

## ЭВОЛЮЦИЯ ГЕОСФЕРЫ НА ТЕРРИТОРИИ РАЗМЕЩЕНИЯ ПГЗРО В НИЖНЕКАНСКОМ МАССИВЕ

Б. Т. Кочкин<sup>1,2</sup>, С. А. Богатов<sup>2</sup>, А. С. Баринов<sup>2</sup>, Е. А. Савельева<sup>2</sup>, С. С. Уткин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

<sup>2</sup>Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 5 февраля 2020 г.

*Идентифицированы внешние геологические воздействия, которые будут определять долгосрочную эволюцию системы изоляции РАО на участке «Енисейский». Оценено текущее состояние их изученности и определены важнейшие направления исследований: изучение тектонических движений и деформаций пород, а также сейсмический мониторинг.*

**Ключевые слова:** радиоактивные отходы, глубинное захоронение РАО, эволюция геосферы, ОСП, геологические исследования.

### Введение

При обосновании безопасности ПГЗРО, в соответствии с Российскими нормативными документами и международными рекомендациями, необходимо выполнение прогнозных модельных расчетов на период потенциальной опасности размещаемых радиоактивных отходов (РАО). Так, согласно [1] «Система захоронения РАО, то есть совокупность природного геологического образования, сооружений... и захороненных РАО, удовлетворяет требованиям безопасности, если в течение всего периода потенциальной опасности захороненных РАО радиационное воздействие на население ограничивается уровнями, регламентированными нормами радиационной безопасности».

Геосфера как природное геологическое образование характеризуется совокупностью факторов, которые будут влиять на ее эволюцию (постоянно протекать или случаться) в период потенциальной опасности РАО, т. е. сотни тысяч и миллионы лет.

Цель статьи — сформулировать направления исследований, необходимые для достоверного обоснования эволюции геосферной части системы изоляции на участке «Енисейский».

### Особенности, события, процессы (ОСП) и их категоризация

При выполнении обоснования долговременной безопасности для описания различных факторов, потенциально способных оказать влияние на безопасность системы захоронения, используется объединенное понятие — ОСП (особенность, событие, процесс или FER — feature, event, process в англоязычной литературе). В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ [2] эти термины следует понимать следующим образом. Особенности или свойства (features) — объекты, структуры или условия, которые имеют потенциал для воздействия на надежность системы изоляции. Событие (event) — природное или

антропогенное явление, которое может существенным образом воздействовать на надежность системы изоляции и проявиться в течение интервала времени, который короче периода прогноза. Процесс (process) — природное или вызванное человеком явление, которое может существенным образом воздействовать на надежность системы изоляции и действует в течение всего периода прогноза или значительной его части.

В мире проделана огромная работа по анализу безопасности геологических хранилищ и созданию баз ОСП. Некоторые рассчитаны на определенный проект хранилища или на конкретный тип вмещающих пород, другие носят универсальный характер. Аналогичная работа ведется и в России. Так, в работах ИГЕМ РАН [3–5] и ИБРАЭ РАН [6] рассмотрены ОСП, в частности, под проект ПГЗРО в условиях участка «Енисейский».

Комиссией по обращению с радиоактивными отходами АЯЭ ОБСЕ, начиная с 1993 года, разрабатывается универсальный международный каталог ОСП. Последняя (третья) версия этого каталога выпущена в 2019 году, она включает 268 наименований [7]. Этот каталог на настоящий момент считается наиболее полным и дает возможность формирования набора ОСП для любых конкретных проектов (рис. 1). Он строится на основе учета факторов, которые воздействуют на подсистемы хранилища. Классификация учитывает все возможные взаимодействия, прямые и обратные связи, что позволяет определить диапазоны применения тех или иных ОСП для конкретных проектов захоронения и сопоставить их с ОСП из универсального каталога. Каталог включает 5 групп факторов (рис. 1). Геологические ОСП непосредственно обозначены в группе Внешних факторов (п/гр. 1.2) и составляют целую группу Геосферных факторов (гр. 4). На геосферные

условия, в свою очередь, влияют Климатические факторы (п/гр. 1.3) и Будущие действия людей (п/гр. 1.4). Определенное влияние на миграционные процессы в геосфере окажут внутренние факторы (гр. 2 и 3), связанные с матрицей (состав радионуклидов) или с процессами в хранилище (внутри системы инженерных барьеров безопасности — ИББ).

