

## АНАЛИЗ ЛОКАЛИЗАЦИИ И СЦЕНАРИЯ ЭВОЛЮЦИИ ПГЗРО НА УЧАСТКЕ ЕНИСЕЙСКИЙ (КРАСНОЯРСКИЙ КРАЙ)

К. В. Мартынов, Е. В. Захарова

Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина Российской академии наук, Москва

Статья поступила в редакцию 07 февраля 2018 г.

*Обоснована целесообразность и варианты корректировки некоторых проектных решений, касающихся конструкции ПГЗРО и материалов инженерных барьеров, направленные на повышение безопасности объекта окончательной изоляции РАО, а также оптимизацию затрат на его сооружение и эксплуатацию.*

**Ключевые слова:** изоляция РАО, геологическая структура, горная выработка, подземная вода, инженерный барьер, деградация материалов, миграция радионуклидов, радиационная безопасность.

В 2016 г. ФГУП «НО РАО» получено положительное экспертное заключение Федерального агентства по недропользованию о пригодности участка Енисейский для строительства объекта окончательной изоляции отвержденных радиоактивных отходов (РАО) с расстоянием между горизонтами 75 м и решение Правительства РФ о предоставлении права пользования недрами на участке для захоронения РАО [1]. Предполагается, что первым этапом строительства, который пока планируется начать в 2019 г., будет сооружение подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ). Основные разрешительные документы для проведения этих работ ФГУП «НО РАО» также уже получены в 2016 г.: «Проектная документация» на строительство ПИЛ утверждена ФАУ «Главгосэкспертиза», лицензия на размещение и сооружение подземной лаборатории выдана Ростехнадзором [1]. Конечно, путь от ПИЛ до ПГЗРО (пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов) долгий, и по мере его прохождения многие проектные решения будут уточняться и корректироваться. Тем не менее предполагается, что основная концепция устройства ПГЗРО останется неизменной, как она не менялась принципиально в ходе предпроектных работ [2–4], если не обнаружатся серьезные причины для ее изменения. Некоторые альтернативные варианты проектных решений, различные по степени радикальности, но так или иначе направленные, по мнению авторов, на улучшение проекта с точки зрения

обеспечения безопасности объекта, будут обсуждены ниже. Для обоснования целесообразности и возможных путей корректировки проектных решений использован метод экспертного анализа устройства ПГЗРО, вмещающих его геологических структур и материалов инженерных барьеров безопасности (ИББ), предусмотренных текущим вариантом проекта, проведенный на основе накопленных на сегодняшний день знаний о предмете исследования.

### Локализация объекта

В нынешнем виде, согласно [4, 5], концепция устройства ПГЗРО показана на рис. 1а и 1б. Она заключается в том, что горизонтальные выработки для закладки РАО класса 2: долгоживущих отходов средней удельной активности (САО) и высокоактивных отходов (ВАО) с низким тепловыделением, отвержденных в цементной матрице или остеклованных, размещенных в металлических контейнерах НКМ или аналогичных, — располагаются на двух горизонтах: +5 м и –70 м (Балтийская система высот), что минимум на 120 м ниже регионального базиса дренирования — русла Енисея, параллельно друг над другом с небольшим смещением. Вертикальные скважины большого диаметра (1,3 м) для закладки упаковок с остеклованными теплоделяющими ВАО (РАО класса 1) расположены с постоянным шагом между выработками верхнего и нижнего горизонтов. Для размещения в

