

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

УДК 621.039:550.424

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ДОЛГОСРОЧНОЙ ЭВОЛЮЦИИ УСЛОВИЙ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ ИЗ МОГИЛЬНИКА НА УЧАСТКЕ ЕНИСЕЙСКИЙ (КРАСНОЯРСКИЙ КРАЙ)

© 2016 г. Б. Т. Кочкин, В. И. Мальковский

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии,
минералогии и геохимии Российской академии наук,
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия. E-mail: btk@igem.ru*

Поступила в редакцию 24.09.2015 г.

Статья посвящена процедуре выявления и отбора факторов, событий и процессов, способных повлиять на долгосрочную безопасность могильника высокорadioактивных отходов, который намечено построить на участке Енисейский (Красноярский край). Определены геологические факторы, которые необходимо учитывать при разработке сценариев для оценки безопасности. Выполнены предварительные количественные прогнозы миграции радионуклидов в зависимости от эволюции климата и вертикального подъема территории. Оценена чувствительность модели миграции радионуклидов к указанным факторам.

Ключевые слова: *высокорadioактивные отходы, могильник, оценка безопасности, миграция радионуклидов, сценарии.*

ВВЕДЕНИЕ

Геологическая изоляция высокорadioактивных отходов (ВАО) и других типов отходов, содержащих долгоживущие радионуклиды, должна обеспечить надежную защиту населения и окружающей среды на исключительно продолжительный период, исчисляемый сотнями тысяч и миллионами лет. Доказать безопасность хранилища на такое время путем натурных экспериментов невозможно. Единственный способ – математическое моделирование и прогноз поступления радионуклидов в биосферу [11, 23].

В настоящий период состояние работ по созданию объекта геологической изоляции ВАО в России вышло на стадию строительства подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) на участке Енисейский в Красноярском крае. Этот участок, расположенный в пределах Нижнеканского кристаллического массива, признан пригодным для реализации подобного проекта по результатам изыскательских работ [17]. Главная цель исследований, которые будут выполняться в ПИЛ и окружающей ее геологической среде в ближайшие годы, – оценка безопасности будущего объекта. Проблема в том, что достоверность оценки безопасности падает с ростом продолжительности

прогноза. Рост неопределенностей в течение длительного периода, на который нужно осуществить прогноз миграции радионуклидов и оценку последствий для населения, остается ключевой проблемой в доказательстве безопасности [9, 25].

Для того чтобы уменьшить или ограничить пределы неопределенностей, связанных с прогнозом отдаленного будущего, используются разные приемы. Один из них – разработка ансамбля сценариев, которые охватывают максимально широкий круг возможных путей эволюции системы изоляции [23, 25].

Статья посвящена анализу геологических факторов, событий и процессов (ФСР), которые влияют на безопасность объекта на участке Енисейский, и проиллюстрирована количественными примерами влияния изменчивости этих ФСР на миграцию радионуклидов в геосфере.

ФСР – НОРМАТИВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ ОБОСНОВАНИЯ

Общепризнано, что благоприятный прогноз ни одного из геологических или других условий, касающихся среды изоляции ВАО, сколь бы долгосрочным он ни был, не является самодостаточным доказательством безопасности будущего могиль-

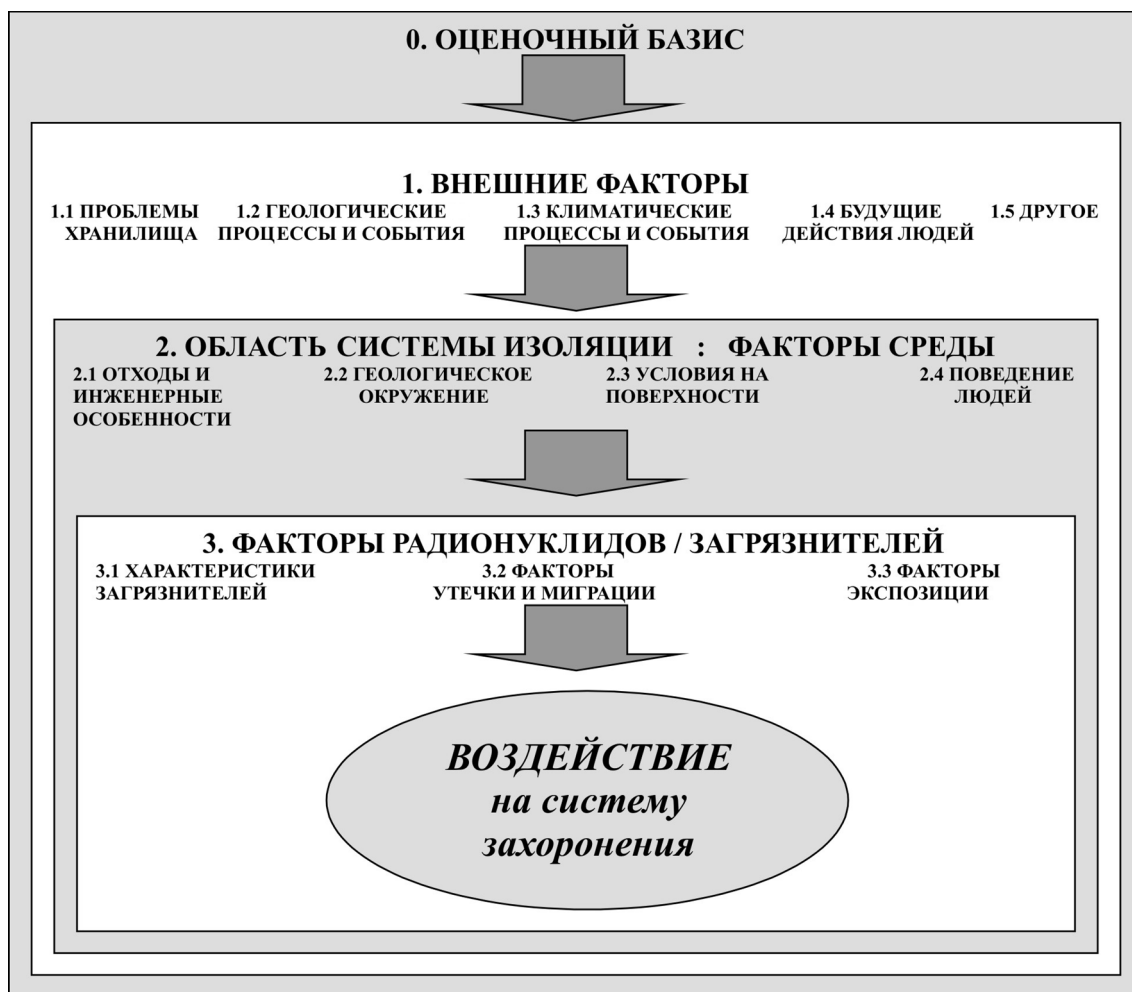


Рис. 1. Схема классификации, используемой в Международном перечне ФСП, действующих при геологической изоляции радиоактивных отходов (по [23]).