ОСП, представленные в каталоге АЯЭ ОБСЕ, включают те факторы, которые необходимы для наполнения миграционных моделей конкретными значениями, и те, которые необходимы для описания эволюционных изменений параметров в миграционных моделях. Такое деление в какой-то мере соответствует российским нормативным документам. Так, в документе [1] определено, что: «Окончательные... *перечни исходных событий*, учитываемых для оценки долговременной безопасности системы захоронения РАО, должны быть установлены и обоснованы в проекте...» и в Отчете по обоснованию безопасности (ООБ) ПГЗРО.

Согласно Приложению № 4 [1] перечень исходных событий, учитываемых при разработке сценариев в оценке долговременной безопасности системы глубинного захоронения твердых радиоактивных отходов, включает:

1. Внешние воздействия природного и техногенного происхождения, свойственные району размещения ПГЗРО, в том числе изменения гидрогеологического режима, активизация тектонических процессов, изменения сейсмического режима. При анализе внешних воздействий необходимо рассмотреть катастрофические, включая землетрясение выше МРЗ.

2. Непреднамеренное вторжение человека, в том числе при проведении буровых и горных работ, различных видах промышленной деятельности.

3. Внутренние воздействия, которые включают опасные процессы в системе ИББ.



Рис. 1. Схема каталога ОСП АЯЭ ОБСЕ

В перечень внешних геологических ОСП включаются те из них, которые связаны с геологической средой и проявят себя главным образом в дальнем поле подземного сооружения. В некоторых случаях они могут повлиять на систему ИББ (табл. 1).

**Таблица 1. Геологические ОСП, определяющие эволюцию системы (по [7])**

Номер и название ОСП
<b>1. Внешние факторы</b>
<b>1.2 Геологические факторы</b>
1.2.1: Тектонические движения.
1.2.2: Горообразование
1.2.3: Деформация пород (упругая, пластичная или хрупкая)
1.2.4: Сейсмическая активность
1.2.5: Магматическая или вулканическая активность
1.2.6: Метаморфизм
1.2.7: Гидротермальная активность
1.2.8: Региональная эрозия (денудация) и осадконакопление (седиментация).
1.2.9: Диагенез
1.2.10: Почвообразование
1.2.11: Растворение солей
1.2.12: Гидрологические и гидрогеологические последствия геологических изменений.
1.2.13: Геоморфологические последствия геологических изменений
1.2.14: Климатические последствия геологических изменений

Первоначальной задачей анализа ОСП является их идентификация — составление их исчерпывающего списка, охватывающего весь возможный диапазон факторов, потенциально значимых для оценки долговременного состояния системы захоронения на конкретном участке. Следующим этапом является отбор (скрининг) наиболее важных ОСП, которые по отдельности или в сочетании с другими ОСП определяют долгосрочную надежность конкретного ПЗРО.

При идентификации ОСП, которые будут определять сценарии эволюции системы захоронения и одновременно действительны для Енисейского участка, можно выделить те внешние ОСП, вероятность проявления которых в регионе в прогнозируемом будущем крайне мала. Так, еще на этапе региональных изысканий места размещения ПЗРО на территории Енисейского кряжа [8] были практически исключены сценарии эволюции системы, связанные с особо сильными землетрясениями, вулканизмом, гидротермальной деятельностью, денудацией

перекрывающей толщи пород, высокой скоростью поступления подземных вод. Сценарии типа непреднамеренного проникновения человека при поисках полезных ископаемых, террористических актов, ведения военных действий, падения метеорита и т. п. требуют специально, не относящегося к геологическим факторам, рассмотрения.

Для дальнейшего анализа выбраны главным образом те ОСП, которые будут определять сценарии, связанные с эволюцией геологических условий, определяющих миграцию радионуклидов через геосферу (п/гр. 1.2) по классификации АЯЭ ОБСЕ [7] (см. табл. 1). Водная миграция радионуклидов признается в качестве наиболее вероятного 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. Неопределенности в прогнозе эволюции каждого из отдельных геосферных факторов будут определять разные сценарные варианты таких расчетов.

Характеристика ОСП дана в порядке, представленном в каталоге АЯЭ ОБСЕ [7]. Оценка значимости ОСП в отношении их влияния на безопасность получена экспертным путем.

### Внешние геологические факторы, действительные для участка «Енисейский» (ОСП 1.2)

Внешние геологические факторы — это факторы, связанные с долгосрочными процессами и событиями, вытекающими из общей геологической обстановки, и влияющие на эффективность и безопасность системы захоронения.