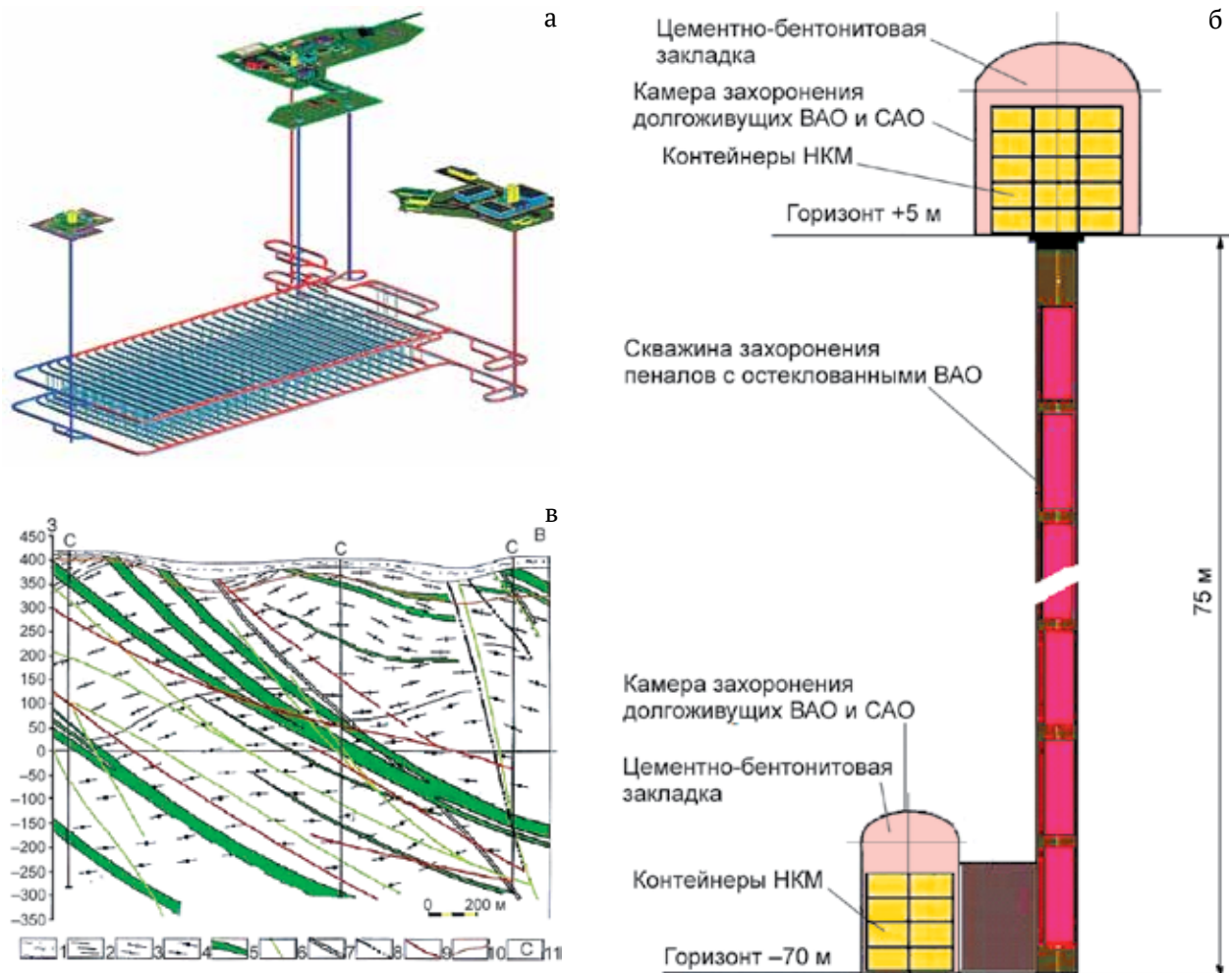


Рис. 1. Схема устройства ПГЗРО по [4, 5]:

а – расположение подземных выработок, б – расположение камер захоронения пеналов и контейнеров с ВАО и САО; в – субширотный геологический разрез участка Енисейский по [7] (упрощенно): 1 – четвертичные рыхлые отложения, 2 – биотитовые и двуслюдяные гнейсы и кристаллические сланцы, 3 – биотитовые плагиогнейсы, 4 – биотит-кордиеритовые гнейсы, 5 – дайки метабазитов первого этапа внедрения, 6 – дайки долеритов и диабазовых порфиритов второго этапа внедрения, 7 – зона сцементированных брекчий раннего этапа, 8 – разрывные нарушения с открытой трещиноватостью, 9 – зоны тектонических брекчий с кварц-микроклинным цементом, 10 – нижняя граница экзогенной трещиноватости, 11 – разведочные скважины