ника. Единственными критериями безопасности служат установленные в нормативных документах параметры допустимых значений дозовых нагрузок и радиологических рисков для населения [4, 5]. Тем не менее долгосрочный прогноз геологических и иных условий, относящихся к среде изоляции, необходим для разработки сценариев миграции радионуклидов из могильника в биосферу. Прогнозы тех геологических условий, которые отличаются большой неопределенностью, будут отражены в сценарных вариантах как дополнительные аргументы при обосновании безопасности [23].

Согласно действующим в России нормативным документам (НП-055-14) и рекомендациям международных организаций (МАГАТЭ, АЯЭ ОБСЕ и др.), идентификация ФСП – необходимая процедура при принятии решений по реализации проектов геологической изоляции ВАО [4, 5, 23].

Аббревиатура ФСП, используемая в статье, объединяет определения, данные в российских нормативных документах и зарубежных руководствах.

В мире проделана огромная работа по анализу безопасности геологических хранилищ и созданию баз ФСП, которые рассчитаны или на все типы могильников, как, например, общеевропейская [19], или ориентированы на условия изоляции в определенном типе пород, например, кристаллических, как шведская [22], финская [26] или канадская [21]. Общеевропейскую или другие базы ФСП рекомендуется использовать в качестве хорошего помощника при обосновании гарантии того, что не забыт ни один важный ФСП для рассматриваемой площадки [23], в нашем случае на участке Енисейский.

Международная классификация ФСП исходит из требований регулятора (цель оценки, временная шкала оценки, будущее поведение системы,

допустимые дозы облучения для населения и др.), которые включены в оценочный базис (рис. 1). ФСП группируются по принадлежности к отдельным элементам системы, а также на внешние или внутренние по отношению к системе в целом. Это – запутанная классификация, поскольку один и тот же ФСП рассматривается с каждой из перечисленных выше сторон. Ее достоинством можно считать системный подход и, соответственно, гарантированную полноту охвата ФСП и рассмотрения всех возможных взаимоотношений между ними.

Предметом дальнейшего анализа будут те ФСП, которые связаны с эволюцией системы и используются при разработке сценариев.

К сожалению, и международный опыт имеет ограниченное применение в российской практике. Ограничения связаны с несколькими причинами. Во-первых, нормативные документы разных стран, в том числе России, допускают размещение могильников ВАО с долгоживущими радионуклидами в разных геологических средах (кристаллические породы, соли, глины). Очевидно, что процессы миграции в различных средах станут протекать по-разному, а их развитие будет определяться разными факторами. В России потенциально пригодной средой для геологической изоляции ВАО выбраны кристаллические породы (гранитоиды) участка Енисейский, локализованные в зоне затрудненного водообмена [12]. Зарубежными аналогами такой среды служат площадки Форсмарк (Швеция), Олкилуито (Финляндия) [22, 26] и др.

Во-вторых, если брать только площадки в кристаллических породах (Швеция, Финляндия, Канада, США и др.), то даже на них геологическая среда будет отличаться по другим факторам, относящимся к составу пород, их обводненности, истории развития территории и структурным особенностям. Так, среда на площадке Юкка Маунтин (США) относится к безводным. Размещение ВАО планируется в зоне аэрации, имеющей здесь мощность в несколько сотен метров [27]. Обводненность среды площадок Форсмарк, Олкилуито или предполагаемой среды в Канаде в принципе соответствует обводненности среды на участке Енисейский.

В то же время геотектоническая позиция и история развития последних из перечисленных зарубежных площадок за последние миллионы лет существенно отличаются от истории участка Енисейский. Зарубежные площадки расположены

в пределах древних щитов, очень стабильных в тектоническом отношении. Сейсмичность этих щитов очень низка. Это делает их весьма привлекательными для размещения геологических хранилищ ВАО. Тем не менее сильные разрушительные землетрясения в них также происходят. Вероятность экстремальных событий для площадок, расположенных на щитах древних платформ, оценивается хотя и неопределенно, но все-таки как крайне низкая. Так, в работе [20], выполненной для провинции Онтарио, на территории которой планируется разместить канадский могильник, дается прогноз в 20–40 событий $M \geq 6$ за 10 000 лет (продолжительность голоцена) на территорию площадью 10^6 км², причем 33–100% этих событий могли бы достичь поверхности. Напротив, участок Енисейский, расположенный в зоне постплатформенной тектонической активизации, характеризуется относительно высоким уровнем сейсмичности (до 8 баллов) по карте ОСР-97D [7], которая соответствует 10-тысячелетнему периоду повторяемости ожидаемого сейсмического эффекта и 0.5%-ной вероятности возможного его превышения в течение 50 лет. В отношении тектонической активности участок Енисейский ближе к площадке Юкка Маунтин [27].

Территория зарубежных площадок, расположенных в северных районах, регулярно перекрывалась ледниковыми панцирями (несколько раз только за последний миллион лет). В эпохи оледенения уровень океана понижался, а земная кора под ледниками испытывала относительное погружение. В периоды отступления ледников на север, территория площадок Форсмарк и Олкилуито оказывалась под уровнем океана. К настоящему времени облегчение нагрузки на земную кору привело к подъему территории и отступлению океана [22, 26]. Территория участка Енисейский, напротив, никогда не перекрывалась ледниками [10, 16]. Тем не менее в каждое из последних оледенений она оказывалась, как и площадки на северных территориях, в зоне развития сплошной многолетней мерзлоты на значительную глубину.