На данном этапе из рассмотрения могут быть исключены следующие факторы: Горообразование (1.2.2), Магматическая или вулканическая активность (1.2.5), Метаморфизм (1.2.6), Гидротермальная активность (1.2.7), т. е. процессы, вероятность проявления которых на участке «Енисейский», исходя из общих геологических знаний, рассматривается как ничтожная. Также исключены процессы, не относящиеся к среде кристаллических пород, которые развиты в районе размещения: Диагенез (1.2.9), Почвообразование (1.2.10), Растворение солей (1.2.11).

#### ОСП 1.2.1: Тектонические движения

Движение литосферных плит, которые представляют самый внешний слой Земли, протекают за счет конвекционного перемещения масс в подстилающей мантии. Эти движения дают

начало крупномасштабным процессам продолжительностью в миллионы лет, таким как дрейф континентов, образование гор (орогения) или рифтов, разномасштабным деформациям земной коры, включая образование впадин, разломов, складок и других геологических структур.

В масштабе геологических районов процессы разнонаправленных вертикальных движений земной коры (подъем/опускание) влияют на изменение местной гидродинамики. Эти изменения отразятся в *смещении границ областей питания и разгрузки*, а также в *вертикальной дифференциации уровня подземных вод по площади* (связь с ОСП 1.2.12). В регионах незначительной новейшей постплатформенной тектонической активизации, к которым относится и Енисейский кряж, подъем возвышенных участков сопровождается опусканием сопряженных низменностей и впадин из-за дифференцированного характера движений соседних блоков (связь с ОСП 1.2.13).

Вертикальные движения земной коры — постоянно действующий фактор. Они носят прерывистый и обратимый характер, из-за чего их средняя скорость сильно зависит от периода осреднения. Данные о скоростях вертикальных движений в районе ПГЗРО известны и неоднократно приводились в литературе [9—11]. Эти скорости даже для минимальных периодов осреднения (голоцен) не превышают 1 мм/год, а для периодов в миллионы лет составляют 0,08—0,09 мм/год. Влияние процесса вертикальной дифференциации геологических блоков на параметры миграции подземных вод зависит от реальной скорости и направления тектонических движений. Увеличение разницы уровней подземных вод между областями питания и разгрузки приведет к ускорению водообмена, что даст негативный эффект в оценке безопасности. Такой прогноз для района участка «Енисейский» дан в работе [12]. Согласно ему значимость процесса вертикальной дифференциации блоков можно оценить как среднюю.

Кроме вертикальных, для земной коры характерны горизонтальные смещения соседних блоков по разломам. Они установлены и для района ПГЗРО. Горизонтальные смещения опасны из-за потенциальной возможности деформаций в системе ИББ. Значимость процесса горизонтальной дифференциации блоков будет зависеть от реальной скорости и направления тектонических движений по трещинным зонам внутри блока размещения. По данным анализа топографических карт на расстоянии 1 км к северу от намеченной площадки выявлен Итатский (Шумихинский) правый сдвиг, протягивающийся в

северо-западном направлении вдоль р. Шумиха. По смещениям водотоков по обе стороны от него (до 800—900 м за последние 2,5 млн лет) оценена скорость — 0,4—0,5 мм/год [13]. За короткий промежуток инструментальных измерений, выполнявшихся в районе ПГЗРО (2010—2015 гг.), установлены цикличные смещения пунктов наблюдений по обе стороны р. Енисей. Полученные данные недостаточны для подтверждения отсутствия потенциальной опасности данного ОСП и необходимо проведение систематических наблюдений [14, 15].

### ОСП 1.2.3: Деформация пород (упругая, пластичная или хрупкая)

Протекающие в земной коре тектонические движения реализуются в виде разного рода деформаций, преимущественно вдоль разрывных нарушений, не вызывая резких смещений (так называемый крип) и, соответственно, землетрясений. Особенность активных разломов состоит в том, что вдоль этих разрывных структур земной коры тектонические процессы проявлялись в недалеком геологическом прошлом, продолжают сейчас и могут возобновиться в будущем. Разломы, заложенные или проявлявшие свою активность на новейшем тектоническом этапе развития земной коры (последние 26 млн лет), называются «новейшими». Смещения по активным разломам могут быть следствием омоложения древних разломов или результатом вновь образуемых трещин [16].

Характер активности «асейсмических» разломов определяется устойчивостью или обратимостью направления смещения, суммарной амплитудой смещения и проницаемостью для флюидов [17]. Значительные амплитуды отражаются в деформациях рельефа (связь с ОСП 1.2.13). Вдоль активных разломов за счет крипа в породах медленно накапливаются механические деформации, которые в перспективе могут привести к разрушению ИББ хранилища. Асейсмические разломы, оставаясь ослабленными зонами в земной коре, обладают повышенной гидравлической проницаемостью в сравнении с вмещающими их монолитными породами или залеченными древними разломами. В долгосрочной перспективе проницаемые активные разломы могут существенно повлиять на загрязнение окружающей среды.