горном массиве выработок проектного объема (4 500 м<sup>3</sup> РАО класса 1 и 155 000 м<sup>3</sup> РАО класса 2) по такой схеме необходимо найти однородный, не нарушенный тектоникой блок малопроницаемых горных пород размером минимум 700×350×100 м.

Изучение геологического строения участка Енисейский целенаправленно и активно проводится с 2008 г., после того как он был окончательно выбран для дальнейших изысканий с целью создания ПГЗРО [2]. Данные о результатах предварительных исследований, на основании которых был сделан этот выбор, изложены в работе [6]. К настоящему времени на участке проведены комплексные геофизические работы на поверхности, геологические и гидрогеологические исследования массива горных пород до глубины 700 м с использованием 20 геологоразведочных скважин, с полным отбором керна, комплексом геофизических, опытно-фильтрационных

и лабораторных исследований [1]. Немаловажно также, что для характеристики участка может быть использован 60-летний опыт проходки и эксплуатации гораздо больших по объему (до 100×20×60 м) подземных горных выработок ФГУП «ГХК», локализованных в блоке аналогичных горных пород размером 1500×1000×250 м, расположенном в 4 км к северу от участка Енисейский.

Уже по имеющимся на сегодняшний день данным [5–7] очевидно, что геологическое строение выбранного участка достаточно сложное (рис. 1в). Даже если рассматривать архейские гнейсы и метабазиты первого этапа внедрения как единый метакомплекс, выбрать блок проектного размера для размещения всех выработок и скважин для закладки емкостей с РАО, не нарушенный постметаморфическими дайками второго этапа, зонами брекчирования, милонитизации и открытой трещиноватости, тем

более строго привязанный по абсолютной высоте, едва ли удастся. Привязка проекта к предполагаемому монолитным блоку между редкими пока скважинами, как это имеет место в настоящее время, может не выдержать проверки при ступени разведочной сетки. Поэтому первое предложение по размещению объекта заключается в том, чтобы в проекте предусмотреть возможность разбивки одного большого блока на небольшие участки с их привязкой к достоверно установленным при разведке, пусть меньшим по размеру, но монолитным фрагментам массива. Количество и размер таких участков можно будет окончательно определить только после детальной разведки. Чтобы увеличить потенциальное количество пригодных участков, было бы правильно расширить диапазон их размещения по абсолютной высоте, без необходимости зауженный только как следствие выбранной концепции проекта, и увеличить число горизонтов.

Конечно, проходить сближенные выработки, расположенные по протяженным параллельным профилям, по так называемой матричной схеме будет дешевле, чем обеспечить тот же объем выработок взброс, вынужденно увеличивая протяженность «нефункциональных» транспортных коридоров. Но что будет с экономикой объекта, если в результате безальтернативной пунктуальной реализации проекта существенная часть уже готовых выработок окажется непригодной для закладки РАО? Вполне вероятно, что для того чтобы это понять, не возникнет необходимости осуществлять проектные работы по проходке каких-то выработок в полном объеме, а окажется достаточным проанализировать данные опережающего бурения. Если заложить в проект право принятия оперативных решений о приостановке проектных работ на промежуточной стадии при достаточных для этого основаниях, то это поможет рациональнее использовать ресурсы. Тем более предусмотреть в проекте возможность корректировки и при необходимости реализацию обоснованной альтернативы однозначно будет дешевле, чем уже пройденные и непригодные для использования выработки засыпать и гидроизолировать и опять же искать и проходить им замену для сохранения проектного объема.

