

ЭВОЛЮЦИЯ ПГЗРО В НИЖНЕКАНСКОМ МАССИВЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Б. Т. Кочкин^{1,2}, С. А. Богатов², Е. А. Савельева²

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

²Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2020 г.

Идентифицированы климатические факторы, которые относятся к внешним воздействиям, определяющим долгосрочную эволюцию системы изоляции РАО на участке «Енисейский». Оценено текущее состояние изученности этих факторов и определены важнейшие направления исследований. Они включают: палеоклиматические исследования в регионе ПГЗРО для уточнения истории климатов прошедших геологических эпох; количественный прогноз для климата региона на основе глобальных численных климатических моделей; специальные прогнозы на основе общей климатической модели региона, особенно для уточнения глубины промерзания породного массива в ледниковые периоды.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, эволюция пункта глубинного захоронения, ОСП, палеоклиматические исследования, долгосрочный прогноз климата.

Введение

Российские нормативные документы и международные рекомендации предписывают выполнить прогнозные модельные расчеты дозовых нагрузок в биосфере на период потенциальной опасности объекта размещения радиоактивных отходов (РАО) [1, 2]. Период потенциальной опасности ПГЗРО для РАО 1 и 2 классов в указанных документах точно не определен, но, опираясь на скорость снижения их радиоактивности, его можно оценить величинами от сотен тысяч до миллионов лет.

Важная задача, стоящая при обосновании безопасности ПГЗРО, — сформулировать направления исследований, необходимых для достоверного описания вероятных сценариев весьма длительной эволюции системы изоляции. Для полноты охвата всех вероятных сценариев

используется понятие ОСП — особенность, событие, процесс, или FEP — feature, event, process — в англоязычной литературе, которое призвано formalизовать многочисленные факторы, потенциально способные оказать воздействие на безопасность системы захоронения [3]. События могут влиять на особенности и процессы, которые, в свою очередь, могут влиять друг на друга. В некоторых случаях процесс может вызвать событие, например такие процессы, как накопление тектонических напряжений во вмещающем массиве или формирование зоны многолетнемерзлых пород, способны привести к образованию или изменению трещин и, как следствие, повлиять на безопасность ПГЗРО. Если эти различия не принципиальны, используется термин «фактор» или аббревиатура ОСП.

Настоящая статья — продолжение исследования, посвященного идентификации ОСП, действительных для ПГЗРО, проектируемого на участке «Енисейский». Первая часть этого исследования [4] была посвящена геологическим факторам, эта часть — климатическим. Статья ориентирована на специалистов по геологической изоляции РАО, чтобы обратить их внимание на то, что при обосновании долговременной безопасности нельзя упускать из виду климатические аспекты. Цель статьи в том, чтобы выделить те климатические факторы, которые могут оказаться важными для безопасности ПГЗРО в долгосрочной перспективе. Необходимо определиться с факторами, которые нужно учитывать в сценариях эволюции ПГЗРО, а для этого необходимо иметь данные

по палеоклиматическим условиям в районе и понимать, какие климатические модели могут потребоваться для их экстраполяции на отдаленное будущее.

Особенности, события, процессы (ОСП) и их категоризация

Комиссия по обращению с радиоактивными отходами АЯЭ ОБСЕ начиная с 1993 года разрабатывает универсальный интернациональный каталог ОСП. Последняя (третья) версия этого каталога выпущена в 2019 году и включает 268 наименований [5]. Этот каталог дает возможность обосновывать полноту рассматриваемых факторов для любых конкретных проектов ПГЗРО (рис. 1).

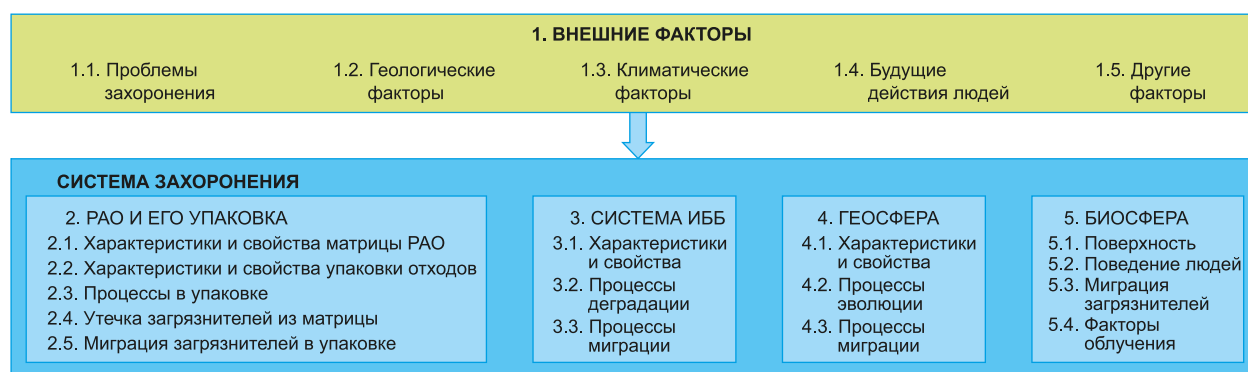


Рис. 1. Схема каталога ОСП АЯЭ ОБСЕ

В каталог АЯЭ ОБСЕ включены факторы, воздействующие на все подсистемы будущего хранилища, они учитывают все возможные взаимодействия, прямые и обратные связи, так что можно идентифицировать ОСП, которые действительно важны для конкретного проекта захоронения, например на участке «Енисейский». ОСП, разделенные в каталоге АЯЭ ОБСЕ на 5 групп, среди прочих включают факторы, которые необходимы для описания эволюционных изменений параметров в миграционных моделях.

Анализ ОСП проводится и в России. Так, в работах ИГЕМ РАН [6—8] и ИБРАЭ РАН [9] рассмотрены ОСП, в том числе для проекта ПГЗРО в условиях участка «Енисейский». В данной работе рассматривается подгруппа климатических ОСП (1.3), которая выделена в группе Внешних факторов (№ 1). Климатические факторы, в свою очередь, связаны с факторами из других групп и подгрупп. В частности, они могут оказать определенное влияние на миграционные процессы в геосфере и внутри системы инженерных барьеров безопасности (ИББ).