В настоящее время отсутствуют результаты исследований, позволяющие однозначно подтвердить или опровергнуть наличие активных разломов в пределах площадки или за ее пределами, при том, что современные движения в

районе фиксируются инструментально методами спутниковой геодезии и повторного высокоточного нивелирования [11, 14, 15]. Данные геоморфологических работ [8, 13, 18, 19] позволяют отнести некоторые разломы района к активным на новейшем тектоническом этапе.

Значимость этого фактора для блока размещения можно оценить как высокую, но опасность деформаций в ИББ может быть существенно снижена при размещении упаковок РАО вне зон повышенной трещиноватости.

### *ОСП 1.2.4: Сейсмическая активность*

Сейсмичность связана с постоянно протекающими в земной коре процессами тектонических движений. Энергия, которая накапливается в породах вдоль разломов, иногда высвобождается в виде землетрясений. Сейсмические события наиболее распространены в тектонически активных зонах, обычно вдоль границ литосферных плит, но известны и пояса внутриплитной сейсмичности. Сейсмические события в наибольшей мере проявляются на *активных разломах*.

Другой механизм высвобождения тектонической энергии связан с действиями человека (наведенная сейсмичность), например, закачкой жидкости в глубокие горизонты. Наведенные землетрясения, обычно относительно слабые, могут происходить как в естественных сейсмически активных областях, так и в районах, характеризующихся низкой фоновой сейсмичностью.

Сейсмогенные процессы, вызывающие землетрясения, могут стать причиной аварийных разрушений в системе ИББ в долгосрочной перспективе.

Регион Нижнеканского массива относится к периферии пояса внутриплитной сейсмичности. Выполненные специализированные исследования показали, что выявленные в пределах участка и на его периферии линеаментные зоны не являются источниками сейсмической активности и отражают волны удаленных землетрясений. Оценка максимальной интенсивности (МРЗ) этих сейсмических воздействий на площадку показала, что она может достигать 7,3 баллов по шкале МСК-64 в привязке к средним грунтам. Это означает, что сейсмические сотрясения подземных сооружений ПГЗРО будут еще слабее и окажут ограниченное влияние на безопасность последнего. Общий уровень сейсмичности не выходит за пределы, установленные действующими нормативными документами [1, 20, 21].

Однако из-за неопределенностей в прогнозе сейсмичности на периоды более 10 тыс. лет

нельзя исключать вероятность очень сильных землетрясений в долгосрочном плане с возникновением новых тектонических смещений.

### *ОСП 1.2.8: Региональная эрозия (денудация) и осадконакопление (седиментация)*

Денудация (эрозия) поверхности — процесс, который связан с подъемом территории. На сопряженных территориях, испытывающих погружение и на которые сносится разрушенный материал, происходит накопление осадков. Оба процесса ведут к преобразованиям рельефа (связь с ОСП 1.2.13).

Интенсивность денудации и сопряженной с ней седиментации в соседних впадинах зависит также от климата (ОСП 1.3) и состава пород на поверхности (ОСП 4.1). Денудация поверхности района ПГЗРО по другой причине, например, *в результате продвижения ледника*, маловероятна [22].

По имеющимся данным о скоростях подъема территории [8, 10, 23] перспектива значительного *размытия перекрывающей толщи* для хранилища, размещаемого на участке «Енисейский», который локализован на водораздельном пространстве, практически исключена. Соответственно, существенного накопления осадков (седиментации) в сопряженных впадинах также не ожидается.

Дополнительные исследования этих процессов для расчетов по сценарным вариантам не требуются.

### *ОСП 1.2.12: Гидрологические и гидрогеологические последствия геологических изменений*

Крупномасштабные геологические движения (ОСП 1.2.1) могут оказать влияние на региональный поток подземных вод, в том числе через перераспределение давления в них. За изменениями гидрогеологических условий, вызванных тектоническими движениями, обычно следует *процесс изменений в системе порода—вода*. Требуются специальные исследования для обоснованного моделирования этого процесса.

### *ОСП 1.2.13: Геоморфологические последствия геологических изменений*

Существенных изменений в рельефе района ПГЗРО не ожидается по причине незначительной вертикальной дифференциации геологических блоков в районе ПГЗРО и слабой активности эрозионных и седиментационных процессов. Тем не менее изменения в высотных отметках

поверхности отразятся перераспределением напоров вод в подземных горизонтах. Влияние процесса дифференциации рельефа территории ПГЗРО на миграцию радионуклидов определено в соответствующем прогнозе [12]. Дополнительные исследования для расчетов сценарных вариантов не требуются.