Также очевидно, что характер ограничивающих разломов и водопроводящих трещинных зон в пределах конкретных площадок (конкретная позиция этих структур будет уточняться в ходе детальных исследований) различается из-за особенностей состава пород и истории развития процессов минерализации.

Все сказанное означает, что прямой перенос перечней геосферных ФСП, выявленных для зарубежных площадок, на участок Енисейский невозможен. Это значит, что ФСП, действительные для

участка Енисейский, должны быть определены на основе анализа реальных геологических условий участка и конкретного положения площадки размещения.

АДАПТАЦИЯ ПЕРЕЧНЕЙ ФСП К УЧАСТКУ ЕНИСЕЙСКИЙ

В геологической среде рассматриваемого района в долгосрочной по геологическим меркам перспективе (ближайшие 100 000 лет или более) будут развиваться незавершенные процессы, а также, вероятно, повторяться события, случавшиеся за аналогичный предшествующий период времени.

В данном разделе приводятся результаты анализа ФСП, которые связаны с геологической средой. Они могут проявить себя главным образом в геосфере, окружающей подземное сооружение. В некоторых случаях геологические ФСП могут повлиять на процессы в системе инженерных барьеров (СИБ), например, смещения пород могут вызвать деформацию канистр с ВАО. В других случаях они могут воздействовать на условия в биосфере, например, на гидрогеологические условия. Кроме того, некоторые внешние ФСП способны вызвать изменения в геологической среде, например, климатические изменения в ледниковые периоды вызовут формирование слоя вечной мерзлоты, который изменит гидрологические условия в области геосферной модели.

Еще на этапе региональных изысканий в районе Нижнеканского гранитного массива благодаря использованию специальных геологических критериев была практически исключена возможность проявления ФСП, которые могли бы привести к развитию катастрофических по своим последствиям сценариям [1, 2, 6]. К ним относятся особо сильные землетрясения, вулканизм, полная денудация перекрывающей толщи пород, обильное поступление подземных вод к ВАО и непреднамеренное проникновение человека при поисковом бурении. Для дальнейшего анализа остаются главным образом те ФСП, которые влияют на эволюцию гидрогеологических условий миграции радионуклидов через геосферу.

Идентификация геологических ФСП, действительных для площадки на участке Енисейский, выполнялась методом экспертной оценки. ФСП из длинного перечня, составленного на основе совместного анализа зарубежных перечней, оценивались по нескольким направлениям: значимость ФСП в отношении инженерного проекта

хранилища (например, возможные изменения вмещающих пород под влиянием размещения в них тепловыделяющих ВАО); значимость ФСП в отношении геологической среды и ее вероятного будущего в зависимости от изменения климата и других внешних факторов (например, образование слоя вечномёрзлых пород); значимость ФСП, закрепленная в национальных и международных нормативных требованиях и руководствах; доступные знания и информационные пробелы в отношении ФСП, уровень понимания процессов (например, для участка Енисейский полностью отсутствуют данные по микробиологии среды размещения отходов); опыт экспертных заключений от выполнения зарубежных программ по отбору ФСП.

Были проанализированы следующие сценарные геологические ФСП: климатические условия; подъем/опускание района могильника; взаимодействия порода – вода; изменения среды под воздействием теплового потока от ВАО; перераспределение напряжений при проходке выработок; сейсмическая активность и породный крип; растворение и осаждение новообразованных минералов в трещинах; изменение (выветривание) пород вдоль путей фильтрации подземных вод; внедрение пресных (соленых) подземных вод; влияние микробиологических популяций.

Критериями отбраковки сценарных геологических ФСПов послужили отсутствие каких-либо или достаточных данных на сегодняшнем уровне изученности при любой значимости, низкая и средняя значимость для безопасности после закрытия могильника вместе с оптимистическим эффектом их влияния, краткосрочный период проявления.

В результате остались ФСП, которые имеют не только существенное значение в долгосрочной безопасности, но и обоснованы достаточным количеством информации (табл. 1).

Анализ оставшихся геологических ФСП показал, что вариации долгосрочных сценариев эволюции геосферы связаны с неопределенностями в трендах процессов и оценках вероятности случайных событий. Учитывая неопределенность в предсказаниях сейсмогеодинамических событий и возможных непреднамеренных вторжений человека, последствия этих опасных явлений целесообразно рассматривать по дополнительным сценариям, не включая их в нормальную эволюцию и базовый сценарий.

Неопределенности, связанные с изменчивостью трендов длительных процессов, можно

Таблица 1. Геологические ФСП, которые в наибольшей степени определяют сценарии развития могильника на участке Енисейский

№	ФСП
1	Долгосрочные изменения глобального климата (увлажнение/иссушение и похолодание/потепление), ведущие к изменениям в гидродинамике подземных вод
2	Долгосрочный подъем участка размещения могильника, ведущий к вертикальной дифференциации уровня подземных вод по району и ускорению водообмена
3	Сейсмогеодинамические процессы и их последствия в проницаемости пород в отдаленном будущем
4	Будущая деятельность человека
5	ФСП, имеющие значение на начальных периодах изоляции (первые тысячи лет), включая период эксплуатации

уменьшить, используя консервативные параметры для прогнозных оценок [8, 23]. Ниже рассмотрена возможная изменчивость климата и подъема территории на длительную перспективу и выполнена консервативная оценка влияния этой изменчивости на миграцию радионуклидов.

ПРЕДСТОЯЩИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В РАЙОНЕ УЧАСТКА ЕНИСЕЙСКИЙ

Климатические условия – постоянно действующий фактор. Он может влиять на различные процессы в геологической среде и биосфере. Так, *увлажнение (гумидизация)* или *иссушение (аридизация)* климата региона способны привести к изменению уровня подземных вод и положения области разгрузки. Это вызовет изменение регионального поля фильтрации подземных вод. *Похолодание* или *потепление* климата может вызвать образование или оттаивание вечной мерзлоты и также привести к изменению регионального поля фильтрации.

