и есть цель настоящей статьи.

Криолитозона и эволюция глобального климата

Для достоверной оценки безопасности ПГЗРО на долгосрочную перспективу необходима информация о природных условиях, которые сложатся в периоды времени, температурные условия которых отличаются от современных. Установлено несколько стадий наступления оледенений в Северном полушарии за текущий ледниковый период, который наступил около 2,5 млн лет назад. На фоне тренда общего падения глобальных средних температур за плейстоцен, природные условия периодически сменяются от тропических и умеренных до перигляциальных в окрестностях ледников [15], [16], [17].

Современное распространение криолитозоны в районах, выбранных для аналогии, показано на рис. 1.

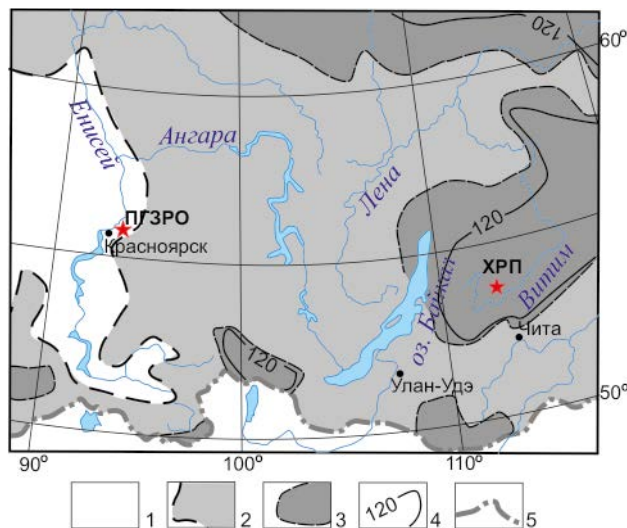


Рис. 1. Схема современного распространения многолетней мерзлоты в сравнимых районах («Геокриологическая карта СССР масштаба 1 : 2 500 000», 1996 г., фрагмент с упрощениями и добавлениями):
 1 – область вне зоны многолетней мерзлоты;
 2 – зона островной и прерывистой мерзлоты;
 3 – зона сплошной мерзлоты;
 4 – мощность сплошной мерзлоты > 120 м;
 5 – границы России

В качестве аналогий для условий среды размещения ПГЗРО при будущих температурных условиях подходят данные климатических

реконструкций для данной территории. Из них может быть получена информация о количестве осадков, речном стоке, растительности и др. как для более холодных ($-\Delta T$), так и более теплых ($+\Delta T$), чем сегодняшней, климатических периодов [16]. Из этих данных известно, что резкое похолодание в Сибири в прошлом (при каждом наступлении ледниковой эпохи) выражалось развитием мощной зоны многолетнемерзлых пород. В частности, глубина их промерзания в районе участка «Енисейский» в последнюю ледниковую эпоху (20–18 тыс. лет назад) составляла около 600 м (рис. 2). Это почти на 100 м ниже планируемого горизонта размещения РАО [8].

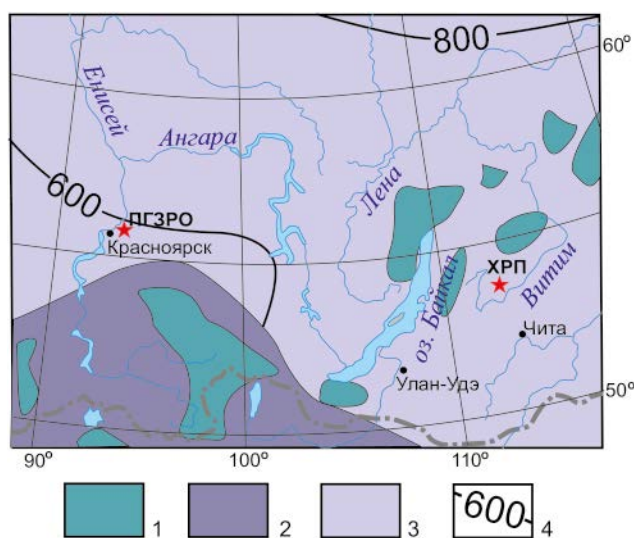


Рис. 2. Оледенение и многолетняя мерзлота в период максимального похолодания позднего плейстоцена в Сибири, Сартанское оледенение, около 20–18 тыс. лет назад (фрагмент карты из [16] с изменениями и дополнениями):

- 1 – ледниковые покровы;
- 2 – многолетняя мерзлота горных областей;
- 3 – сплошная многолетняя мерзлота;
- 4 – изолинии мощности сплошной многолетней мерзлоты

В общем вертикальном строении многолетнемерзлых пород выделяется зона собственно мерзлых пород, которые включают в себя лед в качестве порообразующего минерала и в виде отдельных скоплений разного размера: гнезд, линз, шлиров и т. п. Они слагают обычно верхнюю часть многолетней криолитозоны, ниже вплоть до нулевой изотермы располагается зона морозных пород, которые свободны ото льда.

Мерзлые породы являются практически нефилтующими и характеризуются малыми скоростями миграции незамерзших высокоминерализованных подземных вод (криопэггов), ионов солей и химических элементов. Положение в криолитозоне нижней границы мерзлых

пород определяется в первую очередь их исходной проницаемостью и минерализацией подземных вод. Зона мерзлых пород обычно захватывает бывшие зоны как активного, так частичного и замедленного водообмена [11], [15].

В перигляциальных условиях на слое постоянно мерзлых пород залегает слой сезонного протаивания, который оттаивает в теплый период года. В толще многолетнемерзлых пород встречаются участки залегания талых грунтов (талики) по которым подмерзлотные подземные воды могут соединяться с поверхностью. Такие талики обычно залегают под непромерзающими до дна реками и озерами (глубина обычно более 2 м).

Проведенные эксперименты показали, что в мерзлых породах криолитозоны проводящей средой для миграции может служить лед и тонкие пленки незамерзшей связанной воды. В тонкодисперсных породах будет преобладать миграция в пленках незамерзшей воды, а в грубообломочных и скальных – диффузия через лед [15].

Предыдущие периоды промерзания, случавшиеся на участке «Енисейский» в прошлом, которые в современной криолитозоне сопровождаются образованием ледяных клиньев (повторно-жильные льды) и шлиров, несомненно, отразились в виде деформаций пород нетектонической природы. Возможно, что именно чередованию процессов промерзания и оттаивания обязаны происхождением зоны дробления гнейсов с глинисто-древянным заполнителем, в которых отсутствуют следы тектонических подвижек в виде зеркал и борозд скольжения. Такие образования довольно широко распространены на участке в зонах древних разломов, особенно в их верхней части (рис. 3).



Рис. 3. Зона дробления гнейсов с глинисто-древянным заполнителем (фото свежезвлеченного керна на участке «Енисейский»)

Предстоящие климатические изменения прогнозируются на основе математических моделей

глобального климата [18]. Неопределенность в климатических моделях закладывается в сценарии эволюции хранилищ РАО. Обычно в базовых сценариях время до наступления следующей ледниковой эпохи принимается 50 000 лет [7].