В перечень внешних климатических ОСП обычно включаются те из них, которые проявят себя главным образом во вмещающей среде подземного сооружения. В некоторых случаях они могут повлиять на внутреннюю систему ИББ (табл. 1).

Таблица 1. Климатические ОСП, определяющие эволюцию системы (по [5])

Номер и название ОСП	
1. Внешние факторы	
1.3	Климатические факторы
1.3.1	Глобальное изменение климата
1.3.2	Региональное и локальное изменение климата
1.3.3	Изменение уровня моря
1.3.4	Эффекты в перигляциальной области
1.3.5	Эффекты от ледникового климата и ледниковых покровов
1.3.6	Эффекты от теплого климата (тропический и пустынный)
1.3.7	Гидрологическая / гидрогеологическая реакция на изменение климата
1.3.8	Экологическая реакция на изменение климата
1.3.9	Реакция людей на изменение климата
1.3.10	Геоморфологическая реакция на изменение климата

Первоначальной задачей анализа любых ОСП, в том числе и климатических, является составление исходного списка, охватывающего весь возможный диапазон факторов, потенциально значимых для разработки сценариев эволюции системы захоронения. В нашем случае для составления такого списка использован каталог АЯЭ [5]. Сопоставление исходного списка с доступной информацией по палеоклиматам региона размещения дает возможность установить круг ОСП, существенных именно для ПГЗРО на участке «Енисейский». В результате анализа выявлен перечень климатических ОСП, обязательных для включения в процедуру составления сценариев эволюции для «Енисейского» проекта, а также определены задачи исследований по климатическим ОСП.

Характеристика и анализ климатических ОСП даны в порядке, представленном в каталоге АЯЭ ОБСЕ.

Внешние климатические факторы, действительные для участка «Енисейский» (ОСП 1.3)

1.3. Климатические факторы

Климатические факторы связаны с долгосрочными процессами, возникающими в результате изменений глобального климата, и их последствиями для надежности и безопасности хранилища.

Климатические условия считаются постоянно действующей особенностью внешней среды. Изменение этих условий способно инициировать или повлиять на характер протекания многих внутренних процессов в системе захоронения и тем самым привести к смене базового сценария на альтернативный вариант. Разнообразие возможных климатических изменений и множество элементов системы захоронения, на которые они потенциально могут воздействовать, выдвигает климатические факторы в разряд наиболее важных для проектирования сценариев долгосрочной эволюции ПГЗРО.

При анализе безопасности хранилищ рассматривают влияние климата на [5]:

- 1) интенсивность и характер течения грунтовых и подземных вод в ближней и дальней зонах ПГЗРО;
- 2) химический состав подземных вод в ближней и дальней зонах ПГЗРО;
- 3) характер и пространственное распределение радионуклидов, выходящих из хранилища.

1.3.1. Глобальное изменение климата

Этот ОСП рассматривает возможное будущее и свидетельства прошлых изменений глобального климата. ОСП касается проблем, связанных с изменением климата из-за таких глобальных процессов, как вариации солнечной активности или антропогенные выбросы CO_2 . Климатический ответ на геологические процессы, непосредственно связанные с тектоникой плит, такие как вулканическая деятельность или орогенез, охватываются ОСП 1.2.14 (климатические реакции на геологические изменения).

В настоящее время климат в Северном полушарии характеризуется как относительно теплое межледниковье, которое должно завершиться новым ледниковым периодом примерно через 5 тысяч лет [10]. Коррективы в этот сценарий развития глобального климата может внести возможное резкое потепление в связи с антропогенными выбросами парниковых газов. В настоящее время разрабатываются модели общей циркуляции атмосферы и океана и глобальные климатические модели с учетом множества сценариев поступления парниковых газов. Они позволяют воспроизводить основные особенности поведения климатической системы, включая эволюцию климата за XX век [11, 12]. Это служит основанием для признания достоверными (в рамках множества сценариев) пределы вероятных изменений климата на ближайшие сотни лет. Но потребности оценки безопасности ПГЗРО требуют прогноза на существенно более отдаленное будущее.

Глобальные изменения климатов прошлых эпох носят периодический характер, природа которого не имеет исчерпывающего объяснения. Гипотеза, предложенная М. Миланковичем [13] еще в первой половине XX века для объяснения истории климатических изменений в прошлые геологические эпохи, связывает долгопериодные колебания климата и смену ледниковых и теплых периодов с изменениями солнечной инсоляции. На интенсивность последней влияют изменение наклона земной оси по отношению к плоскости ее орбиты, прецессия земной оси и эксцентриситет земной орбиты. Эти параметры изменяются с периодами примерно в 40, 20 и 100 тыс. лет соответственно. Данные глубинного бурения ледового щита на российской станции «Восток» в Антарктиде и более позднего бурения в Гренландии подтверждают наличие периодов, близких к указанным, за последние 420 000 лет. Гипотеза М. Миланковича объясняет не все чередования климатов Земли, при том что она является самой далекодействующей в отношении