Время проявления и продолжительность действия всех этих процессов зависит от долгосрочного прогноза климата для конкретного региона. Ранее прогноз климата для региона будущего могильника был составлен Б.Т. Кочкиным на основе анализа доступных палеореконструкций прошлых климатов и общих тенденций развития предстоящих климатов [10].

Предсказательные модели на длительные сроки (с интервалом 1000 или 10 000 лет) основаны на расчете вариаций солнечной радиации и перспективных оценках концентрации CO_2 в атмосфере [24]. Если инсоляция, которая определяется изменением наклона земной оси по отношению к плоскости ее орбиты, прецессией земной оси и эксцентриситетом земной орбиты, точно рассчитывается для любой широты, то концентрация

CO_2 – весьма неопределенная величина и зависит от многих, в том числе неизученных факторов. Исходя из цикличности инсоляции и имеющихся реконструкций палеоклиматов, предполагается, что сравнительно теплый климат текущего межледниковья может смениться на существенно более холодный климат уже через первые тысячи лет [3].

Простейшие расчеты, выполненные в зависимости от прогноза общего количества CO_2 , которое будет выброшено в атмосферу, показывают, что наступление ледникового периода может быть отложено на десятки и даже сто тысяч лет [18, 24]. В любом случае предстоящие климаты в регионе участка Енисейский сначала будут более теплыми, чем в настоящее время, за счет парникового эффекта, а затем, после окончания воздействия антропогенных выбросов CO_2 , условия вернутся к естественному чередованию коротких сравнительно теплых межледниковий и продолжительных ледниковых периодов (рис. 2). Такую периодичность можно ожидать в ближайший миллион и более лет, что вполне достаточно для целей обоснования безопасности геологических могильников.

В качестве параметров, которые будут характеризовать важные для гидрогеологических прогнозов условия предстоящих теплых и холодных периодов, можно взять характеристики климатов-аналогов из геологического прошлого региона Западной Сибири (табл. 2).

В случае относительно незначительного на 2°C потепления (аналог – Казанцевское межледниковье) наибольшее повышение приземной температуры в Сибири будет наблюдаться в зимнее время. Количество осадков увеличится. В случае существенного повышения среднегодовых температур на 10°C (аналог – Тобольское межлед-

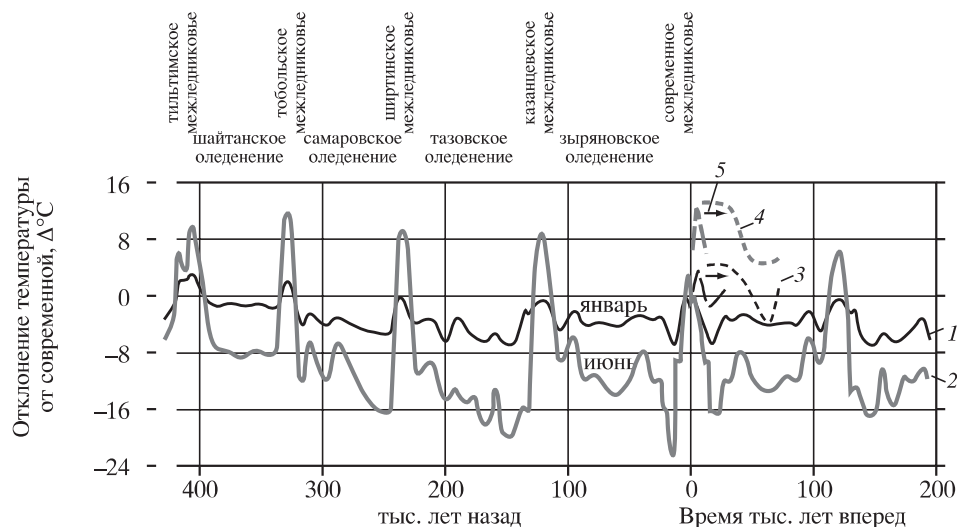


Рис. 2. Исторические кривые палеотемператур января и июня для центра Восточно-Европейской равнины (по [3]) и экстраполяция в будущее кривых палеотемператур без учета парникового эффекта (1 и 2) и с его учетом (3 и 4). Удлинение интервала нынешнего теплого межледниковья с ростом выбросов парниковых газов (5). Вверху – Западно-Сибирские аналоги названий оледенений и межледниковий.

никовье) климат принципиально не изменится и, сохранив те же тенденции, останется в пределах умеренно холодной зоны, при этом станет более влажным, особенно в зимнее время. Такой климат уже будет близок к современному климату Европейской равнины России.

Климат ледниковой эпохи, при которой в районе будущего могильника среднегодовая температура будет ниже современной на 7–8°C (аналоги – Самаровское и Шайтанское оледенения), вероятно,

наступит через несколько тысяч (или десятков тысяч при обильных выбросах парниковых газов) лет, однозначно будет гораздо более суровый, чем сегодня, и его можно классифицировать как снеговой тундровый. По данным имеющихся реконструкций, мощность слоя вечномёрзлых пород в районе могильника может достигнуть 600 м [16], что даже ниже, чем планируемый уровень размещения хранилища. Это существенно замедлит проникновение метеорных вод в подземную гидросферу.

Таблица 2. Параметры климатов-аналогов для участка Енисейский (по [6, 17])

Климаты		Современный	Казанцевское межледниковье	Тобольское межледниковье	Самаровское и Шайтанское оледенения
Общая характеристика климата (тип по Кеппену)		резко континентальный (умеренно холодный с сухой зимой)	теплее и влажнее, чем современный (умеренно холодный, вероятно, с более влажной зимой)	теплее и влажнее, чем современный (умеренно холодный с влажной зимой)	очень холодный, (снеговой тундровый)
Параметры					
Температура, °С и отклонения от современной, Δ°С Атмосферные осадки, мм и отклонения от современных, Δ мм Мощность зоны вечномерзлых пород, м	среднегодовая	−1	Δ+2	Δ +10	Δ −(7–8)
	июль	+18.5	Δ0	Δ +	Δ −(4–6)
	январь	−21	Δ+6°	Δ +(7–9)	Δ −8
	среднегодовые	400	Δ+100	Δ +	нет данных
	лето	300			нет данных
	зима	100			нет данных
		отсутствует	отсутствовала	отсутствовала	достигала 600 м

Увеличение количества осадков в более теплые периоды, чем ныне, может усилить водообмен в подземной гидросфере и ускорить рассеивание радионуклидов (см. табл. 2). Напротив, промерзание верхней части геосферы окажет противоположное влияние на гидродинамику подземного потока. Он, очевидно, сильно ослабнет, что будет способствовать лучшему удержанию радионуклидов в геосфере.