Данные о палеоклиматах и прогнозируемых будущих климатических изменениях говорят о том, что в сценарии наступления следующего похолодания участок «Енисейский» может оказаться под мощным слоем многолетнемерзлых пород или даже внутри него. Конкретные сроки наступления следующей холодной эпохи и глубины промерзания — предмет отдельной дискуссии, которая ведется на основе климатических моделей и выходит за рамки настоящей статьи. Для региона, где расположен участок «Енисейский», долгосрочные проекции климатов на перспективу в тысячи и десятки тысяч лет отсутствуют. Фактор чередования этапов промерзания и оттаивания пород в долгосрочной перспективе несомненно добавит неопределенностей в прогнозную гидродинамическую модель. Несмотря на скудость экспериментальных и натурных данных о влиянии этих процессов на фильтрационные свойства пород, характерных для участка «Енисейский», попытки количественных оценок в отношении безопасности захоронения РАО на этой площадке предпринимаются, например, в [19].

Сравнительная характеристика участка «Енисейский» в Красноярском крае и урановых месторождений в Бурятии

Применение аналогий требует осторожности и тщательного анализа не только сходных черт, но и различий, которые могут быть очень существенными. Относительно выбранных объектов наибольшую значимость имеют прежде всего гидрогеологические условия.

Географическая характеристика

Участок «Енисейский» находится вблизи г. Железногорска, который расположен в 60 км на север от краевого центра г. Красноярска, на восточном берегу р. Енисей [20].

ХРП находится на территории республики Бурятия на удалении около 220 км к северу от Читы и 390 км на восток от Улан-Удэ [13].

Климат. Географические широты участков ПГЗРО (56° СШ) и ХРП (54° СШ) примерно одинаковые, из чего должно следовать сходство их климата и его эволюции. Однако это не совсем так. Обобщенные характеристики климатов обоих районов приведены в таблице.

Климатические условия районов ПГЗРО и ХРП

Район	Среднегодовая температура, (°С)	Минимальная температура, (°С)	Среднегодовое количество осадков, мм	Средняя относительная влажность воздуха, %
ПГЗРО	-0,1	-51	435	58–75
ХРП	-3,5	-54	356	50–77

Рельеф. Участок «Енисейский» находится в пределах расчлененного склона Атамановского хребта. Абсолютные отметки поверхности водораздела колеблются от 370 до 430 м. Отметки уреза воды р. Енисей, протекающей в 4 км западнее площадки, около 120 м [20].

Площадь ХРП располагается на водоразделах рек Витим, Амалат и других в пределах Витимского плоскогорья на высотных отметках 1200–1456 м. Урез воды в реках на его территории на 80–100 м ниже водоразделов [13].

Сегодняшнее наличие мерзлоты в районе ХРП и ее отсутствие на участке «Енисейский» связано с рядом факторов. Общую асимметрию конфигурации распределения покровных ледников и зоны многолетней мерзлоты в Северном полушарии климатологи видят в особенностях глобальной орографической и движении воздушных масс [7], [17]. Тепловой режим зоны многолетней мерзлоты в более локальном масштабе связан с теплообменом на поверхности Земли между атмосферой и литосферой [15]. При сравнении участков ХРП и «Енисейский» это, соответственно, более низкая среднегодовая температура (см. табл.) и более высокое положение над уровнем моря (выше 1000 м и около 400 м) при несколько меньших значениях теплового потока в Витимском регионе [21].

Геологическая характеристика

Участок «Енисейский» сложен породами канского метаморфического комплекса палеоархейского возраста. Они представлены мигматизированными гнейсами и кристаллическими сланцами. В его геологическом строении также принимают участие два комплекса секущих даек основного состава позднеархейского и раннепротерозойского возрастов. Восточнее участка «Енисейский» канский метаморфический комплекс прорван гранитами нижнеканского комплекса рифейского возраста (рис. 4) [22].

Коренные породы нарушены в результате неоднократных тектонических движений. В периоды тектонического покоя и пенепленизации рельефа (от палеозоя до кайнозоя) в этих породах, выходящих на поверхность, формировались коры выветривания. Сегодняшний тектонический режим

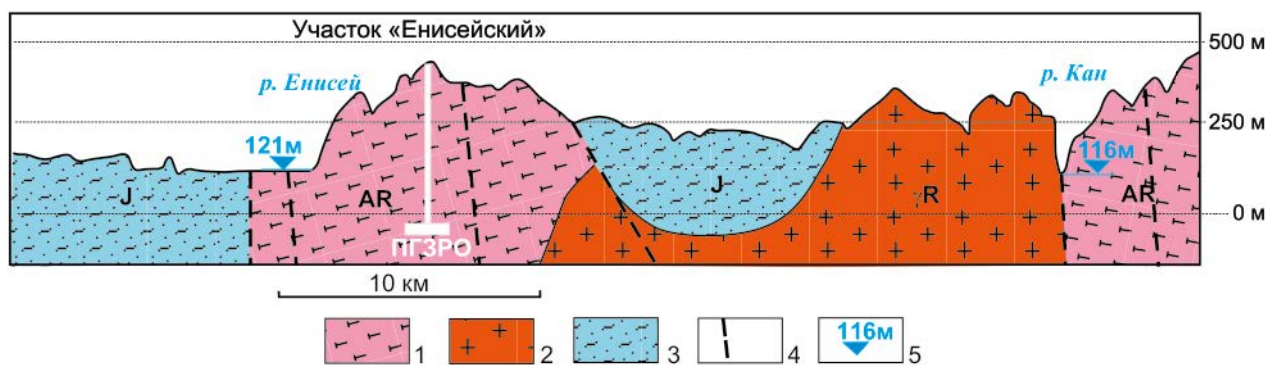


Рис. 4. Региональный схематический разрез через участок «Енисейский» (по [23] с изменениями):
1 – гнейсы и кристаллические сланцы канского метаморфического комплекса; 2 – граниты Нижнеканского массива;
3 – осадочные породы юрского возраста; 4 – разломы; 5 – отметки уреза воды в реках

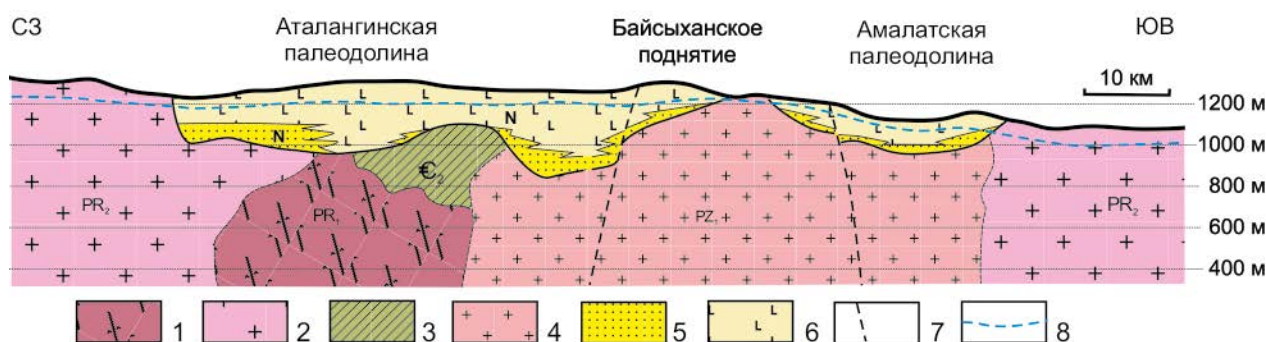


Рис. 5. Региональный схематический разрез через Витимское плато и главные палеодолины неогеновой речной сети
(по материалам поисково-разведочного бурения):
1 – кристаллические сланцы; 2 – протерозойские граниты; 3 – известняки и сланцы; 4 – витимканские граниты палеозоя; 5 – терригенные отложения неогена; 6 – вулканогенные породы базальтового плато;
7 – разломы; 8 – подошва многолетней мерзлоты

характеризуется как субплатформенный с незначительными движениями земной коры [22].