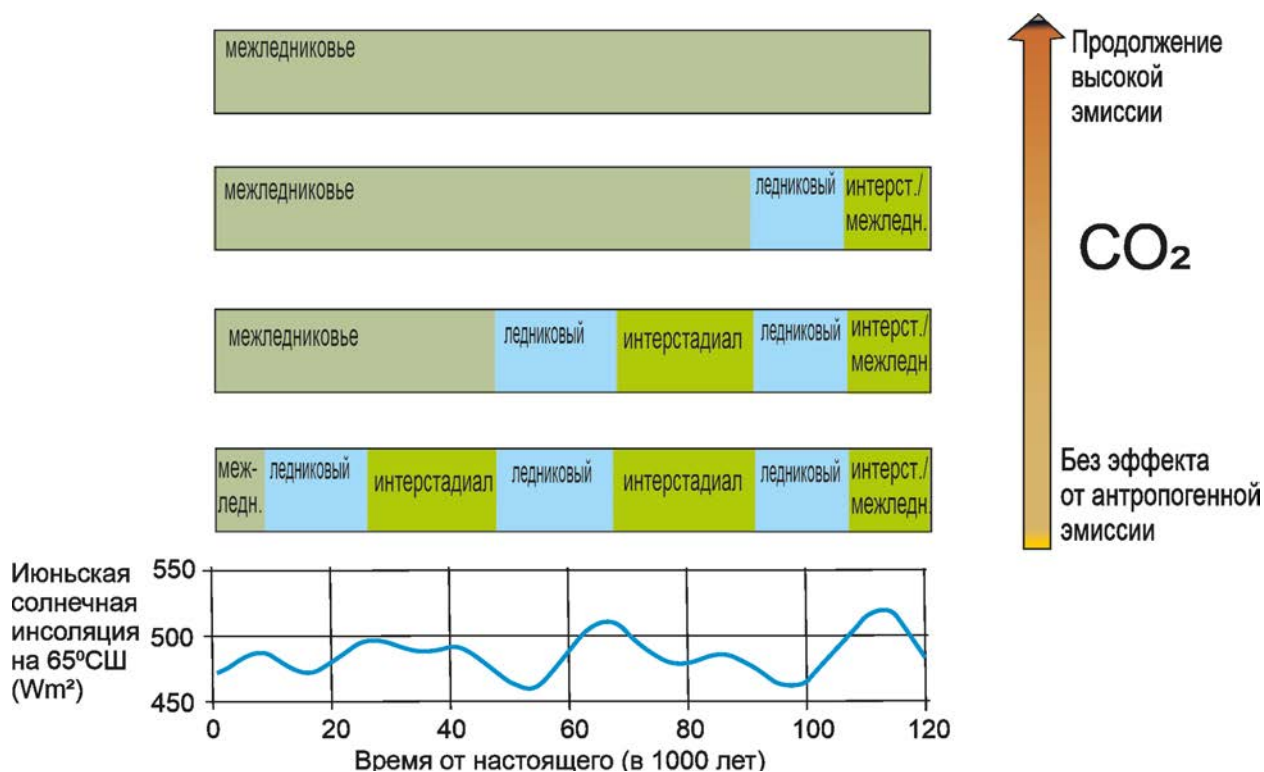


Рис. 2. Схема, показывающая роль солнечного облучения (инсоляции) и концентрации атмосферного CO_2 на наступление следующего периода оледенения

предсказания климатов отдаленного будущего. В дополнение к изменениям инсоляции количественные расчеты учитывают такие факторы, как изменение содержания парниковых газов в атмосфере Земли, затенение поверхности в результате продолжительных мощных вулканических извержений или другие, в зависимости от модели.

В современных количественных моделях расчет инсоляции, основанный на астрономической теории климата Миланковича, выполняется для широты конкретной территории и суммируется с разными проекциями антропогенной эмиссии CO_2 и ее долгосрочными последствиями [14]. Получаются разные проекции климатов будущего. Пример формирования различных проекций для района расположения площадки Олкилуото в Финляндии приведен на рис. 2.

Согласно модельным вычислениям устойчивая эмиссия парникового газа откладывает следующий ледниковый период за пределы 120 тыс. лет от настоящего времени. При низкой эмиссии начало следующего оледенения определяется инсоляцией и может наступить через приблизительно 50–60 или 90–100 тыс. лет от настоящего времени (по [14]).

Следует обратить внимание на то, что широта Олкилуото 65° с. ш., а широта участка «Енисейский» 56° с. ш. Соответственно в этих районах различаются уровень инсоляции и, как

следствие, распределение во времени периодов теплого и холодного климатов.

1.3.2. Региональное и локальное изменение климата

Этот фактор касается возможных будущих и свидетельств прошлых изменений климата непосредственно вокруг района размещения ПГЗРО и в более широком географическом регионе.

ОСП 1.3.2 отличается от ОСП 1.3.1 в той мере, в какой региональные и местные климатические изменения отличаются от глобальных. Региональное и локальное изменения климата могут отразиться на режиме питания и потока подземных вод непосредственно в районе хранилища и/или вокруг него, что, в свою очередь, приведет к изменениям в переносе радионуклидов из хранилища к местам разгрузки подземных вод. Изменения в питании также могут привести к изменению химических условий в хранилище и/или вокруг него (например, поступление кислородсодержащей метеорной воды, проникающей на большую глубину). Изменения температуры, величины и/или вида осадков (например, дождь или снег) также могут повлиять на скорость эрозии или накопления осадочных пород, что способно привести к сокращению/увеличению мощности перекрывающих

хранилище пород в долгосрочной перспективе. Региональные особенности климата также отразятся на процессах оледенения/дегляциации, обводнения/высыхания поверхностных водных объектов (например, озер). Все эти факторы потенциально могут влиять на надежность и безопасность ПГЗРО, а также на выполнение прогнозных расчетов формирования доз в биосфере.

Похолодание/потепление климата региона может вызвать образование или оттаивание вечной мерзлоты, сопровождаемое многочисленными сопутствующими процессами в приповерхностной зоне. *Увлажнение/иссушение (гумидизация/аридизация)* климата региона вызовет изменение уровня подземных вод и положения областей питания и разгрузки, что повлияет на эволюцию регионального поля фильтрации подземных вод. Ответы на региональное изменение климата обсуждаются в рамках ОСП 1.3.4 по 1.3.10.