Даже если предположить, что удастся найти достаточно большой, не нарушенный в настоящее время тектоникой блок для размещения всех проектируемых выработок, проходка такого количества протяженных, сближенных скважин большого диаметра по густой сетке параллельных профилей приведет с серьезному ослаблению прочности этого блока. В случае возникновения напряжений в горных породах, даже локальных, связанных, например, с тепловым полем объекта, эти профили могут сыграть роль перфорации, что может привести

к образованию трещин и смещению пород по плоскостям профилей. В таком случае не только возникнут зоны повышенной фильтрации подземных вод, но с большой вероятностью будет оказано механическое воздействие непосредственно на ИББ и упаковки РАО, которое может иметь следствием как деформацию, так и разрушение их конструкции.

Второй вопрос, связанный с локализацией объекта, относится к соотношению его ориентировки с простиранием геологических структур. В проекте выбрана меридиональная ориентировка участка, когда транспортные выработки направлены с севера на юг, а складочные (рабочие) — с запада на восток. Основные геологические структуры на участке (комплекс метаморфических пород, включая метабазиты, дайки второго этапа внедрения, зоны брекчирования), кроме некоторых молодых разломов, имеют субмеридиональное простирание и восточное падение, поэтому на субширотном разрезе (рис. 1в) отражаются максимальные углы падения, которые при этом меньше  $45^\circ$ . При такой ориентировке геологических структур вероятность их пересечения горными выработками минимальна при проходке горизонтально в меридиональном направлении. Следовательно, именно такое направление будет оптимальным для «рабочих» горных выработок. Этот аргумент распространяется в том числе на выбор ориентировки выработок (скважин) для размещения тепловыделяющих ВАО. Их горизонтальное, а не вертикальное расположение с этой точки зрения является предпочтительным. Схемы глубинных хранилищ с горизонтальными выработками для контейнеров с ОЯТ (отработанным ядерным топливом) и РАО рассматриваются за рубежом не только для кристаллических, но и для осадочных горных пород [8]. Это — серьезная альтернатива существующей концепции объекта, но ее безопасность и экономика не были оценены, что нельзя признать взвешенным подходом. Ниже придется еще раз вернуться к обсуждению этой альтернативы с точки зрения обеспечения надежности упаковок РАО в ходе эволюции ПГЗРО.

Последнее замечание, касающееся принципов пространственного устройства ПГЗРО. Из двух пористых матриц с равной открытой пористостью и геометрией пор меньшей проницаемостью будет обладать та, у которой больше тупиковых пор. Следовательно, компоновка, при которой все выработки соединяются друг с другом с обоих концов (то есть являются открытыми), облегчает фильтрацию подземных вод по сравнению с конструкцией древовидной структуры, когда выработки ответвляются от одного ствола и заканчиваются тупиками (закрыты с одного конца). Более точной аналогией в данном случае будет речная система, в которой все истоки возникают из «ниоткуда» и впадают в единое русло.

Это «русло» можно сориентировать «устьем» в самом безопасном направлении и даже сделать заглубляющимся, а рабочие выработки поднять на более высокие горизонты, обеспечив более дешевую проходку и эксплуатацию, вплоть до устройства основной транспортной галереи в виде наклонной штольни вместо шахты, как это сделано во многих зарубежных проектах [8]. Кроме того, благодаря такой компоновке, после закрытия ПГЗРО основной поток фильтрующихся через выработки подземных вод потечет мимо, а не через выработки с упаковками РАО, что минимизирует адвекционный механизм миграции радионуклидов (РН) и повысит уровень радиационной безопасности объекта.

### Эволюция объекта

Разные сценарии эволюции ПГЗРО связаны с различными процессами, которые могут возникать и протекать как следствие глобальных или региональных событий (явлений) климатического, тектонического, космического и иного характера. Такие сценарии, как правило, носят вероятностный характер и имеют отправной точкой сценарий, ожидаемый при неизменности всех существующих на текущий момент внешних условий. Именно такой сценарий естественного развития внутренних процессов в ПГЗРО будет рассмотрен ниже.