Геологическое строение недр в районе ХРП принципиально отличается от участка «Енисейский» (рис. 5). Рудные залежи локализуются главным образом в толще проницаемых песчаников с повышенным содержанием углефицированных растительных остатков. Песчаники заполняют древние русла в палеозойском гранитном фундаменте. В донеогеновом фундаменте наиболее широко распространены граниты витимканского комплекса палеозойского возраста [24], [25]. Мощность терригенных пород в палеорулах колеблется от нуля в бортах до нескольких десятков метров в тальвегах. Рудные тела занимают центральные части палеодолин и сформированы кислородсодержащими подземными водами, переносившими уран из разрушавшихся гранитов. Рудоносные палеорула перекрыты покровом неоген-четвертичных основных эффузивов, относящихся к Амалатскому плато базальтов. Покров неогеновых базальтов достигает мощности в 285 м. Базальтовый вулканизм непосредственно в районе ХРП протекал в период с 9,5 до 0,6 млн лет [26].

В истории развития Витимского плато известно длительное состояние тектонического покоя, продолжавшееся примерно 70 млн лет, в период с верхнего мела по олигоцен. В течение этого периода происходили пенепленизация рельефа и образование кор выветривания. С позднего олигоцена – раннего эоцена началась тектоно-магматическая активизация в регионе и формирование базальтового плато. За неоген-четвертичный период активизации по основным разломам района амплитуда смещения подошвы и кровли терригенного горизонта в ряде случаев достигла 60 м. В холодные эпохи четвертичного периода сформировалась современная криолитозона.

Гидрогеологическая характеристика

Гидрогеология сравниваемых объектов кардинально отличается из-за различного строения разреза и структуры пород. Кристаллические породы, залегающие на участке «Енисейский», характеризуются трещинной проводимостью, тогда как вмещающие урановое оруденение песчаники являются поровым коллектором. Район ПТЗРО представляет собой гидрогеологический бассейн в трещиноватых кристаллических

породах с открытой верхней поверхностью [23]. Гидрогеологический бассейн ХРП является артезианской напорной системой, в которой роль верхнего водоупора играет базальтовый покров. Дополнительную изоляцию предоставляет слой многолетнемерзлых пород в вулканогенной толще базальтов и туфов, мощность которой по данным бурения колеблется в пределах 40–90 м.

По стратиграфическим, петрографическим и структурным особенностям пород, величинам их проницаемости и обводненности, а также по условиям формирования, распространения и движения подземных вод на участке «Енисейский» выделены следующие гидрогеологические подразделения (сверху вниз):

- а) локально обводненный горизонт четвертичных покровных отложений;
- б) относительно водоносная зона экзогенной трещиноватости раннеархейских пород;
- в) условно водонепроницаемая зона раннеархейских пород [22], [27].

Минерализация подземных вод изменяется от 140 до 641 мг/дм³, составляя в среднем 367 мг/дм³. Средний химический состав подземных вод массива в целом гидрокарбонатный кальциевый, сменяющийся с глубиной на натриево-кальциевый.

По данным опытно-фильтрационных работ, породы участка «Енисейский» в отдельных интервалах до глубины 110 м характеризуются как слабоводопроницаемые, на остальных участках разреза как водонепроницаемые. Это разделение принято согласно ГОСТ на водонепроницаемые породы с коэффициентом фильтрации (K_f) ниже 0,005 м/сут и слабоводопроницаемыми при K_f от 0,005 до 0,3 м/сут. В зонах (б) и (в) преобладающими являются водонепроницаемые породы, причем почти 70% всех определенных значений K_f принадлежит к интервалу значений 0,0001 ÷ 0,001 м/сут. Опытно-фильтрационные работы показали, что породы зон тектонических нарушений не имеют явных отличий фильтрационных свойств по сравнению с окружающими [22], [27].

Гидродинамика района определяется его положением на водоразделе между двумя крупными реками Енисей и Кан, его геологическим строением и характером рельефа, определяющими область питания [23]. Выделяются:

- региональный поток подземных вод, который контролируется разгрузкой в региональные дрены — реки Енисей и Кан (см. рис. 4);
- локальные потоки подземных вод, которые контролируются локальными формами рельефа и разгружаются в реки и ручьи второго и третьего порядков.

Гидродинамика района ХРП определяется положением палеорусел на склонах Байсыханского поднятия вкрест его простирания с разгрузкой в главные палеодолины. Региональная область питания терригенного и базальтового водоносных горизонтов, вероятно, располагается к западу от ХРП в центральной части поднятия, где базальтовый экран отсутствует и сохранились выходы на поверхность трещиноватых гранитов палеозойского фундамента.

Если значения K_f гранитов и базальтов ХРП сравнимы с таковыми для гнейсов и сланцев на участке «Енисейский», то для терригенных отложений палеодолин они значительно выше: от 1 м/сут для глинистых разностей песков, до 10 м/сут и более для однородных среднезернистых песков, и относятся (по ГОСТ) к сильноводопроницаемым породам.

На территории ХРП выделены 5 гидрогеологических подразделений (сверху вниз) [13], [14]:

- а) безнапорный водоносный горизонт деятельного слоя (надмерзлотный) имеет сезонный режим питания и разгрузки. Мощность слоя составляет 2–3 м. По химическому составу воды ультрапресные, с минерализацией 0,1 г/л (реже 0,3–0,5 г/л);

- б) горизонт многолетнемерзлых пород содержит подземные воды в виде льда. Данные о наличии криопэггов отсутствуют;

- в) напорный водоносный горизонт вулканогенных отложений (подмерзлотный) приурочен к неогеновым базальтам. Этот горизонт залегает ниже многолетнемерзлых пород и распространяется до контакта базальтов и осадочных отложений. Подземные воды сосредоточены в образованиях неоген-четвертичных кор выветривания, в вулканогенных породах, трещиноватых зонах контактов базальтовых потоков и в тектонических нарушениях. Водопроницаемость горизонта составляет 50–500 м²/сут (в среднем 200 м²/сут);