Время действия и масштаб последствий предстоящих долгосрочных (на сто тысяч и более лет) изменений климата в каком-либо регионе моделируются на основе глобальных климатических проекций. Для района ПГЗРО количественных локальных проекций нет — это задача будущего. В работах [15, 16] дан качественный прогноз долгосрочной эволюции климата региона на основе экстраполяции климатов предшествующих геологических периодов на будущее. Анализ прошлых климатов четвертичного периода региона показал хорошее согласие с ходом чередования потеплений и похолоданий в целом в Северном полушарии. В опубликованной литературе имеются сведения для предварительной оценки температур и других характеристик (осадки, речной сток, растительность) разных климатов прошлого региона ПГЗРО на участке «Енисейский».

В целом климаты прошлого в этом районе за последние 400 тыс. лет были намного холоднее, чем современный «умеренно холодный» климат. Исключением были периоды оптимумов межледниковий, когда климат был близок к современному или даже был несколько теплее. Экстраполяция палеоусловий на будущее может рассматриваться в качестве климатических аналогий для вероятных сценариев хода изменений местного климата с учетом или без учета глобальной эмиссии парниковых газов (см. ниже ОСП 1.3.5 и 1.3.6).

1.3.3. Изменение уровня моря

Этот ОСП ориентирован на рассмотрение эволюции колебаний уровня моря, которые могут

быть следствием изменений глобального климата и/или региональных геологических движений, например изостатического подъема или опускания земной коры вследствие появления или снятия нагрузки от ледникового щита.

Само по себе изменение уровня моря может повлиять на безопасность хранилища, находящегося достаточно близко к побережью, которое подвергалось или потенциально подвержено перекрытию ледниковыми щитами большой мощности. Периодическая смена питания подземных вод с морского на континентальное, неизбежно ведет к смене гидрогеохимических и гидродинамических условий и создает проблемы в прогнозных геомиграционных расчетах. Такая ситуация характерна для участка захоронения ОЯТ в Швеции, расположенного на Скандинавском щите у берегов Балтийского моря [17].

Что касается участка «Енисейский», то, во-первых, он расположен более чем в двух тысячах километров южнее побережья Карского моря на высотах около 400 м над уровнем моря, во-вторых, как будет сказано в ОСП 1.3.5, он никогда не перекрывался ледниковым щитом за всю историю четвертичного периода. Логично предположить, что никакие ожидаемые изменения климата существенно не скажутся на его позиции. Соответственно, исключено значимое влияние колебаний уровня моря на условия в гидросфере хранилища и, следовательно, на его безопасность.

1.3.4. Эффекты в перигляциальной области

Этот фактор учитывает физические процессы и связанные с ними формы рельефа в холодных, но свободных от ледяного покрова средах в пределах региона/участка хранилища. На подземные условия и геотермальный градиент в породах таких районов будет также влиять отсутствие теплоизолирующего эффекта ледникового щита. Ключевой особенностью таких сред является образование больших объемов многолетнемерзлых грунтов и горных пород, обычно называемых «вечная мерзлота».

Перигляциальные эффекты могут сказаться на надежности и безопасности хранилища через их влияние на фазовое состояние воды во вмещающих горных породах, характер течения подземных вод и связанные с этими обстоятельствами миграционные процессы радионуклидов. Зона многолетнемерзлых пород может ограничить питание подземных вод, а особенности пространственного распределения льда, таликов и криопэгов могут также повлиять на положение областей питания и разгрузки подземных

вод. Гидравлическая проницаемость многолетнемерзлых пород на несколько порядков ниже обычных, и инфильтрация через них очень мала, но при этом велики неопределенности прогноза подземного потока в течение ледникового цикла [18]. Частичное замораживание среды может привести к развитию более высокой остаточной солености подземных вод (криопэги обычно представлены солеными водами). Процессы замораживания — оттаивания при периодической смене глобального климата могут привести к развитию жильных льдов, термокарстовых процессов, солифлюкции и других отличительных форм ландшафтов перигляциальных областей. Пространственное распределение мерзлоты изменится при наступлении и отступлении соседних ледяных щитов. Эти процессы вызовут изменения в дренажных и водосборных системах, которые повлияют на приповерхностные грунтовые воды, а также вызовут изменения в растительном, животном и человеческом сообществах, которые повлияют на потенциальные способы радиовоздействия в биосфере.

В настоящее время на территории региона сохранились редкие маломощные островки многолетнемерзлых пород [19, 20]. Непосредственно в районе ПГЗРО многолетнемерзлые породы не обнаружены. Благодаря оголенности поверхности земли в периоды четвертичного оледенения, на этой территории развивалась очень мощная (до 600 м) толща многолетнемерзлых пород [21], поэтому можно ожидать подобного эффекта при будущих ледниковых климатах. Аналогия с тремя европейскими хранилищами (Чехия, Великобритания и Швеция) для оценки мощности зоны многолетнемерзлых пород в предстоящий ледниковый период, как это сделано в работе [16], некорректна. Авторы работы не принимают во внимание известную асимметрию развития ледниковых покровов между Европой-Америкой и Сибирью [21, 22] и, соответственно, разную глубину проникновения мерзлоты в этих регионах. В Европе-Америке ледники проникали далее на юг, а мерзлые породы, наоборот, более глубоко развивались на юге Сибири. На европейских территориях под мощным ледниковым щитом, согласно выбранным аналогам, не ожидается промерзание глубже 320 м.

Для условий района участка «Енисейский», на котором мощность вечной мерзлоты при последнем оледенении превышала глубину размещения ПЗРО, существует потенциальная опасность полного промерзания ИББ [15]. Это вызовет неопределенные последствия в системе ИББ, минимизация которых потребует проведения специальных экспериментов. Косвенным свидетельством

процесса неоднократного промерзания и оттаивания пород на участке «Енисейский» можно считать развитие в ряде трещин гидроксидов железа до глубины более 500 м. До выполнения количественных расчетов сценарий полного промерзания ИББ можно считать высоковероятным. Окончательный ответ на вопрос о влиянии эффектов, присущих перигляциальной области, может дать моделирование будущего локального климата.

1.3.5. Эффекты от ледникового климата и ледниковых покровов

Этот ОСП описывает и анализирует роль ледникового климата и ледниковых щитов в пределах региона/участка ПГЗРО, например, в изменениях геоморфологии, темпах эрозии, механических и гидродинамических характеристиках.