Таким образом, консервативные оценки безопасности могильника целесообразно делать, удлиняя в базовом сценарии продолжительность и величину предстоящего потепления климата, которое является следствием парникового эффекта от антропогенной деятельности человека. Этот период будет характеризоваться большим количеством атмосферных осадков.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРЕДСТОЯЩЕГО ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА

Были выполнены расчеты продвижения урана в геосфере для сценария с повышенным количеством атмосферных осадков на периоды 1000, 10 000 и 50 000 лет в будущее. Основные подходы к разработке миграционной модели были изложены в работе [15]. Потепление и увеличение количества осадков в математической модели задается повышением уровня подземных вод. Взяв самый неблагоприятный случай – этот уровень просто совпадает с рельефом дневной поверхности. В базовом (наиболее реалистическом) сценарии уран и другие актиноиды будут удерживаться глинистым буфером в пределах могильника в течение всего срока изоляции. В геологическую среду они могут попасть только в аварийных сценариях, в которых предусматриваются некие нарушения целостности буфера. В нашем прогнозе “что, если” глинистый буфер отсутствует, и выщелачивание урана начинается сразу после размещения ВАО. Это чрезвычайно консервативное допущение.

Результаты расчетов представлены на рис. 3, на котором показаны границы фронта распространения урана на разные периоды будущего в плановом сечении, проходящем на уровне загруженной части хранилища, и в разрезе. Для сравнения показаны прогнозы для обоих условий – современных и более влажных. Протяженность ореола загрязнения в условиях максимальной обводненности по сравнению с современными условиями увеличится по латерали не более чем на 2–5% даже через 50 000 лет.

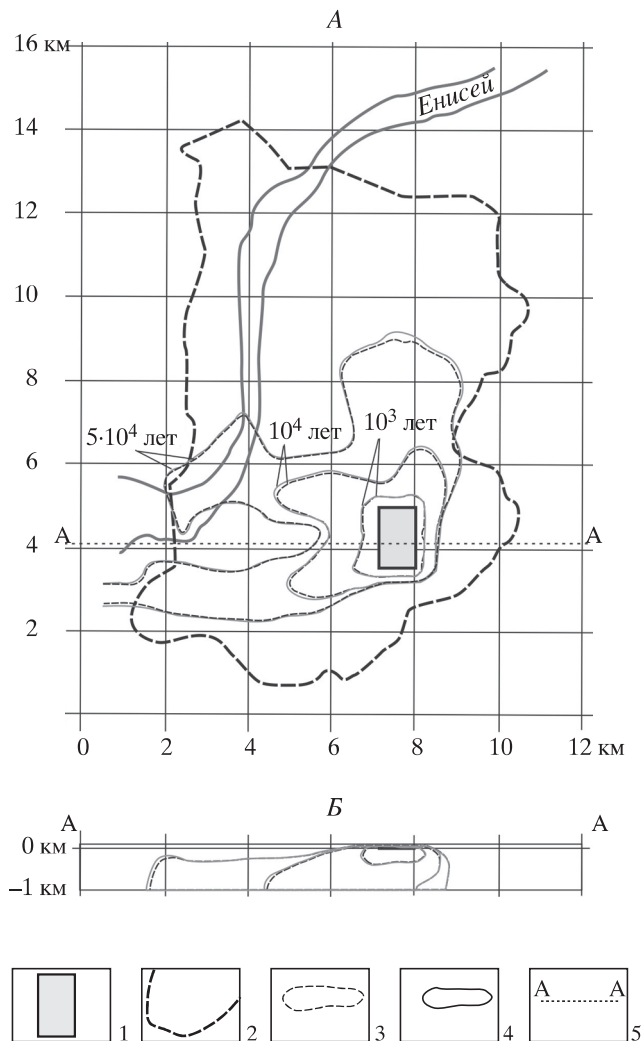


Рис. 3. Результаты прогноза продвижения фронта загрязнения ураном подземных вод в плановом сечении на уровне могильника (А) и в разрезе (Б) в сценариях с увлажнением климата: 1 – площадка могильника; 2 – область моделирования; граница загрязнения при: 3 – сохранении современных климатических условий, 4 – условия резкого увлажнения климата; 5 – линия разреза. Цифрами на плане показан период прогноза.

Таким образом, количественная оценка влияния предстоящего более влажного климата на интенсивность миграции радионуклидов в геосфере показала, что геосферная система сравнительно мало чувствительна к фактору возможного повышения обводненности среды.

ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ПОДЪЕМ УЧАСТКА

В регионах новейших тектонических движений, к которым относится и Енисейский кряж, подъем возвышенных участков сопровождается опусканием сопряженных низменностей или впадин из-за дифференцированного характера

Таблица 3. Скорость подъема участка Енисейский по разным данным

№	Расчетный период	Скорость подъема	Источник
1	9.7 тыс. лет	около 1 мм/год	Е.Б. Андерсон и др. [1]
2	1.8 млн лет	0.2 мм/год	Р.М. Лобацкая [13]
3	5 млн лет	0.08–0.09 мм/год	Н.В. Лукина [14]

движений. Если Атамановское поднятие, в пределах которого расположен участок Енисейский, вместе с Енисейским краем в новейший период испытывало воздымание, то долина Енисея принадлежит к опускающейся Западно-Сибирской плите.

Подъем возвышенности, на которой располагается площадка могильника, и опускание прилегающей долины Енисея приведут в будущем к большей вертикальной дифференции уровня подземных вод по площади. Эта дифференциация, в свою очередь, вызовет ускорение водообмена в подземной ги-

дросфере. Масштаб процесса зависит от реальной скорости тектонических движений.