- г) напорный водоносный горизонт отложений неогена (рудноносный) заключен между двумя водоупорами: подошвой базальтов и кристаллическим (преимущественно гранитным) фундаментом. Он залегает на глубине 100–280 м в главных палеодолинах 1-го порядка и 80–300 м в палеодолинах 2-го порядка. Соседние палеодолины гидравлически разобщены, о чем свидетельствует ступенчатый характер статических уровней подземных вод, например, на соседних залежах Хиагдинского месторождения (рис. 6). Это объясняется наличием здесь линейных гидравлических водоупоров, например, поперечных к склону разломов, или локальными водоразделами, образованными

слабо трещиноватыми выступами фундамента, которые обуславливают разобщенность источников питания для каждой палеодолины. По простиранию обводненные слои гидравлически более связаны между собой, что характерно для аллювиальных отложений. В верховьях палеодолин 2-го порядка, которые расположены непосредственно под зоной мерзлых пород, часто наблюдается зона безводных отложений (см. рис. 6), которые ниже по падению сменяются обводненными, но с безнапорным режимом, который затем сменяется напорным. Результаты определения химического состава подземных вод показали значительные различия их минерализации от одного месторождения к другому: от слабоминерализованных ($< 0,5$ г/дм³) вплоть до минерализованных (3,0–6,5 г/дм³);

д) воды зон разломов отличаются более высокой по отношению к пластовым водам минерализацией (до 8000 мг/л) и содержанием CO₂ 500–4000 мг/л. Считается, что очаговая разгрузка этих восходящих холодных углекислых вод осуществляется в рудовмещающий водоносный горизонт. Воды смешанного состава встречены в рыхлых отложениях палеодолин ХРП [13], [28].

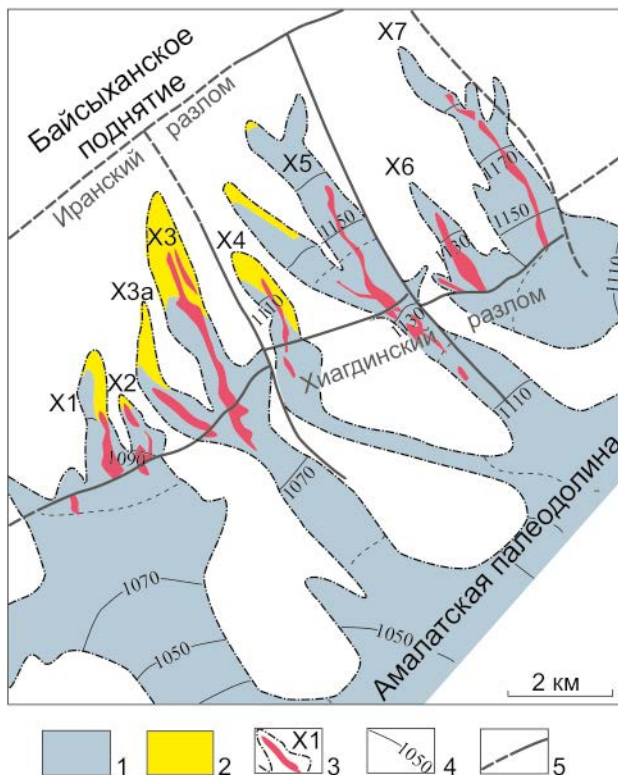


Рис. 6. Модельное распределение напоров подземных вод в палеодолинах месторождения Хиагдинское (по [13] с изменениями и дополнениями):

- 1 – обводненные части палеодолин; 2 – слабо обводненные участки; 3 – контуры палеодолин, рудные залежи и их номера; 4 – изолинии напоров, абс. отм., м; 5 – разломы установленные и предполагаемые

Гидрогеологическая характеристика ХРП

Гидрогеологические исследования рудоносного горизонта показали, что, несмотря на наличие базальтового покрова и слоя мерзлых пород, режим фильтрации подземных вод не является застойным.

Сами базальты даже до формирования многолетней мерзлоты не были монолитным образованием и не выступали в роли идеального экрана для инфильтрации. Они на всю мощность разбиты сетью трещин на отдельные глыбы различных размеров и сильно нарушены процессами выветривания. По трещинам в зеленоваточерных базальтах встречаются следы окисления метеорными водами в виде охр красного и желтого цветов. Химический состав подземных вод, сильно различающийся в базальтовом и рудоносном горизонтах, становится почти одинаковым только в верховьях рудоносных палеодолин. Выходы витимканских трещиноватых гранитов на дневную поверхность в центральной части Байсыханского поднятия, вероятно, продолжают играть роль области питания даже в условиях регионального распространения многолетнемерзлых пород. В пользу современного инфильтрационного питания подмерзлого и рудоносного горизонтов приводится ряд аргументов [13], [14]:

- 1) вероятность присутствия локальных сезонных таликов и данные летнего опреснения подземных вод;
- 2) гидравлический уклон и повышение солености вод по простиранию долин;
- 3) окисленный сидерит вблизи кровли рудовмещающих песчаников;
- 4) падение окислительно-восстановительного потенциала (Eh) в системе «вода – порода» по вертикали.

Мощность многолетнемерзлых пород на территории ХРП определена преимущественно в пределах рудоносных палеодолин. Глубина оттаивания, по данным режимных температурных наблюдений, в мелких скважинах к середине июня достигает 2,4 м. На склонах южной экспозиции она может достигать 10 м. Это создает вероятность образования локальных сезонных таликов вплоть до подошвы многолетнемерзлых пород. На таких участках в летний период может происходить инфильтрация атмосферных осадков. Существование этого процесса подтверждают данные о летнем опреснении подземных вод в пределах Витимского плато на выходах трещиноватых пород палеозойского фундамента и в скважинах, вскрывающих горизонты осадочных отложений в палеодолинах.