В качестве палеоаналога ледникового климата в данном регионе допустимо использовать реконструкции последнего (сартанского) оледенения. Фаза сартанского оледенения началась около 25—23 тыс. лет назад. Максимум похолодания на территории Западной Сибири пришелся на период 20—18 тыс. лет назад. Данные по историческим температурам для этой ледниковой стадии на территории региона отсутствуют. Во времена более раннего шайтанского оледенения местные июльские температуры были на 4—6 °C ниже современных, январские опускались до -29 °C (ΔT -8 °C), а среднегодовая температура была ниже современной на 7—8 °C [21]. На юге Восточной Сибири, согласно [23], для сартанского климата снижение среднегодовой температуры относительно современного уровня составляло от 6 до 9 °C, а сокращение годовой суммы осадков от 200 до 450 мм.

Наступление ледникового климата сопровождается развитием ледниковых покровов. Наличие или отсутствие ледника будет влиять на питание подземных вод и напоры в них. Градиенты напоров будут иметь тенденцию к росту вблизи границ ледяного щита, который будет также влиять на геотермальный градиент в породах под собой вследствие теплоизолирующего эффекта льда. Вес больших ледяных щитов может привести к изостатической депрессии поверхности земли. После отступления ледника земная поверхность будет восстанавливать прежнее положение. Эрозионные процессы, связанные с движением ледников (экзарация) и талых вод, могут привести к морфологическим изменениям в ландшафтах и, как следствие, к изменениям в гидродинамике подземных вод.

Что касается участка «Енисейский», то, по имеющимся данным, за последние четыре глобальных

оледенения Северного полушария в четвертичном геологическом периоде ледовый щит никогда его не покрывал. Это обстоятельство обязано региональным особенностям циркуляции атмосферы, которые сформировались благодаря воздыманию горных гряд Алтая и Саян южнее района участка «Енисейский» за неоген-четвертичное время [10]. Во время наиболее масштабного оледенения (около 70—60 тыс. лет назад) покровные льды продвигались по течению р. Енисей на юг лишь до 64° с. ш. Северная граница Нижнеканского массива располагается на 830 км южнее [21]. Граница последнего ледникового покрова находилась севернее Енисейского кряжа в районе Подкаменной Тунгуски [24]. Соответственно, при аналогичном сценарии развития будущего оледенения можно исключить влияние на безопасность ПГЗРО факторов, связанных с формированием и таянием ледниковых покровов.

1.3.6. Эффекты от теплого климата (тропического и пустынного)

Данный ОСП рассматривает влияние тропического и пустынного климата, включая сезонные, метеорологические и геоморфологические эффекты, характерные для этих климатических условий. Этот фактор для района ПГЗРО может рассматриваться только как возможное следствие глобального потепления, связанного с эмиссией парниковых газов.

Потепление климата косвенно может усилить роль увлажнения или аридизации. Увеличение количества осадков (гумидизация) усилит питание подземных вод и ускорит водообмен. Напротив, аридизация климата приведет к замедлению водообмена. В любом случае изменятся гидравлические процессы в геосфере.

В биосфере эти эффекты могут включать экстремальные погодные условия, например: муссоны, ураганы в тропическом климате; в пустынном климате эти последствия также включают опустынивание, которое может привести к обезлесению и потере лесов и пастбищ с соответствующими последствиями для расчета доз.

Теплый климат мог бы оказать глубокое влияние на уровень залегания грунтовых вод, который в тропических регионах обычно близок к земной поверхности, но в засушливых регионах может быть на значительной глубине (известны зоны аэрации мощностью в сотни метров). Снижение уровня грунтовых вод могло бы повлиять на естественную биоту, привести к проблемам в водоснабжении населения.

О возможных масштабах изменений климата в районе участка «Енисейский» в случае

глобального потепления можно судить на основе данных по палеоклиматам. Климат последнего межледниковья (130—115 тыс. лет назад), известного в Сибири как казанцевское (микулинское — в Восточной Европе), соответствует сравнительно небольшому превышению среднегодовых температур над современными (примерно на 2 °С) [15, 16]. Такой рост глобальной температуры в ближайшие 100 лет прогнозируется в связи с парниковым эффектом. Согласно реконструкциям, представленным в работах [21, 25], средние январские температуры в районе г. Красноярска в казанцевское время превышали современные на 6 °С, напротив, июльские — почти не отличались. Район Красноярска располагался в зоне превышения годовой суммы осадков на 100 мм от современной. Речной сток в районе Красноярска также превышал современные значения не более чем на 50 мм. Самым теплым в регионе было тобольское межледниковье (380—270 тыс. лет назад). Оно было одним из самых продолжительных, и в будущем, при очень сильном парниковом разогреве атмосферы в связи с неконтролируемой эмиссией парниковых газов, может возникнуть аналогичная ситуация. Среднегодовые температуры были выше современных на 10 °С. Зимние сезоны были короче и теплее, чем сейчас, почти на 7—9 °С; летние сезоны были более продолжительными, более влажными и умеренно теплыми.

Интересны данные о темпах смены ледниковых условий на межледниковые. С началом потепления в конце сартанского ледниковья, максимум которого пришелся на период 20—18 тыс. лет назад, начинается процесс деградации криолитозоны. За короткий период (примерно от 13 до 10 тыс. лет назад) южная граница сплошной многолетней мерзлоты в Западной Сибири отступила к широте Полярного круга со средней скоростью около 400 км за столетие. Быстрые темпы отступления мерзлоты способствовали интенсивному таянию подземных льдов, развитию термокарстовых процессов и заметным деформациям земной поверхности, включая эрозионные процессы на водоразделах и в речных долинах [21]. Эти данные могут лечь в основу одного из гипотетических сценариев. В случае полного промерзания ИББ, миграция радионуклидов приобретет диффузионный характер, за десятки тысяч лет ледникового периода в ближней зоне накопится их значительное количество, которое при быстром оттаивании практически одновременно попадет в подземную гидросферу. Этот эффект может резко увеличить дозовые нагрузки в биосфере.