#### ОСП 1.2.14: Климатические последствия геологических изменений.

Известно, что существенные изменения климата северного полушария за последние 15 миллионов лет произошли в результате подъема пояса таких горных стран, как Альпы, Тянь-Шань, Саяны и других, расположенных южнее Европы и Сибири. Оно выразилось в общем иссушении климата и, как следствие, отсутствии ледников в южных районах этих территорий в периоды последних оледенений [24, 25]. Существенных горообразовательных процессов, в соответствии с прогнозом безопасности, не ожидается. Климатические последствия возможных геологических изменений могут рассматриваться в специальных региональных моделях.

#### Задачи дальнейших исследований

Начальные этапы эволюции хранилища после его закрытия характеризуются кратковременными интенсивными процессами, развивающимися в результате технического вмешательства в природную среду: выемкой вмещающих пород, размещением тепловыделяющих ВАО в горных выработках и обустройством изолирующих барьеров, включающими, в частности, формирование нарушенной зоны пород, осушение и последующее восстановление обводненности вмещающих пород и другие процессы в ближнем поле ПГЗРО. Эти процессы, определяющие краткосрочную эволюцию хранилища преимущественно до его «закрытия», мы намеренно исключили из рассмотрения, поскольку за их развитием можно будет наблюдать, контролировать их или уверенно прогнозировать (например, последствия прогрева вмещающей среды). В долгосрочной перспективе эволюция определяется главным образом влиянием внешних условий, к которым, как показано выше, относятся геологические факторы.

Методология использования ОСП для планирования исследований, нацеленных на разработку оценки долгосрочной безопасности (ОДБ) системы изоляции РАО на конкретном участке, предполагает, во-первых, установление

действительности ОСП для участка и, во-вторых, оценку влияния (значимости) ОСП на ход эволюции. Обе процедуры были представлены в предыдущем разделе.

В табл. 2 даны обобщенные сведения по геологическим ОСП, способным повлиять на эволюцию системы захоронения в долгосрочной перспективе. Если ОСП имеет низкую значимость, его изучение можно исключить из перечня первоочередных. Решение об исключении/включении процессов со средней и высокой значимостью неоднозначно и зависит, прежде всего, от технико-экономических условий и состояния проекта, нормативных требований и готовности аппарата моделирования.

**Таблица 2. Выбранные особенности, события и процессы, связанные с геологической средой участка «Енисейский» и определяющие эволюцию системы изоляции**

Влияние на безопасность ПГЗРО, размещаемого на участке «Енисейский»	Неопределенности в данных и задачи первоочередных исследований
*1.2 Геологические факторы	
1.2.1: Тектонические движения	
Средняя значимость для вертикальных движений крупных блоков в районе	Отсутствуют обоснованные данные о реальных амплитудах современных горизонтальных перемещений
1.2.3 Деформация пород	
Высокая значимость для блока размещения	Отсутствуют обоснованные данные о наличии, реальном положении и современных скоростях смещений по трещинным зонам внутри блока размещения
1.2.4 Сейсмическая активность	
Ограниченное влияние	Неопределенности в прогнозе сейсмичности на периоды более 10 тыс. лет. Исследование техногенной сейсмичности от закачки жидких РАО и общий сейсмический мониторинг
1.2.8 Региональная эрозия и осадконакопление	
Влияние минимально	Дополнительные исследования не требуются
1.2.12 Гидрологические и гидрогеологические последствия	
Влияние минимально	Требуются специальные исследования процессов в системе порода-вода
1.2.13 Геоморфологические последствия	
Средняя значимость	Дополнительные исследования не требуются
1.2.14 Климатические последствия	
Влияние минимально	Специальный климатический прогноз

\* Номер в каталоге ЕАЯ ОБСЕ.

### Выводы

В перечень важнейших направлений исследований сценарных геосферных ОСП предлагается включить следующее:

- изучение тектонических движений, особенно горизонтальных смещений по разломам в районе ПГЗРО;
- изучение деформаций пород, особенно вдоль зон повышенной трещиноватости в блоке размещения;
- сейсмический мониторинг в районе.

Исследования указанных ОСП следует отнести к первоочередным, некоторые из них уже выполняются или запланированы на ближайшее время. Большинство исследований предусматривается путем проведения долговременных наблюдений.

### Литература

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

2. Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности. Терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты. — Вена, МАГАТЭ, 2007.