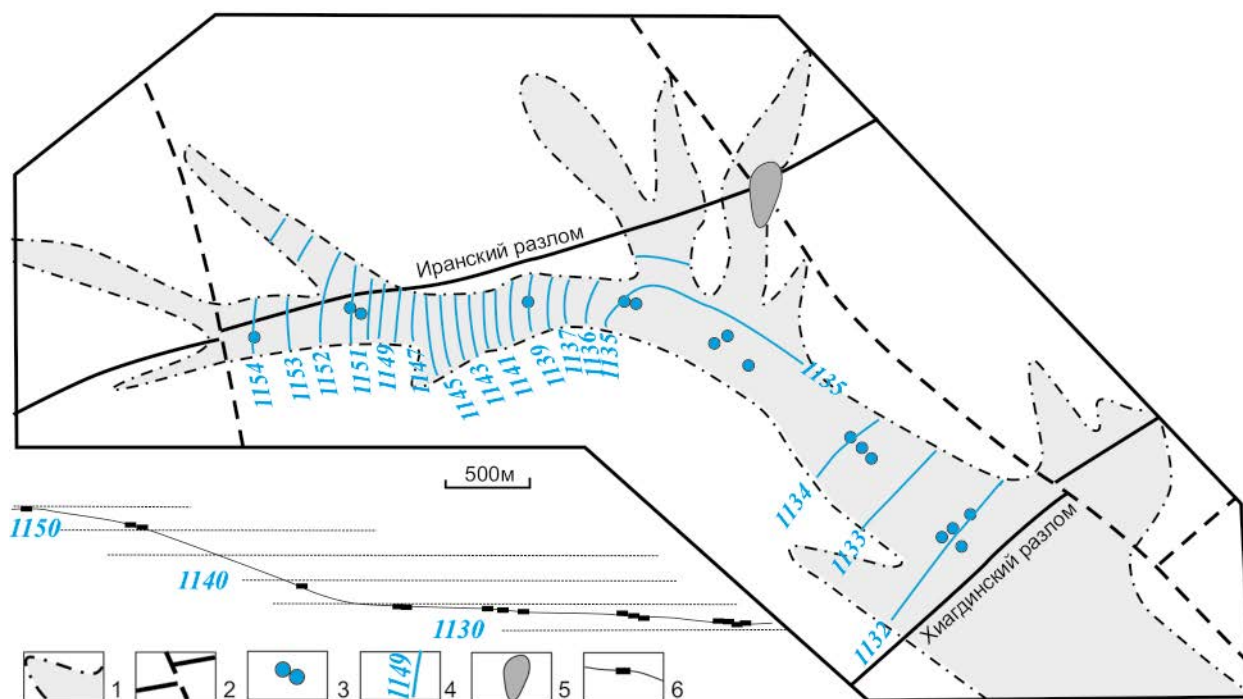


Рис. 7. Изменение уклона пьезометрической поверхности подземных вод вдоль залежи В1 месторождения Вершинное (по [13] с изменениями и дополнениями).

1 – песчано-глинистые отложения палеодолины; 2 – разломы установленные и предполагаемые; 3 – гидрогеологические скважины; 4 – гидроизоэпы и значения абсолютной отметки уровня; 5 – базальтовое тело вулканического происхождения; 6 – уровни и уклон пьезометрической поверхности (на разрезе).

На всех протяженных залежах месторождений ХРП гидравлический уклон составляет 0,0n—0,00n вдоль палеодолин, что свидетельствует о наличии замедленного, но не застойного режима фильтрации в рудоносном горизонте. В качестве примера приведены данные по месторождению «Вершинное» вдоль залежи В1 (рис. 7) протяженностью 5,5 км. Равномерное размещение гидрогеологических скважин позволило детально установить изменение пьезометрической поверхности подземных вод по простиранию залежи от верховья к низовью палеодолины. Гидравлический уклон здесь снижается от 0,008 до 0,001 и пьезометрическая поверхность выполаживается перед Хаигдинским разломом. Предполагается, что зона разлома выступает в роли слабопроницаемого гидравлического барьера.

От верховья палеодолины к ее низовью минерализация подземных вод увеличивается от 240 до 995 мг/дм³, и их химический состав меняется от гидрокарбонатно-кальциево-натриевого на гидрокарбонатно-магниевый, что рассматривается как указание на разбавление пластовых вод вновь поступающими метеорными инфильтратами.

Изучение прозрачных шлифов, изготовленных из вмещающих песчаников месторождения «Вершинное», показало, что в верхней части

разреза сидеритовый цемент окислен, а в нижней он не изменен. Поскольку сидерит легко окисляется в кислородной среде, его окисление в верховьях палеодолин является дополнительным доказательством инфильтрации атмосферных вод.

Свидетельством существования современного инфильтрационного питания рудоносного горизонта также служат данные измерения Eh в системе «вода — порода» [29]. Эти исследования показали, что по направлению распространения потока подземных вод Eh в системе изменяется. На малых глубинах он может достигать положительных значений +150 ÷ +190 мВ на отрицательном в целом фоне, что указывает на окислительные условия, типичные для кислородсодержащих метеорных вод. На глубинах более 124—150 м обстановка меняется на сильно восстановительную с Eh –420 ÷ –330 мВ.

Поступление углекислых вод из фундамента на территории ХРП не имеет аналогии с районом ПГЗРО. Тем не менее их характеристика важна для понимания различий в обсуждаемых примерах.

Поствулканические углекислые минеральные подземные воды широко распространены на территории всей Даурской провинции углекислых вод: от Бурятии до южной части Забайкалья. В качестве типичных черт этих вод указывают

низкую температуру (до 10 °С), минерализацию до 1,5 г/л, гидрокарбонатный магниево-кальциевый состав, высокое (до 3,3 г/л) содержание свободной углекислоты и рН до 5,5 [24], [30]. Рост общей минерализации, содержания магния и изменение химического состава подземных вод в рудовмещающем горизонте с глубиной — базовые аргументы, свидетельствующие о наличии эксфильтрации углекислых вод в местные водоносные горизонты.

Таким образом, гидрогеологические данные по району ХРП позволяют однозначно утверждать, что в водоносном горизонте, сложенном терригенными породами и расположенном под достаточно мощным экраном базальтов и многолетнемерзлых пород, динамика потока подземных вод отличается от застойного водообмена. Вопрос о современном инфильтрационном питании подмерзлотных водоносных горизонтов и его интенсивности остается открытым. Наличие сквозных сезонных таликов носит предположительный характер, а явление летнего опреснения подземных вод опирается на небольшое число измерений.

Другие аргументы в пользу поступления современных инфильтратов в подмерзлотные горизонты допускают иную интерпретацию. Например, период окисления сидеритов, обнаруженных в кровле песчаных горизонтов, не имеет точной датировки, неизвестно, характеризует ли этот процесс современный климатический период или относится ко временам до образования многолетней мерзлоты. Кроме того, сторонники современной инфильтрационной подпитки не приводят данные о прямых измерениях кислорода в подземных водах. Наиболее спорны аргументы, касающиеся изменений общей минерализации и химического состава, а также падения Eh в пастах «дистиллированная вода — порода» от положительных вверху горизонта до резко отрицательных у его основания. Оба эти факта могут отражать засоление относительно пресных пластовых изначально метеорных вод восходящими минерализованными углекислыми водами, поступающими по разломам из фундамента, и активное развитие микробиоты в осадках, обогащенных углистым материалом с выделением водорода, метана и сероводорода [28].

Заключение

Вероятная эволюция климата на участке «Енисейский» указывает на формирование в будущем экрана многолетнемерзлых пород, под которым поток подземных вод будет напорным.

Как менее вероятный сценарий для данного ПГЗРО — полное промерзание зоны размещения РАО.

Положение обоих сравниваемых объектов в рельефе на относительной возвышенности и общая антиклинальная конфигурация гидрогеологических бассейнов определяют нисходящее движение подземных вод даже в подмерзлотных водоносных горизонтах в сторону областей разгрузки, приуроченных к понижениям в рельефе. На ХРП это направление не инвертируется даже при наличии подтока глубинных углекислых вод.

Общая структура фильтрационной среды в районе ХРП, которая представлена чередованием высокопроницаемых отложений палеодолин и древних гранитных водоразделов, которые вместе с тектоническими нарушениями-экранами разделяют общий поток подземных вод на субпараллельные рукава, может служить аналогией для района участка «Енисейский», где она представлена малопроницаемым массивом кристаллических пород и тектоническими нарушениями, фильтрационный или экранирующий эффект которых еще предстоит оценить. Чередование процессов промерзания и оттаивания в древних тектонических зонах, вероятно, вызвало дополнительные нетектонические деформации и повышение проницаемости этих зон.