1.3.7. Гидрологическая/ гидрогеологическая реакция на изменение климата

Этот фактор рассматривает изменения в гидрологии и гидрогеологии региона/района ПГЗРО, например питание поверхностных и подземных вод, осадки, их тип (дождь, снег) и сезонность, в ответ на изменение климата. Следствием климатических изменений в отдаленной перспективе может быть осолонение (опреснение) подземных вод из-за изменения интенсивности их питания. Изменение химизма подземных вод окажет влияние на процесс рассеивания радионуклидов в геосфере. Эволюция климата вызовет такие потенциальные эффекты, как образование/исчезновение озер и рек, осадконакопление и формирование меандр, заболачивание или высыхание низменных участков. Гидрологические реакции на изменение климата также могут вызвать изменения в окружающей среде, в характере и пространственном распределении экосистем, на которые могут воздействовать радионуклиды, покинувшие хранилище.

Результаты моделирования последствий возможного масштаба гумидизации климата в районе участка «Енисейский» показали, что влияние этого фактора на миграцию радионуклидов можно оценить как низкое [26].

Косвенным последствием формирования ледникового щита севернее территории будущего ПГЗРО может стать образование *подпрудных озер*, как это имело место в предшествующие ледниковые эпохи [20]. Формирование таких озер по своим гидрогеологическим последствиям равнозначно уменьшению *вертикальной дифференциации* уровня подземных вод по площади. Согласно проведенному моделированию последствий, влияние такого события на масштаб миграции радионуклидов можно оценить как низкое [26].

1.3.8. Экологическая реакция на изменение климата

Этот фактор ориентирован на изменения в экологии, например растительности или популяциях животных, в ответ на изменение климата в пределах региона/района размещения ПГХРО.

Экологические реакции на изменение климата важны в процедуре оценки безопасности прежде всего с точки зрения понимания того, какие именно природные объекты (вода, почва, флора и фауна) могут подвергнуться воздействию ПГЗРО.

В отсутствие численных моделей локального климата в районе участка «Енисейский» говорить сегодня о характере будущих изменений окружающей среды, очевидно, преждевременно.

1.3.9. Реакция людей на изменение климата

Данный ОСП фокусируется на изменениях в поведении человека, например в его привычках, рационе питания, размерах общин, типах жилищ, сельском хозяйстве и расселении, в ответ на изменение климата в регионе/районе ПГЗРО.

Этот фактор следует рассматривать потому, что, с одной стороны, изменение геологических и гидрогеологических условий, а также свойств системы ИББ вследствие воздействия неблагоприятных климатических условий может вызвать перераспределение дозовых нагрузок на население, оцененных для базового сценария. Реакции человека на изменение климата связаны с безопасностью ПГЗРО, потому что они определяют: 1) вероятность того, что люди или другие потенциальные реципиенты будут подвергаться воздействию радионуклидов, которые смогут покинуть хранилище в будущем; 2) токсичность радионуклидов для человека или других потенциальных реципиентов 3) продолжительность таких воздействий в случае их возникновения.

С другой стороны, изменение поведения людей вследствие изменения климата может привести к антропогенному воздействию на систему захоронения. Люди будут реагировать на изменения в перераспределении безопасных природных ресурсов, сельскохозяйственных угодий и водных ресурсов (как поверхностных, так и подземных) доступными им способами, изменяя привычный образ жизни.

В отсутствие численных моделей локального климата в районе участка «Енисейский» говорить сегодня о характере реакций будущего населения, очевидно, преждевременно.

1.3.10. Геоморфологическая реакция на изменение климата

Этот ОСП учитывает геоморфологические последствия (эволюцию ландшафта) в пределах региона/района ПГЗРО в результате климатических изменений. Геоморфологические реакции на изменение климата происходят в течение длительного времени, отражая, например, долгосрочные изменения в среднегодовом количестве осадков. В некоторых случаях реакции могут происходить быстро, например при

оползнях. В свою очередь, геоморфологические последствия могут вызвать изменения в гидрологических и экологических условиях. Эволюция ландшафта будет сопровождаться эрозией, переносом материала и его отложением, что в целом может изменить мощность перекрывающих пород над хранилищем и, следовательно, изменить пространство между ним и биосферой. Исходя из имеющихся оценок скорости денудации пород в регионе за прошлые геологические эпохи, изменения в ландшафтах участка «Енисейский», скорее всего, будут минимальными. Более значимыми могут оказаться изменения в экосистеме и биосфере, которые связаны с рельефом. Флора и фауна будут подвержены влиянию таких факторов, как положение в ландшафте, близость к поверхностным водным объектам, рекам или береговой линии. Все это окажет влияние на концентрирование или дисперсию радионуклидов, которые будут поступать в биосферу из хранилища.

Выводы

Климатические факторы, которые относятся к важным внешним воздействиям из числа определяющих долгосрочную эволюцию системы изоляции РАО, для района (региона) участка «Енисейский» изучены в самых общих чертах.

Имеющиеся данные о палеоклиматах региона носят отрывочный характер. Они позволяют дать лишь примерную оценку будущих условий в биосфере и геосфере участка «Енисейский», которые сформируются при том или ином сценарии изменения глобального климата. Для формирования перечня сценариев при оценке безопасности ПГЗРО необходимо убедительно обосновать времена наступления климатических периодов, которые будут определять пищевые привычки населения (например, более теплый, чем сейчас, или более холодный, собственно, ледниковый климат).

Численные модели развития климата региона на периоды десятки—сотни тысяч лет отсутствуют. Это исключает рациональные оценки многих возможных последствий изменения глобального климата в системе изоляции и достоверный прогноз дозовых нагрузок на будущие поколения. Горизонт климатического прогноза должен быть более чем 10 тыс. лет. По крайней мере, необходимо отследить полный климатический цикл, начиная с текущего сравнительно теплого состояния, т. е. по меньшей мере на 100—120 тыс. лет вперед.