Жизненный цикл ПГЗРО в идеале включает две стадии: короткую (десяtkи лет) стадию строительства и эксплуатации — закладки РАО и постепенного закрытия (изоляции) объекта, и длительную (сотни тысяч и даже миллионы лет) стадию развития природно-техногенной системы после ее закрытия без вмешательства человека. Безопасность ПГЗРО должна быть обеспечена на весь период, пока захороненные РАО представляют угрозу для биосферы [9]. Для выполнения этого требования производится тщательный выбор участка для размещения объекта с тем, чтобы вмещающий горный массив максимально выполнял функцию природного барьера, а также создаются инженерные барьеры безопасности, которые если не исключают полностью, то по крайней мере отсрочивают и замедляют миграцию радионуклидов за пределы ПГЗРО.

Основной внешней причиной, приводящей к миграции РН, является взаимодействие элементов ИББ, в том числе матрицы РАО, с подземными водами, которые разрушают ИББ и переносят РН сначала за пределы ПГЗРО, а потом сквозь горный массив на поверхность. Найти необводненный массив кристаллических горных пород где-нибудь, кроме зон многолетней мерзлоты, где вода присутствует в форме льда, и то до определенной глубины, невозможно. Следовательно, породы массива и сам массив в

целом должны быть, по крайней мере, малопроницаемые с низкими коэффициентами и скоростями фильтрации подземных вод.

Действительно, большинство пород на участке Енисейский являются по гидрогеологической классификации грунтов водонепроницаемыми и имеют коэффициенты фильтрации 0,001—0,0001 м/сутки. Тем не менее оценка на основании этих данных притока воды в подземные выработки первой очереди ПГЗРО в 346 м<sup>3</sup>/сутки [7], не столь большая в условиях эксплуатации (для расчета откачки), для закрытого хранилища с позиции взаимодействия подземных вод с ИББ представляется не такой безобидной.

Сложнее оценить скорость фильтрации подземных вод, поскольку она будет обратно пропорционально зависеть от просветности (отношение площади открытых трещин к площади сечения поперек потока) и прямо пропорционально — от гидравлического градиента. Что касается последнего, то на этапе эксплуатации и после закрытия ПГЗРО, которое осуществляется при атмосферном давлении, градиент давления (напора) подземных вод в зоне дренирования горных выработок, то есть на очень небольшом расстоянии от стенки выработки (метры — первые десятки метров), может достигать 5 МПа в соответствии с глубиной размещения объекта (примерно 500 м от поверхности). Это соответствует гидравлическому градиенту 50—500 единиц, что в тысячи и десятки тысяч раз больше, чем гидравлические градиенты в ненарушенном массиве (до 0,05), который будет постепенно уменьшаться до нормальных значений по мере восстановления гидравлического давления (напора) в зоне дренирования горных выработок.

Просветность зависит от апертуры трещин, поэтому она, как правило, понижается с глубиной. Но этот эффект только повышает скорость фильтрации, что отчасти компенсируется понижением с глубиной коэффициента фильтрации. Таким образом, обводнение горных выработок, а точнее нарушенной при проходке зоны вокруг них и зазора до заполнителя выработок (первого ИББ) при ожидаемом притоке начнется уже на этапе эксплуатации по мере закрытия выработок.

После заполнения подземными водами зоны вокруг горных выработок на их пути встанут гидроизолирующие ИББ. Причем условия по напору (давлению) на ИББ остаются прежними — 5 МПа, поскольку ИББ закрывались при атмосферном давлении, а температура, особенно в скважинах с тепловыделяющими ВАО, может значительно повыситься относительно естественного фона, особенно в течение первых сотен лет [5].