Приближенная прогнозная оценка относительного подъема области питания над областью разгрузки была выполнена путем анализа литературы, касающейся результатов изучения ярусности рельефа и поверхностей выравнивания в регионе, их смещений за отдельные периоды новейшего этапа тектонической активизации. Известно, что эти движения носят прерывистый и обратимый характер, из-за чего средняя скорость существенно зависит от периода осреднения: чем он продолжительнее, тем ниже средняя скорость (табл. 3).

Можно предположить, что тенденция к подъему участка Енисейский относительно долины р. Енисея будет сохраняться, по крайней мере, до окончания новейшего тектонического этапа – это миллионы лет. Для консервативных оценок в гидродинамических расчетах в пределах десятков тысяч лет можно использовать максимальные скорости подъема, т.е. около 1 мм/год.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОДЪЕМА ПЛОЩАДКИ НАД УРОВНЕМ ЕНИСЕЯ

Были выполнены расчеты продвижения урана в геосфере для сценария с постоянным воздыманием участка Енисейский относительно долины р. Енисея со скоростью 1 мм/год на периоды 1000, 10 000 и 50 000 лет в будущее. Постоянное воздымание площадки относительно долины Енисея формирует слабо вогнутую (гиперболическую) кривую профиля равновесия склонов поднятия по отношению к общему базису денудации – долине Енисея. Максимальный подъем придется на вершинные участки водоразделов, минимальный – на урез воды р. Енисей. В математической модели этот профиль задается переменной скоростью повышения уровня подземных вод в зависимости от высоты расчетной точки над уровнем долины.

Базовая миграционная модель была принята с теми же параметрами, что и в предыдущем случае. В нашем прогнозе “что, если” приняты те же самые чрезвычайно консервативные допущения

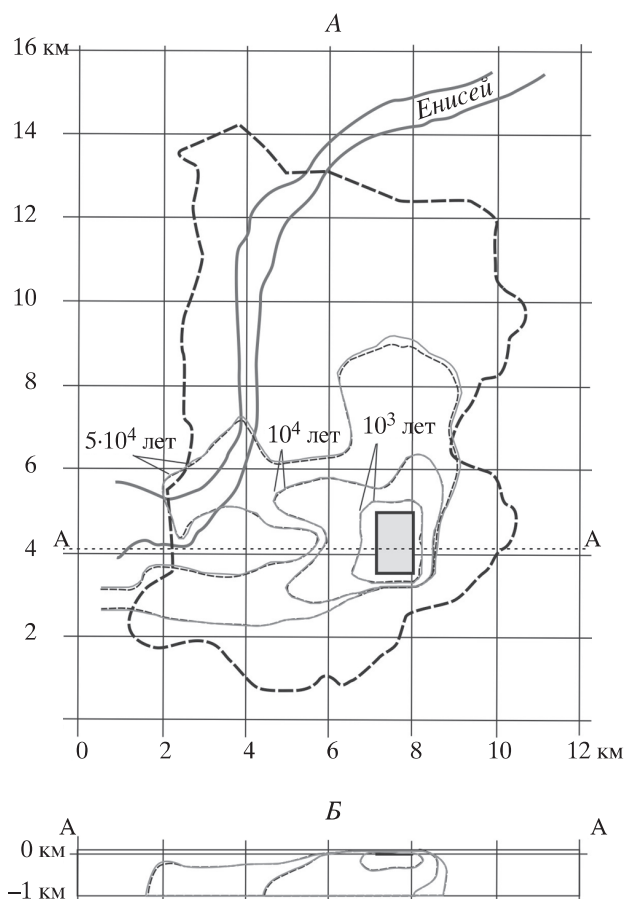


Рис. 4. Результаты прогноза продвижения фронта загрязнения ураном подземных вод в плановом сечении на уровне могильника (А) и в разрезе (Б) в сценариях с постоянным подъемом площадки могильника. Условные обозначения см. рис. 3.

по структуре СИБ, что и в предыдущей модели, — глинистый буфер отсутствует, и выщелачивание урана начинается сразу после размещения ВАО.

Результаты расчетов представлены на рис. 4. На нем показаны границы фронта распространения урана на разные периоды будущего в плановом сечении, проходящем на уровне загруженной части хранилища, и в разрезе. Для сравнения показаны прогнозы для обоих условий — с сохранением современного профиля равновесия (без подъема) и с постоянным подъемом водораздела над долиной Енисея.

Таким образом, количественная оценка влияния продолжающегося подъема площадки на интенсивность миграции радионуклидов в геосфере показала, что геосферная система сравнительно мало чувствительна и к этому фактору.

ВЫВОДЫ

Анализ доступной информации показал, что перечни геосферных ФСП специфичны для каждой площадки, даже при сходных геологических условиях. В связи с этим ФСП, действительные для участка Енисейский, были изучены с учетом реальных геологических условий участка и конкретного положения площадки размещения.

Анализ геосферных ФСП, действительных для участка Енисейский, с учетом имеющейся информации по ним, показал, что наиболее существенное влияние на долгосрочную эволюцию могильника и его безопасность окажут изменения климатических условий, вертикальный подъем участка, и маловероятные события, связанные с сейсмогеодинамическими процессами и непреднамеренным вмешательством человека.

Консервативные оценки утечки радионуклидов из могильника были выполнены путем удлинения продолжительности периода предстоящего потепления климата и использования максимальной скорости (около 1 мм/год) вертикального подъема территории. Было показано, что геосферная система сравнительно мало чувствительна к обоим этим факторам.

Можно заключить, что главным фактором, определяющим миграцию радионуклидов в геосфере участка Енисейский, являются фильтрационные свойства среды, сложенной слаботрециноватыми гнейсами. Ее фильтрационные свойства, включая зоны повышенной трещинной проницаемости, должны стать объектом детального изучения в предстоящий период.