3. Геологические работы и представляемые данные для оценки безопасности объекта окончательной подземной изоляции РАО (в т. ч. подземной лаборатории) на площадке участка Енисейский (Нижнеканский массив) в процедуре окончательного утверждения площадки: Отчет о НИР, госконтракт № Н.4д.21.04.09.1219 от 11.06.2009 / М.: ИГЕМ РАН, 2009.

4. Подготовка материалов в рамках разработки основных положений по обоснованию долговременной безопасности ПГЗРО, создаваемого на участке «Енисейский» в Нижнеканском кристаллическом массиве : Отчет, инв № . М.: ИГЕМ РАН, 2014.

5. Кочкин Б. Т. Принцип консерватизма в оценке безопасности могильников высокорadioактивных отходов // Геoэкология. 2012. № 5. С. 436–448.

6. Обоснование номенклатуры параметров сценариев воздействия природных и техногенных процессов в условиях размещения объекта на Нижнеканском массиве : Отчет о НИР (итоговый), инв. № 4786-319/1078-Д-1 / рук. И. И. Линге. М., ИБРАЭ РАН, 2016. 136 с.

7. International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: Version 3.0 // Radioactive Waste Management. NEA/RWM/R(2019) 1 July 2019 (www.oecd-nea.org).

8. Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО / Материалы КНТС. СПб. : Горно-химический комбинат, НПО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», 1999. 182 с.

9. Андерсон Е. Б., Белов С. В., Камнев Е. Н. и др. Подземная изоляция радиоактивных отходов. М. : Изд-во «Горная книга», 2011. 558 с.

10. 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.

11. Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Сеелев И. Н. Изучение современной геодинамики Нижнеканского массива для безопасного захоронения радиоактивных отходов // Атомная энергия. 2016. Т. 121. Вып. 3. С. 157–160.

12. Кочкин Б. Т., Мальковский В. И. Количественная оценка долгосрочной эволюции условий миграции радионуклидов из могильника на участке Енисейский (Красноярский край) // Геoэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2016. № 5. С. 401–411.

13. 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.

14. 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.

15. Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И., Татаринова Т. А. Подземная исследовательская лаборатория: задачи геодинамических исследований // Радиоактивные отходы. 2019. № 1. С. 77–89.

16. Николаев Н. И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. М. : Недра, 1988. 491 с.

17. Никонов А. А. Терминология и классификация сейсмогенных нарушений рельефа // Геоморфология. 1995. № 1. С. 4–10.

18. 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.

19. Несмеянов С. А., Воейкова О. А. Активные разрывы в зоне сочленения юга Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты и их значимость для строительства // Геoэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2008. № 3. С. 197–213.

20. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной

энергии (НП-064-17). Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30 ноября 2017 г. № 514.

21. Руководство по безопасности. Оценка сейсмической опасности участков размещения ядерно и радиационно опасных объектов на основании геодинамических данных (РБ-019-01). Утв. постановлением Госатомнадзора России от 28 декабря 2001 г. № 16 // Вестник Госатомнадзора России. 2002. № 1. С. 33–39.

22. Кочкин Б. Т. Долгосрочный прогноз климатических изменений в районе размещения хранилища высокоактивных отходов (участок Енисейский, Красноярский край) // Геоэкология.

Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2015. № 2. С. 52–65.

23. 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. 2006. Т. XI. С. 8–64.

24. Величко А. А. Становление современной ландшафтной оболочки Земли // Природа. 2012. № 1. С. 78–87.

25. Изменение климата и ландшафтов за последние 65 миллионов лет (Кайнозой: от палеоцена до голоцена) / ред. А. А. Величко. М.: ГЕОС. 1999. 260 с.

### 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.

Богатов Сергей Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская, д. 52), e-mail: sbg@ibrae.ac.ru.

Баринов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: barinov@ibrae.ac.ru.

Савельева Елена Александровна, кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: esav@ibrae.ac.ru.

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

### Библиографическое описание статьи

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.

## EVOLUTION OF GEOSPHERE AT THE SITE IN NIZHNEKANSKIY MASSIF MEANT FOR DEEP GEOLOGICAL DISPOSAL

Kochkin B. T.<sup>1,2</sup>, Bogatov S. A.<sup>2</sup>, Barinov A. S.<sup>2</sup>, Saveleva E. A.<sup>2</sup>, Utkin S. S.<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on February 5, 2020

The work identifies external geological impacts (FEPs) responsible for long-term evolution of disposal facility at the Yeniseysky site. Also the current level of knowledge concerning these factors was estimated together with directions of further investigations, which include: studies of tectonic movements, deformation of rocks and seismic monitoring.