Устройство и материалы для ИББ — это пока один из наименее ясных элементов конструкции ПГЗРО, и они будут уточняться в процессе



лабораторных и натурных исследований и экспериментов в ПИЛ. Пока в самых общих чертах, согласно [3, 5], система ИББ выглядит следующим образом. Для РАО класса 2 предполагается использовать один фильтрационно-сорбционный барьер, предположительно из глиняного или цементно-глиняного материала (рис. 1б), металлический или железобетонный контейнер объемом 1,5 м<sup>3</sup>, загруженный кондиционированными отходами, включенными в цементную матрицу или стекло. Какой-то конкретики по вопросу, что из себя будут представлять эти отходы и матрицы, пока нет; существуют лишь проектные критерии приемлемости на их основные характеристики, разработанные на основе требований нормативных документов [10].

Характеристики для РАО класса 1 более конкретны — это остеклованные ВАО, накопленные на заводе РТ-1 ФГУП «ПО «Маяк». Для их защиты в ПГЗРО предполагается более сложная система ИББ (табл. 1). Прочность упаковки РАО обеспечивают бетонно-стальные изолирующие контейнеры (ИК) с толщиной стенки 60 мм, в какой-то степени аналогичные зарубежным «суперконтейнерам» [8]. Зазор между ИК и стенками скважин, а также промежутки между контейнерами предполагается заполнять вязкой бентонитовой гетерогенной водной суспензией — шликером.

Внутри ИК из бентонитовых кирпичей выкладывается «кокон» толщиной не менее 15 см, изолирующий трехслойную стальную упаковку со стеклом, состоящую из чехла, вмещающего пенал с тремя бидонами, стоящими друг на друге. Общая толщина слоев упаковки — 15 мм, но, учитывая, что бидоны изначально негерметичны, пеналы подвергались длительному радиационному воздействию во время выдержки в хранилище ФГУП «ПО «Маяк», реальную барьерную функцию обеспечивает только наружный чехол из черной стали толщиной 6 мм. Каждый бидон вмещает примерно 0,2 м<sup>3</sup> стекла весом 500 кг и по нормативам может иметь удельную мощность тепловыделения до 2 кВт/м<sup>3</sup>, что приводит к разогреву упаковок при ограниченном отводе тепла [5].

Отдельная проблема заключается в том, что упаковку РАО невозможно заполнить на 100% барьерными материалами, особенно если она имеет сложное многослойное строение. Полости, которые изначально заполняет воздух при атмосферном давлении, имеют место как внутри материалов, обладающих пористостью или трещиноватостью, так и между слоями материалов или вследствие усадки одного из них, или вследствие необходимости оставлять технологические зазоры. Оценка степени заполнения упаковок представлена в табл. 1. В конечном счете все эти полости будут заполнены подземной водой, что увеличит скорость деградации барьерных материалов и подвижность РН.

Таблица 1. Схема устройства ИББ для остеклованных РАО класса 1

Барьер (упаковка)	Толщина барьера (диаметр упаковки), мм	Пористость материалов (пустотность упаковок), об. %	
		Исходная	После деградации
Стекломатрица РАО	600	0–20	50
Стальные оболочки стекломатрицы	6+6+3	0	50
Чехол с загрузкой	700	30–40	70
Прессованный бентонит	150–200	40–45	45–50
Внутренняя стальная оболочка ИК	3	0	50
Бетонная оболочка ИК	60	10–15	20–30
Внешняя стальная оболочка ИК	5	0	50
ИК с загрузкой	1200	30–35	60
Шликер	50	70	70
Скважина с загрузкой	1300	33–38	61

В результате деградации самих барьерных материалов их пористость, а следовательно, и пустотность упаковок будут только увеличиваться. Это будет происходить за счет растворения фаз и фазовых превращений в барьерных материалах. Больше всего будет увеличиваться пористость алюмофосфатной стекломатрицы и стальных оболочек — от 0 до 50 об. %, меньше всего — бентонита (не более 10 об. %). Промежуточные значения увеличения пористости (10–20 об. %) ожидаются для бетона. Данные для стекломатрицы получены экспериментальным методом [11], для других материалов оценены на основании термодинамических расчетов.