Статья подготовлена в рамках Государственного задания ИГЕМ РАН на 2015 г. Тема (проект): № 0136-2014-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андерсон Е.Б., Белов С.В., Камнев Е.Н. и др.* Подземная изоляция радиоактивных отходов. М.: Горная книга, 2011. 558 с.
2. *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 край) // Тр. Радиового ин-та им. В.Г. Хлопина, 2006. Т. 11. С. 8–64.
3. *Величко А.А.* Становление современной ландшафтной оболочки Земли // Природа. 2012. № 1. С. 78–87.
4. *Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности № SSR-5.* Вена: МАГАТЭ, 2011. 104 с.
5. *Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. НП-055-14.* М.: Ростехнадзор, 2014. 27 с.
6. *Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО* // Материалы КНТС. СПб.: Горно-химический комбинат, НПО “Радиовый институт им. В.Г. Хлопина”, 1999. 182 с.
7. *Карта ОСР-97D.* М.: ИФЗ РАН, 2002 (<http://www.seismos-u.ifz.ru/oscr-97d>).
8. *Кочкин Б.Т.* Принцип консерватизма в оценке безопасности могильников высокорadioактивных отходов // Геоэкология. 2012. № 5. С. 436–448.
9. *Кочкин Б.Т.* Обоснование долгосрочной безопасности геологических хранилищ высокорadioактивных отходов // Геоэкология. 2013. № 4. С. 342–352.
10. *Кочкин Б.Т.* Долгосрочный прогноз климатических изменений в районе размещения хранилища высокорadioактивных отходов (участок Енисейский, Красноярский край) // Геоэкология. 2015. № 2. С. 52–65.
11. *Лавров Н.П., Величкин В.И., Кочкин Б.Т. и др.* Концепция оценки безопасности хранилищ отработавших ядерных материалов, размещаемых в кристаллических породах // Геоэкология. 2010. № 3. С. 195–206.
12. *Лобанов Н.Ф., Бейгул В.П., Камнев Е.Н., Лопатин П.В., Ревенко Ю.А., Шрамко И.В.* Федеральный объект окончательной подземной изоляции долгоживущих РАО на Горно-химическом комбинате // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды, 2011. № 1. С. 10–23 (<http://www.atomic-energy.ru/articles/2011/06/15/23447>).
13. *Лобацкая Р.М.* Неотектоническая разломно-блоковая структура зоны сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 2. С. 141–151.
14. *Лукина Н.В.* Активные разломы зоны сочленения Сибирской платформы и Алтае-Саянской орогенической области // Бюл. МОИП. Отд. геолог. 1996. Т. 71. Вып. 5. С. 25–32.
15. *Мальковский В.И., Пэк А.А., Кочкин Б.Т., Озерский А.Ю.* Оценка потенциального загрязнения

- геологической среды при подземном захоронении радиоактивных отходов на участке “Енисейский” Нижнеканского массива (Красноярский край) // Геоэкология. 2013. № 6. С. 485–492.
16. Палеоклимат и палеоландшафты внетропического пространства Северного полушария. Поздний плейстоцен – голоцен. М.: ГЕОС, 2009. 120 с.
 17. Поляков Ю.Д., Порсов А.Ю., Бейгул В.П., Паленов М.В. Создание подземной исследовательской лаборатории в Красноярском крае // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2013. № 1. С. 14–21.
 18. BIOCLIM, Deliverable D7: Continuous climate evolution scenarios over Western Europe (1000 km scale). ANDRA, 2003.
 19. Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste. An International Database. Paris: OECD-NEA, 2000. 88 p.
 20. Fenton C.H., Adams J., Halchuk S. Seismic hazards assessment for radioactive waste disposal sites in regions of low seismic activity // Geotech. and Geol. Engineering. 2006. V. 24. P. 579–592.
 21. Garisto F. Fourth Case Study: Features, Events and Processes. NWMO TR-2012–14. Toronto: NWMO, 2012. 310 p.
 22. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. SKB TR-11–01. Svensk Kärnbränslehantering AB, 2011. V. I–III.
 23. Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Paris: OECD-NEA Publishing, 2012. 242 p.
 24. Pimenoff N., Venäläinen A., Järvinen H. Climate Scenarios for Olkiluoto on a Time-Scale of 120,000 Years. POSIVA 2011–04. Olkiluoto: POSIVA OY, 2011. 109 p.
 25. Safety cases for deep geological disposal of radioactive waste: where do we stand? Paris: OECD-NEA, 2008. 424 p.
 26. Safety cases for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto – Synthesis 2012. POSIVA 2012–12. Olkiluoto: POSIVA OY, 2012. 324 p.
 27. Geologic framework model (GFM3.1). MDL-NBS-GS-000002 REV 00 ICN 02. Washington, D.C.: U.S. DOE. Office of Civilian Radioactive Waste Management, 2000. 104 p.
 3. Velichko, A.A. [The formation of the modern landscape cover of the Earth]. *Priroda*, 2012, no. 1, pp. 78–87 (in Russian).
 4. *Zakhoronenie radioaktivnykh otkhodov. Konkretnye trebovaniya bezopasnosti SSR-5*. [Disposal of radioactive waste. Specific safety requirements. IAEA safety standards no. SSR-5]. Vienna, IAEA, 2011, 83 p.
 5. *Zakhoronenie radioaktivnykh otkhodov. Printsipy, kriterii i osnovnye trebovaniya bezopasnosti. NP-055–14*. [Radioactive waste disposal: Principles, criteria and basic safety requirements. NP-055–14] Moscow, ROSTEKHNADZOR, 2014, 27 p. (in Russian).
 6. *Issledovaniya granitoidov Nizhnekanskogo massiva dlya zakhoroneniya RAO* [Studies of Nizhnekansky granite massif for RW disposal]. St. Petersburg, FSUE “Gorno-khimicheskii kombinat”, NPO “Radiyevyi institut im. V.G. Khlopina”, 1999, 182 p. (in Russian).
 7. *Karta OSR-97D*. [GSZ-97D Map.]. Available at: <http://seismos-u.ifz.ru/maps/ocp-97d.rar>.
 8. Kochkin, B.T. [Conservatism principle for the safety assessment of the high-level radioactive waste repository]. *Geoekologiya*, 2012, no. 5, pp. 436–448 (in Russian).
 9. Kochkin, B.T. [Substantiation of the long-term safety of geological repository for high-level radioactive wastes]. *Geoekologiya*, 2013, no. 4, pp. 342–352 (in Russian).
 10. Kochkin, B.T. [Long-term forecast of climate changes in the location area of repository for high-level radioactive wastes (Yeniseyskii site, the Krasnoyarsk region)]. *Geoekologiya*, 2015, no. 2, pp. 52–65 (in Russian).
 11. Laverov, N.P., Velichkin, V.I., Kochkin, B.T., et al. [Safety Assessment Concept for Repositories of Spent Nuclear Materials in Crystalline Rocks]. *Water Resources*, 2011, vol. 38, no. 7, pp. 872–880 (in Russian).
 12. Lobanov, N.F., Beigul, V.P., Kamnev, E.N., et al. [Radioactive waste final disposal facility for long-lived RW at the Mining and Chemical Combine]. *Bezopasnost' yadernykh tekhnologii i okruzhayushchei sredy*, 2011, no. 1, pp. 10–23 (in Russian).
 13. Lobatskaya, R.M. [Neotectonic fault-block structure of the junction zone between the Siberian platform and the West Siberian plate]. *Geologiya i geofizika*, 2005, vol. 46, no. 2, pp. 141–151 (in Russian).
 14. Lukina, N.V. [Active faults in the junction zone between the Siberian platform and the Altai-Sayan orogenic area]. *Byull. MOIP. Otd. geol.*, 1996, vol. 71, no. 5, pp. 25–32 (in Russian).
 15. Mal'kovskii, V.I., Pek, A.A., Kochkin, B.T., Ozer-skii, A.Yu. [Assessment of potential pollution of the geological environment upon underground disposal of radioactive waste at the “Eniseiskii” site in the Nizhnekanskii mountain range (Krasnoyarsk region)]. *Geoekologiya*, 2013, no. 6, pp. 485–492 (in Russian).
 16. *Paleoklimaty i paleolandschafty vnetropicheskogo prostranstva Severnogo polushariya. Pozdnii pleistotsen – golotsen*. [Paleoclimates and paleoenvironments