**Keywords:** radioactive waste, deep disposal of RW, geosphere evolution, FEPs, geological investigations.



### References

1. 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]. *Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost' — Nuclear and radiation safety*, 2015, no. 4 (78), pp. 59—87.
2. IAEA Safety Glossary: Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection: 2016 Edition. Vienna: IAEA, 2016, 238 p.
3. Otchet o NIR po teme: «Geologicheskie raboty i predstavlyaemye dannye dlya ocenki bezopasnosti ob"ekta okonchatel'noj podzemnoj izolyatsii RAO (v t.ch. podzemnoj laboratorii) na ploshchadke uchastka Enisejskij (Nizhnekanskiy massiv) v procedure okonchatel'nogo utverzhdeniya ploshchadki» [R&D report on Geological Exploration and Data Presented for the Safety Assessment of the Final Geological RW Disposal Facility (Including Underground Research Laboratory) at the Yeniseyskiy site (Nizhnekanskiy rock mass) under the Final Site Approval Procedure] / State Contract No. N.4d.21.04.09.1219 of June 11, 2009. M.: IGEM RAS, 2009.
4. Podgotovka materialov v ramkah razrabotki osnovnyh 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 «Yeniseyskiy» site in Nizhnekansk crystalline massif Technical Report]. Zharikov V. A., Kochkin B. T., Krupskaya V. V., Mal'kovskij V. I., Tarasov N. N., Yudinets S. V. Moscow, IGEM RAN, 2014.
5. 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]. *Geokologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya — Environmental Geoscience*, 2012, no. 5, pp. 436—448.
6. Obosnovanie nomenklatury parametrov scenariyev vozdeystviya prirodnyh i tekhnogennyh processov v usloviyah razmeshcheniya ob"ekta na Nizhnekanskom massive. Otchet o NIR (itogovyy): 08-08 [Rationale Behind the List of Parameters for Scenarios Associated with Natural and Technogenic Impacts under Conditions Relevant for the Facility Sited in the Nizhnekanskiy Rock Mass. R&D Report (final) 08-08] / run by I. I. Linge. M., 2016. 136 p.
7. International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: Version 3.0 Radioactive Waste Management. NEA/RWM/R (2019) 1 July 2019 (www.oecd-nea.org).
8. *Issledovaniya granitoidov Nizhnekanskogo massiva dlya zahoroneniya RAO. Materialy KNTS*. [Study of granitoids of Nizhnekansk range for RW disposal Materials of KNTS Zheleznogorsk, March 16—20, 1998]. St-Petersburg, MCC, SPA “Khlopin Radium Institute” publ., 1999. 182 p.
9. Anderson E. B., Belov S. V., Kamnev E. N., Kolesnikov I. Yu., Lobanov N. F., Morozov V. N., Tatarinov V. N. *Podzemnaya izolyatsiya radioaktivnyh othodov* [Underground isolation of radioactive waste]. Moscow, Gornaya Kniga Publ., 2011. 592 p.
10. Kochkin B. T., Malkovskiy V. I., Yudinets S. V. *Nauchnye osnovy ocenki bezopasnosti geologicheskoy izolyatsii dolgozhivushchih radioaktivnyh othodov (Enisejskiy proekt)* [Scientific basis for the safety assessment of long-lived radioactive waste geological disposal (the Eniseyskiy project)]. Moscow, IGEM RAS Publ., 2017. 384 p.
11. Tatarinov V. N., Kaftan V. I., Seelev I. N. *Izucheniye sovremennoj geodinamiki Nizhnekanskogo massiva dlya bezopasnogo zahoroneniya radioaktivnyh othodov* [Study of the Present-Day Geodynamics of the Nizhnekanskiy massif for Safe Disposal of Radioactive Wastes]. *Atomnaya energiya — Atomic Energy*, 2016, vol. 121, no. 3, pp. 157—160.
12. Kochkin B. T., Mal'kovskii V. I. *Kolichestvennaya ocenka dolgosrochnoy evolyucii usloviy migratsii radionuklidov iz mogil'nika na uchastke Enisejskij (Krasnoyarskiy kraj)* [Quantitative assessment of the long-term evolution of radionuclide migration conditions from the underground repository at the Yeniseyskiy site (Krasnoyarsk region)]. *Geokologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya — Environmental Geoscience*, 2016, no. 5, pp. 401—411.
13. Lobackaya R. M. *Neotektonicheskaya razlombnoblakovaya struktura zony sochleneniya Sibirskoy platformy i Zapadno-Sibirskoy 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.
14. Morozov V. N., Tatarinov V. N., Kaftan V. I., Manevich A. I. *Podzemnaya issledovatel'skaya laboratoriya: geodinamicheskie i seismotektonicheskie aspekty bezopasnosti* [Underground Research Laboratory: Geodynamic and Seismotectonic Aspects of Safety]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste*, 2018, no. 3 (4), pp. 16—29.
15. Tatarinov V. N., Morozov V. N., Kaftan V. I., Manevich A. I., Tatarinova T. A. *Podzemnaya issledovatel'skaya laboratoriya: zadachi geodinamicheskikh issledovaniy* [Underground research laboratory: problems of geodynamic research]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste*, 2019, no. 1 (6), pp. 77—89.
16. Nikolaev N. I. *Novejshaya tektonika i geodinamika litosfery* [Latest tectonics and geodynamics of the lithosphere]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 491 p.