Некоторые проблемы избыточной пустотности упаковок РАО могут быть сняты на этапе их подготовки к захоронению. Например, с учетом запланированной упаковки пеналов с остеклованными ВАО ФГУП «ПО «Маяк» в дополнительные чехлы, можно было бы вовсе избавиться от радиационно изношенных пеналов, а бидоны со стеклом переместить вместо чехлов в более надежные контейнеры, заполнив пустоты каким-нибудь инертным, а еще лучше полезным барьерным материалом. Параллельно можно было бы организовать пробоотбор или неразрушающее обследование стекла, необходимые для повышения достоверности паспортизации захораниваемых РАО.

Аргументы против таких процедур, опирающиеся на экономическую мотивацию, несостоятельны. Отказ от реального контроля за состоянием захораниваемых РАО может в будущем обернуться куда большими затратами на обеспечение безопасности. Так, для обеспечения требуемого уровня безопасности западные страны уже неоднократно сталкивались с

необходимостью перезахоронения РАО из-за недооценки их реального состояния на момент захоронения [8], что потребовало колоссальных ресурсных затрат. Но поскольку из благих намерений никто этим заниматься тоже не станет, для повышения уровня безопасности ПГЗРО целесообразно внести в федеральные нормы и правила по критериям приемлемости РАО для захоронения [10] норматив по пустотности упаковок РАО.

Подводя итог описанию устройства ИББ в ПГЗРО, можно сделать вывод, что перечень основных материалов ИББ достаточно ограничен: это цементная или стекломатрица, черная (углеродистая) сталь, бентонит, бетон, шликер. Свойства этих материалов в принципе достаточно понятны. То, что для создания ИББ эти материалы используются в разной комбинации и в разном количестве, сути дела не меняет. Это дает возможность качественно, а иногда количественно предсказать их поведение в условиях ПГЗРО, что необходимо для обоснования возможного сценария его эволюции.

Основные функциональные характеристики материалов ИББ, оцененные экспертным методом по пятибалльной шкале, а также их изменение в результате деградации материалов и скорость процессов деградации приведены в табл. 2. Эти оценки сделаны на основе анализа известных данных о свойствах материалов ИББ, некоторые из которых описаны в работах [5, 12]. Величины экспертных оценок прямо пропорциональны численным значениям физических величин, которыми описываются соответствующие свойства материалов. Поэтому в шкале «плохо-хорошо» для функциональной полезности материалов разные свойства будут отражаться по-разному. Для прочности и сорбции высшим балом будет «5», а для фильтрации, диффузии и скорости деградации — «0». Кроме этих характеристик приведена оценка скорости деградации материалов ИББ. Изменение этой характеристики на одну единицу соответствует изменению продолжительности в годах процесса деградации материала до полной потери им полезных свойств на один десятичный порядок от  $10^6$  лет для «1» до 100 лет для «5».

Функциональное назначение шликера пока остается неясным, поскольку практически ни одним из полезных барьерных свойств, кроме относительно небольшой сорбционной способности из-за его «рыхлости» и малой толщины слоя, он не обладает. Не будет большим упрощением, если считать, что он вообще отсутствует.

Сталь имеет самую высокую прочность из всех рассматриваемых материалов и на 100% предотвращает фильтрацию и диффузию, пока она не подверглась коррозии. Процесс коррозии стали идет очень неравномерно. Наиболее подвержены коррозии сварные швы и участки, деформированные гибкой и штамповкой при изготовлении изделий, а также участки радиационного

воздействия. Кроме того, межзерновая коррозия всегда опережает объемную. Вследствие этого ухудшение гидроизоляционных свойств стальных элементов происходит намного быстрее, чем прочностных. Для толщины стальных оболочек в составе ИББ можно оценить сроки понижения этих функциональных характеристик до минимальных значений в  $10^2$  и  $10^4$  лет соответственно. В процессе коррозии будут появляться новообразованные мелкодисперсные фазы с высокой пористостью, удельной поверхностью и сорбционной емкостью.