Важнейшие направления исследований климатических факторов включают:

- палеоклиматические исследования в регионе ПГЗРО для уточнения истории климатов прошедших геологических эпох;
- количественный прогноз для климата региона на основе глобальных численных климатических моделей;
- специальные прогнозы эволюции геосферы и биосферы на основе общей климатической модели региона, особенно для уточнения глубины промерзания породного массива в ледниковые периоды. Для оценки надежности инженерных барьеров, возможности изменения существующих и формирования новых трещин необходимо достоверно определить промерзнет (и когда) или нет вмещающая порода глубже чем на 500 м.

Благодарность

Работа выполнена при частичном финансировании по госзаданию ИГЕМ РАН (тема НИР 0136-2019-0004).

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. Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности, № SSR-5. Вена, МАГАТЭ, 2007. 104 с.
3. Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности. Терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты. Вена, МАГАТЭ, 2007.
4. 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.
5. 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).
6. 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.
7. Подготовка материалов в рамках разработки основных положений по обоснованию

долговременной безопасности ПГЗРО, создаваемого на участке «Енисейский» в Нижнеканском кристаллическом массиве. — М. : ИГЕМ РАН, 2014.

8. Кочкин Б. Т. Принцип консерватизма в оценке безопасности могильников высокорadioактивных отходов // Геоэкология. 2012. № 5. С. 436—448.

9. 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.

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

11. Результаты исследований изменений климата для стратегий устойчивого развития Российской Федерации. — Росгидромет, 2006. 180 с.

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

13. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. — М. : ГОНТИ, 1939. 207 с.

14. Pimenoff N., Venäläinen A., Järvinen H. Climate Scenarios for Olkiluoto on a Time-Scale of 120,000 Years. POSIVA 2011-04. Posiva OY. Olkiluoto. 2011. 109 p.

15. Кочкин Б. Т. Долгосрочный прогноз климатических изменений в районе размещения хранилища высокорadioактивных отходов (участок «Енисейский», Красноярский край) // Геоэкология. 2015. № 2. С. 52—65.

16. 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. 1—11.

17. Hedin A., Olsson O. Crystalline Rock as a Repository for Swedish Spent Nuclear Fuel //

Elements. 2016. Vol. 12. Pp. 247—252. DOI: 10.2113/gselements.12.4.247.

18. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto — Features, Events and Processes 2012. Posiva OY. Olkiluoto. 2012. 467 p.

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

20. 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 Радиевого института им. В. Г. Хлопина. 2006. Т. XI. С. 8—64.

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

22. Svendsen J. I., Alexanderson H., Astakhov V. I., Demidov I. et al. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia // Quaternary Science Reviews. 2004. Vol. 23. Pp. 1229—1271.

23. Tarasov P. E., Peyron O., Guiot J. et al. Last Glacial Maximum climate of the former Soviet Union and Mongolia reconstructed from pollen and plant macrofossil data // Climate Dynamics. 1999. Vol. 15 (3). Pp. 227—240. DOI: 10.1007/s003820050278.

24. Медведков А. А. Геоэкологический отклик среднетаежных ландшафтов Приенисейской Сибири на потепление климата конца XX — начала XXI века // Геоэкология. 2014. № 6. С. 541—553.

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

26. Кочкин Б. Т., Мальковский В. И. Количественная оценка долговременной эволюции условий миграции радионуклидов из могильника на участке «Енисейский» (Красноярский край) // Геоэкология. 2016. № 5. С. 401—411.

Информация об авторах

Кочкин Борис Тимофеевич, доктор геол.-мин. 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.

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

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

Библиографическое описание статьи

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.

EVOLUTION OF THE REPOSITORY IN NIZHNEKANSKIY MASSIF UNDER THE INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS

Kochkin B. T.^{1,2}, Bogatov S. A.², Saveleva E. A.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 September 25, 2020

The study identifies climatic factors related to external influences governing the long-term evolution of the RW disposal system at the Yeniseyskiy site. The paper evaluates the current state of knowledge about these factors and indicates most important research areas. These include: paleoclimatic studies in the repository region to clarify the climate history of past geological epochs; quantitative regional climate forecast based on global numerical climate models; special forecasts based on a general climate model of the region allowing, in particular, to clarify the depth of rock mass freezing during ice periods.

Keywords: radioactive waste, evolution of deep geological repository, FEPs, paleoclimatic studies, long-term climate forecast.

Acknowledgements

The study was partially funded under IGEM RAS's state assignment (research topic 0136-2019-0004).

References

1. NP-055-14. Zahoronenie radioaktivnyh othodov. Principy, kriterii i osnovnye trebovaniya bezopasnosti [Disposal of radioactive waste. Principles, criteria and main safety requirements]. *Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost' — Nuclear and radiation safety*, 2015, no. 4 (78), pp. 59–87.
2. *Disposal of Radioactive Waste*. IAEA Safety Standards Series No. SSR-5. Specific Safety Requirements. Vienna: IAEA, 2011, 83 p.
3. IAEA Safety Glossary: *Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection*: 2016 Edition. Vienna: IAEA, 2016, 238 p.
4. Kochkin B. T., Bogatov S. A., Barinov A. S., Savel'eva E. A., Utkin S. S. Evolyuciya geosfery na territorii razmeshcheniya PGZRO v Nizhnekanskom massive [Evolution of geosphere at the site in Nizhnekanskiy massif meant for deep geological disposal]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste*, 2020, no. 1 (10), pp. 56–65 (In Russian). DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-56-65.
5. *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).
6. *Geologicheskie raboty i predstavlyayemye dannye dlya ocenki bezopasnosti ob'ekta okonchatel'noj podzemnoj izolyacii 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]. Technical Report State Contract No. N.4d.21.04.09.1219 of June 11, 2009. Moscow, IGEM RAS Publ., 2009.