Инфильтрационное питание подземных вод подмерзлотных горизонтов носит ограниченный характер даже в условиях современного теплого (бореального) климата ХРП. Как следствие, в купольной части подмерзлотного водоносного комплекса ХРП формируется зона безводных морозных пород, переходящих в водоносную зону с безнапорным режимом движения, а затем в напорную.

Вероятность инфильтрационного питания в районе участка «Енисейский» резко падает в условиях будущего холодного (перигляциального) климата. Также маловероятно наличие сквозных таликов вблизи площадки ПГЗРО из-за отсутствия непромерзающих водоемов на водоразделе. Как возможное следствие, зона безводных морозных пород будет мощнее и обширнее.

Гидрогеохимические аналогии носят более спекулятивный характер. Пресные слабоминерализованные подземные воды на участке «Енисейский» вряд ли заметно изменят свой состав и физико-химические свойства под экраном многолетней мерзлоты. В гнейсах и сланцах отсутствует углистая органика, что исключает возможность для активной жизнедеятельности микробиоты, генерации ею газов типа водорода,

метана и сероводорода и создания условий для резкого понижения Eh. В этом районе также отсутствует потенциал поступления глубинных минерализованных вод.

Финансирование

Статья подготовлена при финансовой поддержке Госзадания ИГЕМ РАН Министерством образования и науки Российской Федерации.

Литература

1. Болдырев К. А., Соболев Д. А., Кочкин Б. Т., Баринов А. С. Использование результатов изучения природных и исторических аналогов для оценки поведения материалов барьеров безопасности при обосновании безопасности захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2022. № 3 (20). С. 72–96. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-72-96.

2. Cramer J. J., Vilks P., Larocque J. P. A. Near-field analog features from the Cigar Lake uranium deposit // Natural analogues in radioactive waste disposal. — Springer, Dordrecht, 1987. Pp. 59–72.

3. Лаверов Н. П., Петров В. А., Полуэктов В. В., Насимов Р. М., Хаммер Й., Бурмистров А. А., Шукин С. И. Урановое месторождение Антей — природный аналог хранилища ОЯТ и подземная геодинамическая лаборатория в гранитах // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 5. С. 387–413.

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

5. Radioactive Waste Management Committee. International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. Version 3.0. NEA/RWM/R(2019).

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

7. Development of a Common Framework for Addressing Climate and Environmental Change in Post-Closure Radiological Assessment of Solid Radioactive Waste Disposal. IAEA-TECDOC-1904. Vienna, IAEA, 2020. 194 p.

8. Кочкин Б. Т. Долгосрочный прогноз климатических изменений в районе размещения хранилища высокорadioактивных отходов (участок Енисейский, Красноярский край) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2015. № 2. С. 119–132.

9. Болдырева Д. А., Василишин А. Л., Понизов А. В., Фелицын М. А., Борисова О. К., Панин А. В. Оценка климатической эволюции в районах размещения пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов для обоснования долговременной безопасности // Ядерная и радиационная безопасность. 2019. № 3 (93). С. 36–46.

10. Кочкин Б. Т., Богатов С. А., Савельева Е. А. Эволюция ПГЗРО в Нижнеканском массиве под воздействием климатических факторов // Радиоактивные отходы. 2021. № 1 (14). С. 63–75. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-63-75

11. Ершов Э. Д., Пармузин С. Ю., Лисицына О. М. Проблемы захоронения радиоактивных отходов в криолитозоне // Геоэкология. 1995. № 5. С. 20–36.

12. Кочкин Б. Т. Оценка гидрогеологических условий при выборе места для захоронения отвержденных радиоактивных отходов // Геоэкология. 1997. № 3. С. 68–78.

13. Добыча урана подземным выщелачиванием в криолитозоне / Под ред. И. Н. Солодова. — М.: ZetaPrint, 2022. 183 с.

14. Солодов И. Н., Нестерова М. В. Углекислые подземные воды — рудосохраняющий фактор на урановых месторождениях Хиагдинского рудного поля (Республика Бурятия) // Геология рудных месторождений. 2022. Т. 64. № 1. С. 151–162. DOI: 10.31857/S0016777022010087.

15. Ершов Э. Д. Общая геокриология. — М.: Изд-во МГУ, 2002. 682 с.

16. Палеоклиматы и палеоландшафты внутропического пространства Северного полушария. Поздний плейстоцен — голоцен. Атлас-монография / Под. ред. А. А. Величко. — М.: ГЕОС, 2009. 120 с.

17. Величко А. А. Становление современной ландшафтной оболочки Земли // Природа. 2012. № 1 (1157). С. 78–87.

18. Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, 2014. 151 p.

19. Мальковский В. И., Усачева А. А. Влияние потенциального оледенения на безопасность подземного хранилища радиоактивных отходов на участке «Енисейский» (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. 2023. № 1 (22). С. 58–69. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-58-69.

20. 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, Нижне-Канский массив) в составе подземной

- исследовательской лаборатории (включая материалы оценки воздействия на окружающую среду). Тома I—IV, ФГУП «НО РАО». — Москва, 2015. — URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/>, дата обращения: 1.10.2018.
21. Национальный атлас России. Т. 2. Карта теплового потока М. 1 : 30 000 000. — URL: https://geographyofrussia.com/wp-content/uploads/2015/01/70_1.jpg, дата обращения 19.04.2023.
22. Караулов В. А., Заблоцкий К. А. 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). — Красноярск, ОАО «Красноярск-геология», 2015.
23. Румынин В. Г. Опыт изучения глинистых толщ и кристаллических массивов как геологических сред для окончательной изоляции РАО // Радиоактивные отходы, 2017. № 1 (1). С. 44—55.
24. Уран российских недр / Под ред. Машковцева Г. А. — М. : ВИМС, 2010. 855 с.
25. Тарасов Н. Н., Кочкин Б. Т., Величкин В. И., Дойникова О. А. Месторождения Хиагдинского урановорудного поля (Бурятия): условия образования и факторы рудоконтроля // Геология рудных месторождений. 2018. Т. 60. № 4. С. 392—400. DOI: 10.1134/S0016777018040056.
26. Рассказов С. В. и др. Стратиграфия кайнозоя Витимского плоскогорья: феномен длительного рифтогенеза на юге Восточной Сибири. — Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2007. 193 с.
27. Озерский А. Ю., Караулов В. А. Гидрогеологические исследования при изысканиях массива кристаллических пород для подземного строительства в южной части Енисейского кряжа // Инженерные изыскания. 2012. № 11. С. 52—59.
28. Кочкин Б. Т., Солодов И. Н., Ганина Н. И., Рекунов М. Л., Тарасов Н. Н., Шугина Г. А., Шулик Л. С. Геохимические особенности рудовмещающей среды на месторождениях урана Хиагдинского рудного поля // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 5. С. 349—362. DOI: 10.7868/S0016777017050033.
29. Лисицин А. К. Гидрогеохимия рудообразования (на примере экзогенных эпигенетических урановых руд). — М. : Недра, 1975. 248 с.
30. Минеральные воды южной части Восточной Сибири / Под общ. ред. В. Г. Ткачук и Н. И. Толстихина. Т. 1. — М.—Л. : Изд-во АН СССР, 1961. 347 с.