REFERENCES

- of extra-tropical regions of the Northern Hemisphere. Late Pleistocene – Holocene. Atlas-monograph.]. A.A. Velichko, Editor-in-chief, Moscow, GEOS, 2009, 120 p. (in Russian).
17. Polyakov, Yu.D., Porsov, A.Yu., Beigul, V.P., Palenov, M.V. [The construction of the underground research laboratory in the Krasnoyarsk region]. *Bezopasnost' yadernykh tekhnologii i okruzhayushchei sredy*, 2013, no. 1, pp. 14–21 (in Russian).
 18. BIOCLIM, Deliverable D7: Continuous climate evolution scenarios over Western Europe (1000 km scale). Paris: ANDRA, 2003.
 19. Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste. An International Database. Paris: OECD Publ., 2000, 88 p.
 20. Fenton, C.H., Adams, J., Halchuk, S. Seismic hazards assessment for radioactive waste disposal sites in regions of low seismic activity. *Geotech. and Geol. Engineering*, 2006, vol. 24, pp. 579–592.
 21. Garisto, F. Fourth Case Study: Features, Events and Processes. NWMO TR-2012-14. Toronto: NWMO, 2012, 310 p.
 22. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. SKB TR-11-01. Stockholm: Svensk Kärnbränslehantering AB, 2011, vol. I-III.
 23. Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Outcomes of the NEA MeSA Initiative. Paris: OECD/NEA Publ., 2012, 242 p.
 24. Pimenoff, N., Venäläinen, A., Järvinen, H. Climate Scenarios for Olkiluoto on a Time-Scale of 120,000 Years. POSIVA 2011-04. Olkiluoto: POSIVA OY, 2011, 109 p.
 25. Safety Cases for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand? Symp. Proc. Paris, France 23–25 January 2007. Paris: OECD Publ., 2008, 424 p.
 26. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto – Synthesis 2012. POSIVA 2012–12. Olkiluoto: POSIVA OY, 2012, 324 p.
 27. Geologic Framework Model (GFM3.1). MDL-NBS-GS-000002 REV 00 ICN 02. Clayton, R., Editor, Washington, D.C.: U.S. DOE. OCRWM Publ., 2000, 104 p.

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE LONG-TERM EVOLUTION OF RADIONUCLIDE MIGRATION CONDITIONS FROM THE UNDERGROUND REPOSITORY AT THE YENISEISKII SITE (KRASNOYARSK REGION)

B. T. Kochkin, V. I. Mal'kovskii

*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences (IGEM RAS),
Staromonetnyi per. 35, Moscow, 119017 Russia. E-mail: btk@igem.ru*

The Yeniseiskii site (Krasnoyarsk region, Siberia) has been selected for building an underground research laboratory (URL). Technical issues of radioactive waste disposal and problems in the repository safety assessment will be studied at this URL. Mathematical modeling and prediction of radionuclide migration is the only way to verify reliably the long-term safety of the future geological repository. The paper deals with the procedure of identification, selection and evaluation of geological features, events and processes (FEPs) that could affect long-term evolution of the isolation system, which is to be built at the Yeniseiskii site.

The international database of FEPs has been taken as a reference list. A comparative analysis of the geological conditions of foreign sites in Sweden, Finland, USA and Canada, similar to those of the Yeniseiskii site, has been carried out. Variations in long-term scenarios for the Yeniseiskii site geosphere evolution are associated with uncertainties in the trends of climatic and neotectonic processes, as well as in estimates of the probability of random events such as strong earthquakes and inadvertent penetration of a human.

The future climate forecast for the Yeniseiskii site takes into account natural variations in global climate, the paleoclimate in Siberia, and the impact of greenhouse effect. The climate warming will raise precipitation and accelerate in general the groundwater flow velocity. Vertical uplifting of the area will also raise the groundwater flow velocity.

At the next stage, the possible impacts of climate variability and area uplifting on the radionuclide migration in the geosphere were estimated for the periods of 1, 10 and 50 thousands years. The site-specific hydrodynamic model was used for this purpose. The predictive calculations showed that the geosphere system appeared to be relatively low sensitive to both factors. We may conclude that the filtration properties of host rocks represented by weakly fractured gneiss are the main factor controlling the migration of radionuclides in the geosphere of the Yeniseiskii site.

Keywords: *high-level radioactive waste, underground repository, safety assessment, radionuclide migration, scenarios.*