7. *Podgotovka materialov v ramkah razrabotki osnovnykh polozhenij po obosnovaniyu dolgovremennoj 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]. Moscow, IGEM RAS Publ., 2014.

8. Kochkin B. T. Princip konservatizma v ocenke bezopasnosti mogil'nikov vysokoradioaktivnykh othodov [Conservatism Principle for the Safety Assessment of the High-Level Radioactive Waste Repository]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya — Environmental Geoscience*, 2012, no. 5, pp. 436–448.

9. Obosnovanie nomenklatury parametrov scenariyev vozdeystviya prirodnykh i tekhnogennykh processov v usloviyakh razmeshcheniya ob'ekta na Nizhnekanskom massive. Otchet o NIR (itogovyj): 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. Moscow, 2016. 136 p.

10. Velichko A. A. Stanovlenie sovremennoj landshaftnoj obolochki Zemli [Formation of the Earth's Modern Landscape Mantle]. *Priroda — Nature*, 2012, no. 1, pp. 78–87.

11. *Rezultaty issledovaniy izmenenij klimata dlya strategij ustojchivogo razvitiya Rossijskoj Federacii* [Results of climate change research for sustainable development strategies in the Russian Federation]. Moscow, Rosgidromet Publ., 2006. 180 p.

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

13. Milankovich M. *Matematicheskaya klimatologiya i astronomicheskaya teoriya kolebanij klimata* [Mathematical climatology and astronomical theory of climate fluctuations]. Moscow, GONTI Publ., 1939. 207 p.

14. Pimenoff N., Venäläinen A., Järvinen H. *Climate Scenarios for Olkiluoto on a Time-Scale of 120,000 Years*. POSIVA 2011-04. Posiva OY. Olkiluoto. 2011. 109 p.

15. Kochkin B. T. Dolgosrochnyj prognoz klimaticheskikh izmenenij v rajone razmeshcheniya hranilishcha vysokoradioaktivnykh othodov (uchastok Enisejskij, Krasnoyarskij kraj) [Long-term forecast of climate changes in the location area of repository for high-level radioactive wastes (Yeniseyskiy site, the Krasnoyarsk region)]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya — Environmental Geoscience*, 2015, no. 2, pp. 52–65.

16. Boldyreva D. A., Vasilishin A. L., Ponizov A. V., Felicyn M. A., Borisova O. K., Panin A. V. Ocenka klimaticheskoy evolyucii v rajonah razmeshcheniya punktov glubinnogo zahoroneniya zhidkikh radioaktivnykh othodov dlya obosnovaniya dolgovremennoj bezopasnosti [Assessment of climate evolution in areas where liquid radioactive waste deep burial sites are located to justify long-term safety]. *Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost' — Nuclear and radiation safety*, 2019, no. 3 (93), pp. 1–11.

17. Hedin A., Olsson O. Crystalline Rock as a Repository for Swedish Spent Nuclear Fuel. *Elements*, 2016, vol. 12, pp. 247–252. DOI: 10.2113/gselements.12.4.247.

18. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto — Features, Events and Processes. Posiva OY. Olkiluoto. 2012. 467 p.

19. *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.

20. Anderson E. B., Savonenkov V. G., Lyubceva E. F. i dr. Rezul'taty poiskovykh i nauchno-issledovatel'skikh rabot po vyboru ploshchadok dlya podzemnoj izoljatsii 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.

21. *Paleoklimaty i paleolandshafty vnetropicheskogo prostranstva Severnogo polushariya. Pozdnij plejstocen — golocen*. Atlas-monografiya. [Paleoclimates and paleolandscapes of the extratropical space of the Northern hemisphere. Late Pleistocene — Holocene. Atlas-monograph]. Ed. by A. A. Velichko. Moscow, GEOS Publ., 2009. 120 p.

22. Svendsen J. I., Alexanderson H., Astakhov V. I., Demidov I. et al. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia. *Quaternary Science Reviews*, 2004, vol. 23, pp. 1229–1271.

23. Tarasov P. E., Peyron O., Guiot J. et al. Last Glacial Maximum climate of the former Soviet Union and Mongolia reconstructed from pollen and plant

- macrofossil data. *Climate Dynamics*, 1999, vol. 15 (3), pp. 227–240. DOI: 10.1007/s003820050278.
24. Medvedkov A. A. Geoekologicheskiy otklik srednetaezhnyh landshaftov Prienisejskoj Sibiri na po-teplenie klimata konca XX — nachala XXI veka [Geo-ecological response of middle taiga landscapes of Yenisei Siberia to climate warming in the late XX — early XXI century]. *Geoekologiya. Inzhenernaya ge-ologiya, gidrogeologiya, geokriologiya — Environmen-tal Geoscience*, 2014, no. 6, pp. 541–553.
25. *Izmenenie klimata i landshaftov za poslednie 65 millionov let (Kajnozoi: ot paleocena do golocena)* [Climate and environment changes during the last 65 million years (Cenozoic: from paleocene to ho-locene)]. Ed. by A. A. Velichko. Moscow, GEOS Publ., 1999. 260 p.
26. Kochkin B. T., Mal'kovskii V. I. Kolichestvenna-ya ocenka dolgosrochnoj evolyucii uslovij migracii radionuklidov iz mogil'nika na uchastke Enisejskij (Krasnoyarskij kraj) [Quantitative assessment of the long-term evolution of radionuclide migration conditions from the underground repository at the Yeniseiskii site (Krasnoyarsk region)]. *Geoekologi-ya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokri-ologiya — Environmental Geoscience*, 2016, no. 5, pp. 401–411.

Information about the authors

Kochkin Boris Timofeevich, Dr. 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 Tulskaaya 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 Tulskaaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: sbg@ibrae.ac.ru.

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

Bibliographic description

Kochkin B. T., Bogatov S. A., Saveleva E. A. Evolution of the Repository in Nizhnekanskiy Massif under the Influence of Climatic Factors. *Radioactive Waste*, 2021, no. 1 (14), pp. 63–75. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-63-75. (In Russian).