Информация об авторе

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

Библиографическое описание статьи

Кочкин Б. Т. Месторождения урана под экраном многолетнемерзлых пород как природная аналогия геологического хранилища на период предстоящего похолодания климата // Радиоактивные отходы. 2023. № 3 (24). С. 103—116. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-3-103-116.

URANIUM DEPOSITS CAPPED BY PERMAFROST SEEN AS NATURAL ANALOGUES OF A GEOLOGICAL REPOSITORY CONSIDERING THE UPCOMING CLIMATE COOLING PERIOD

Kochkin B. T.^{1,2}

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 June 3, 2023

The article evaluates the conditions at the site proposed for a geological radioactive waste (RW) disposal facility (DGR) considering the scenario of the upcoming climate cooling. The evaluation is based on the analogy method with the comparison made against modern conditions explored at uranium deposits confined to the permafrost zone. The analogy is based on modern hydrogeological data from the Transbaikalia deposits explored using the underground borehole leaching method. This method yields no significant disturbance of the groundwater flow patterns. The study provides comparative analysis of climatic, geological and hydrogeological characteristics of the DGR siting area in the Krasnoyarsk Territory and those of uranium deposits in Transbaikalia. The limitations of this method have been validated. The paper highlights the main characteristics of groundwater flows in sub-permafrost aquifers. The results obtained may prove to be helpful in the development of models demonstrating radionuclide transport from the DGR developed at the Yeniseiskiy site.

Keywords: radioactive waste, radioactive waste disposal facility, safety assessment, natural analogues, permafrost zone.

Financial support

The article has been sponsored under the IGEM RAS's State Assignment by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

References

1. Boldyrev K. A., Sobolev D. A., Kochkin B. T., Barinov A. S. Ispol'zovanie rezul'tatov izucheniya prirodnykh i istoricheskikh analogov dlya otsenki povedeniya materialov bar'erov bezopasnosti pri obosnovanii bezopasnosti zakhroneniya radioaktivnykh otkhodov [Studies of natural and historical analogues and the use of their findings in the assessment of safety barrier behavior under the safety demonstration of radioactive waste disposal facilities]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2022, no. 3 (20), pp. 72–96. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-72-96.
2. Cramer J. J., Vilks P., Larocque J. P. A. Near-field analog features from the Cigar Lake uranium deposit. *Natural analogues in radioactive waste disposal*. — Springer, Dordrecht, 1987. Pp. 59–72.
3. Laverov N. P., Petrov V. A., Poluektov V. V. Nasilimov R. M., Khammer Y., Burmistrov A. A., Shchukin S. I. Uranovoye mestorozhdeniye Antey — prirodnyy analog khranilishcha OYAT i podzemnaya geodinamicheskaya laboratoriya v granitakh [The Antey uranium deposit considered as a natural analogue of an SNF repository and an underground geodynamic laboratory in granite formations]. *Geologiya rudnykh*

mestorozhdeniy — Geology of Ore Deposits, 2008, vol. 50, no. 5, pp. 387–413.

4. Zakhronenie radioaktivnykh otkhodov. Printsipy, kriterii i osnovnye trebovaniya bezopasnosti. NP-055-14 [Radioactive Waste Disposal. Principles, Criteria and Basic Safety Requirements. NP-055-14]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' — Nuclear and Radiation Safety*, 2015, no. 4 (78), pp. 59–87.
5. Radioactive Waste Management Committee. International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. Version 3.0. NEA/RWM/R(2019).
6. Kochkin B. T., Bogatov S. A., Barinov A. S., Saveleva E. A., Utkin S. S. Ehvol'yutsiya geosfery na territorii razmeshcheniya PGZRO v Nizhnekanskom massive [Evolution of geosphere at the site in Nizhnekanskiy massif meant for deep geological disposal]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 1 (10), pp. 56–65. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-56-65.
7. Development of a Common Framework for Addressing Climate and Environmental Change in Post-Closure Radiological Assessment of Solid Radioactive Waste Disposal. IAEA-TECDOC-1904. Vienna, IAEA, 2020. 194 p.
8. Kochkin B. T. Dolgosrochnyy prognoz klimaticheskikh izmeneniy v rayone razmeshcheniya khranilishcha vysokoradioaktivnykh otkhodov (uchastok Yeniseyskiy, Krasnoyarskiy kray) [Long-Term Forecast of Climate Changes in the Location Area of Repository for High-Level Radioactive Wastes]. *Geokologiya. Inzhenernaya geologiya*.