17. Nikonov A. A. Terminologiya i klassifikaciya seismogennyh narushenij rel'efa [Terminology and classification of seismogenic violations of the terrain]. *Geomorfologiya—Geomorphology*, 1995, no. 1, pp. 4–10.
18. Lukina N. V. Aktivnye razlomy zony sochleneniya Sibirskoj platformy i Altae-Sayanskoj orogenicheskoj 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.
19. 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. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya — Environmental Geoscience*, 2008, no. 3, pp. 197–213.
20. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii. Uchet vneshnih vozdeystvij prirodno i tekhnogennogo proiskhozhdeniya na ob"ekty ispol'zovaniya atomnoj energii. NP-064-17. [Federal norms and rules in the field of atomic energy use. Accounting for external impacts of natural and man-made origin produced on nuclear facilities. NP-064-17].
21. Rukovodstvo po bezopasnosti. Ocenka seismicheskoj opasnosti uchastkov razmeshcheniya yadernogo i radiacionno opasnyh ob"ektov na osnovanii geodinamicheskikh dannyh. RB-019-01. [Safety guide. Seismic Hazard Assessment for Sites with Nuclear and Radiation Hazardous Facilities Based on Geodynamic Data. RB-019-01]. *Vestnik Gosatomnadzora Rossii — Bulletin of the Gosatomnadzor of Russia*, 2002, no. 1, pp. 33–39.
22. Kochkin B. T. Dolgosrochnyj prognoz klimaticheskikh izmenenij v rajone razmeshcheniya hranilishcha vysokoradioaktivnyh othodov (uchastok Enisejskij, Krasnoyarskij kraj) [Long-term forecast of climate changes in the location area of repository for high-level radioactive wastes (Yeniseysky site, the Krasnoyarsk region)]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya — Environmental Geoscience*, 2015, no. 2, pp. 52–65.
23. Anderson E. B., Savonenkov V. G., Lyubceva E. F. i dr. *Rezultaty poiskovyh i nauchno-issledovatel'skikh rabot po vyboru ploshchadok dlya podzemnoj izolyacii VAO i OYAT na Nizhnekanskom massive granitoidov (Yuzhno-Enisejskij kryazh)* [The results of prospecting and scientific works on site selection to geological disposal of HLW and SNF in the Nizhnekanskiy granitoid massif (South Yenisei Ridge)]. *Trudy Radievogo instituta im. V. G. Hlopina*, 2006, vol. XI, pp. 8–64.
24. Velichko A. A. Stanovlenie sovremennoj landshaftnoj obolochki Zemli [Formation of the Earth's Modern Landscape Mantle]. *Priroda — Nature*, 2012, no. 1, pp. 78–87.
25. *Izmenenie klimata i landshaftov za poslednie 65 millionov let (Kajnozoy: ot paleocena do golocena)* [Climate and environment changes during the last 65 million years (Cenozoic: from paleocene to holocene)]. Ed. A. A. Velichko. Moscow, GEOS Publ., 1999. 260 p.

### Information about the authors

*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 the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tul'skaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: btk@igem.ru.

*Bogatov Sergey Aleksandrovich*, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tul'skaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: sbg@ibrae.ac.ru.

*Barinov Aleksandr Sergeevich*, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tul'skaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: barinov@ibrae.ac.ru.

*Saveleva Elena Aleksandrovna*, PhD, Head of laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tul'skaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: esav@ibrae.ac.ru.

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

### Bibliographic description

Kochkin B. T., Bogatov S. A., Barinov A. S., Saveleva E. A., Utkin S. S. Evolution of geosphere at the site in Nizhnekanskiy massif meant for deep geological disposal. *Radioactive Waste*, 2020, no. 1 (10), pp. 56–65. (In Russian). DOI:10.25283/2587-9707-2020-1-56-65.