- Gidrogeologiya. Geokriologiya — Geoekologiya*, 2015, no. 2, pp. 52—65.
9. Boldyreva D. A., Vasilishin A. L., Ponizov A. V., Felitsyn M. A., Borisova O. K., Panin A. V. Otsenka klimaticheskoy evolyutsii v rayonakh razmeshcheniya punktov glubinnogo zakhroneniya zhidkikh radioaktivnykh otkhodov dlya obosnovaniya dolgovremennoy bezopasnosti [Assessment of Climate Evolution in Areas of Liquid Radioactive Waste Deep Disposal Facilities for Justification of Long-Term Safety]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' — Nuclear and radiation safety*, 2019, no. 3 (93), pp. 36—46.
10. Kochkin B. T., Bogatov S. A., Saveleva E. A. Ehvol'yutsiya PGZRO v Nizhnekanskom massive pod vozdeistviem klimaticheskikh faktorov [Evolution of the Repository in Nizhnekanskiy Massif under the Influence of Climatic Factors]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2021, no. 1 (14), pp. 63—75. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-63-75.
11. Yershov E. D., Parmuzin S. Yu., Lisitsyna O. M. Problemy zakhroneniya radioaktivnykh otkhodov v kriolitozone [Challenges associated with radioactive waste disposal in permafrost]. *Geoekologiya — Geoecology*, 1995, no. 5, pp. 20—36.
12. Kochkin B. T. Otsenka gidrogeologicheskikh usloviy pri vybore mesta dlya zakhroneniya otverzhdennykh radioaktivnykh otkhodov [Assessment of hydrogeological conditions during the selection of a disposal site for solidified radioactive waste]. *Geoekologiya — Geoecology*, 1997, no. 3, pp. 68—78.
13. *Dobycha urana podzemnym vyshchelachivaniyem v kriolitozone* [Uranium mining by underground leaching in permafrost]. Edt. by I. N. Solodov. Moscow, ZetaPrint Publ., 2022. 183 p.
14. Solodov I. N., Nesterova M. V. Uglekislyye podzemnyye vody — rudosokhranyayushchiy faktor na uranovykh mestorozhdeniyakh Khiagdinskogo rudnogo polya (Respublika Buryatiya) [Carbonic acid groundwater as an ore-preserving factor in uranium deposits of the Khiagda ore field (Republic of Buryatia)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii — Geology of Ore Deposits*, 2022, vol. 64, no. 1, pp. 151—162. DOI: 10.31857/S0016777022010087.
15. Yershov E. D. *Obshchaya geokriologiya* [General geocryology]. Moscow, Izd-vo MGU Publ., 2002. 682 p.
16. *Paleoklimaty i paleolandshafty vnetropicheskogo prostranstva Severnogo polushariya. Pozdnyy pleystotsen — golotsen* [Paleoclimates and paleolandscapes of the extratropical area of the Northern Hemisphere. Late Pleistocene — Holocene]. Atlas monograph. Edt. by A. A. Velichko. Moscow, GEOS Publ., 2009. 120 p.
17. Velichko A. A. Stanovleniye sovremennoy landshaftnoy obolochki Zemli [Formation of the modern landscape of the Earth]. *Priroda — Nature*, 2012, no. 1, pp. 78—87.
18. Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, 2014. 151 p.
19. Malkovskiy V. I., Usacheva A. A. Vliyaniye potentsial'nogo oledeneniya na bezopasnost' podzemnogo khranilishcha radioaktivnykh otkhodov na uchastke "Eniseiskii" (Krasnoyarskii krai) [Influence of potential glaciation on the safety of an underground repository for radioactive waste at the Yeniseyskiy site (Krasnoyarsk region)]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2023, no. 1 (22), pp. 58—69. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-58-69.
20. *Materialy obosnovaniya litsenzii na razmeshchenie i sooruzhenie ne otnosyashchegosya k yadernym ustanovkam punkta khraneniya RAO, sozdavaemogo v sootvetstviy s proektnoi dokumentatsiei na stroitel'stvo ob'ektov okonchatel'noi izolyatsii RAO (Krasnoyarskii krai, Nizhne-Kanskii massiv) v sostave podzemnoi issledovatel'skoi laboratorii (vklyuchaya materialy otsenki vozdeistviya na okruzhayushchuyu sredu)*. [Siting and construction license application for a RW disposal facility not assigned to the category of nuclear installations developed in accordance with the design documentation for the construction of facilities designed for the final RW disposal (Krasnoyarsk Territory, Nizhnekanskiy massif) as part of an underground research laboratory (including the environmental impact assessment materials)]. Volumes I—IV, Federal State Unitary Enterprise NO RAO. Moscow, 2015. — URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/> (accessed on: 01.10.2018).
21. *Natsional'nyi atlas Rossii. T. 2. Karta teplovogo potoka M. 1:30 000 000*. [National Atlas of Russia. Vol. 2. Heat flow map M. 1:30 000 000]. — URL: https://geographyofrussia.com/wp-content/uploads/2015/01/70_1.jpg (accessed on 19.04.2023).
22. Karaulov V. A., Zablotsky K. A. *Geologicheskoe doizuchenie (otsenoch'naya stadiya) gornogo massiva uchastka «Eniseiskii» dlya obosnovaniya rasshireniya intervala zakhroneniya radioaktivnykh otkhodov do glubin 450—525 metrov (+5—–70 m BS) ob'ektov okonchatel'noi izolyatsii radioaktivnykh otkhodov (Krasnoyarskii krai, Nizhne-Kanskii massiv)* [Additional geological study (assessment stage) of the Yeniseyskiy site rock mass substantiating the expansion of the radioactive waste disposal interval to the depths of 450—525 meters (+5—–70 m BS) considering the facilities designed for the final RW disposal (Krasnoyarsk Territory, Nizhnekanskiy massif). Krasnoyarsk, JSC Krasnoyarskgeologiya Publ., 2015.
23. Rumynin V. G. Opyt izucheniya glinistykh tolshch i kristallicheskikh massivov kak geologicheskikh sred dlya okonchatel'noi izolyatsii RAO [Experience

of Studying the Clay Masses and Crystalline Core-areas as Geological Environment for RW Final Isolation]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2017, no. 1, pp. 44–55.

24. *Uran rossiyskikh nedr* [Uranium from the Russian Subsoil]. Edt. by Mashkovtsev G. A. Moscow, VIMS Publ., 2010. 855 p.

25. Tarasov N. N., Kochkin B. T., Velichkin V. I., Doynikova O. A. Mestorozhdeniya Khiagdinskogo uranovorudnogo polya (Buryatiya): usloviya obrazovaniya i faktory rudokontrolya [Deposits of the Khiagda uranium ore field (Buryatia): formation conditions and ore control factors]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii — Geology of Ore Deposits*, 2018, vol. 60, no. 4, pp. 392–400. DOI: 10.1134/S0016777018040056.

26. Rasskazov S. V. et al. *Stratigrafiya kaynozoya Vitimskogo ploskogor'ya: Fenomen dlitel'nogo riftogeneza na yuge Vostochnoy Sibiri* [Cenozoic stratigraphy of the Vitim plateau: the phenomenon of long-term rifting in the south of Eastern Siberia]. Novosibirsk, Academic publishing house Geo Publ., 2007. 193 p.

27. Ozersky A. Yu., Karaulov V. A. *Gidrogeologicheskiye issledovaniya pri izyskaniyakh massiva kristallicheskikh porod dlya podzemnogo stroitel'stva v*

yuzhnoy chasti Yeniseyskogo kryazha [Hydrogeological Investigations for Engineering Surveys for Underground Construction within a Crystalline Rock Massif in the Southern Part of the Yeniseiskiy Ridge]. *Inzhenernye izyskaniya — Engineering Surveys*, 2012, no. 11, pp. 52–59.

28. Kochkin B. T., Solodov I. N., Ganina N. I., Rekun M. L., Tarasov N. N., Shugina G. A., Shulik L. S. Geokhimicheskiye osobennosti rudovmeshchayushchey sredy na mestorozhdeniyakh urana Khiagdinskogo rudnogo polya [Geochemical features of the ore-bearing environment in the uranium deposits of the Khiagda ore field]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii — Geology of Ore Deposits*, 2017, vol. 59, no. 5, pp. 349–362. DOI: 10.7868/S0016777017050033.

29. Lisitsin A. K. *Gidrogeokhimiya rudoobrazovaniya (na primere ekzogennykh epigeneticheskikh uranovykh rud)* [Hydrogeochemistry of ore formation (based on the case study of exogenous epigenetic uranium ores)]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 248 p.

30. *Mineral'nyye vody yuzhnoy chasti Vostochnoy Sibiri* [Mineral waters in the Southern Part of Eastern Siberia]. Vol. 1. Moscow — Leningrad, AN SSSR Publishing House Publ., 1961. 347 p.

Information about the author

Kochkin Boris Timofeevich, Doctor of Science, Principal scientist, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetnyi lane, Moscow, 119017, Russia); Senior scientist, Nuclear Safety Institute of RAS (52, Bolshaya Tulsкая st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: btk@igem.ru.

Bibliographic description

Kochkin B. T. Uranium Deposits Capped by Permafrost Seen as Natural Analogues of a Geological Repository Considering the Upcoming Climate Cooling Period. *Radioactive Waste*, 2023, no. 3 (24), pp. 103–116. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-3-103-116. (In Russian).