**Таблица 2. Качественная оценка основных функциональных характеристик материалов ИББ**

Свойство	Материал				
	Шликер	Сталь	Бетон	Бентонит	Стекло
Исходные					
Прочность	0	5	4	2/1	4-1(3)
Фильтрация	5	0	3	1	1-4(3)
Диффузия	5	0	3	1	1-4(3)
Сорбция	2	1	3	5	1-4(3)
Скорость деградации	-	5/3	4	1	2-4(3)
После деградации					
Прочность	0	1	1	1	1
Фильтрация	5	5	4	2	4
Диффузия	5	5	4	2	4
Сорбция	1	3	1	4	4

Бетон по прочности хуже стали и в силу высокой пористости является слабой гидроизолирующей защитой. Его сорбционная способность также находится на среднем уровне и связана в основном с удержанием компонентов, чувствительных к высоким значениям pH раствора, которые при взаимодействии с водой дает бетон. Однако этот эффект постепенно будет исчезать по мере выщелачивания Са — основного элемента вяжущих фаз цементного камня. Одновременно с этим будут ухудшаться прочностные свойства бетона. В конце концов, по нашей оценке примерно за  $10^3$  лет, бетон превратится в малопрочную, хорошо фильтрующую массу с низкой сорбционной способностью.

Бентонит обладает самыми хорошими фильтрационными и сорбционными характеристиками, сохраняющимися гораздо дольше, чем у других барьерных материалов. Это естественно, поскольку бентонит — единственный природный материал, более того — продукт выветривания или гидротермального изменения горных пород. Поэтому он «хорошо себя чувствует» в природной обстановке, и если ее не нарушать, например, агрессивными продуктами выщелачивания бетона, то по результатам равновесно-кинетического термодинамического моделирования до полной деградации он прослужит

в условиях ПГЗРО не менее  $10^6$  лет. Дегградация бентонита связана с превращением его главной составляющей, монтмориллонита, в другие глинистые минералы с разной скоростью в зависимости от физико-химических условий: хлорит, иллит, каолинит, которые не обладают такими же хорошими фильтрационными и сорбционными характеристиками, как монтмориллонит [12].

Единственным «недостатком» бентонита является его низкая прочность и в сухом, и тем более в водонасыщенном состоянии. Но оборотной стороной этого «недостатка» является способность течь под давлением благодаря пластичности, что способствует заполнению свободного от других твердых веществ пространства, в том числе трещин и пор, улучшая сплошность гидроизоляции.

Наверное, самым неоднозначным материалом ИББ является стекломатрица РАО. Колоссальная степень неопределенности в отношении характеристик этого материала связана с тем, что непонятно, в каком состоянии находятся остеклованные РАО ФГУП «ПО «Маяк». Если они отвечают критериям приемлемости для РАО класса 1, то это однородный по фазовому, элементному и радионуклидному составам, монолитный, мало трещиноватый, не пористый, прочный материал. Через него не фильтруются водные растворы. Он имеет очень низкую скорость выщелачивания, и реальные стеклоблоки могут сохранить свои свойства до  $10^5$  лет.

Но если за время хранения в результате термического и радиационного воздействия произошла кристаллизация стекла, то оно могло изменить свое строение вплоть до рыхлого неуплотненного состояния. Тогда не может идти речи о какой-либо прочности, возникают высокая пористость и удельная поверхность, которые при взаимодействии с подземными водами резко ускоряют как фильтрацию, так и выщелачивание из матрицы и перенос (адвекция, диффузия) РН в жидкой фазе. Из полезных свойств при этом улучшаются только сорбционные характеристики за счет продуктов дегградации стекла.

Размах оценок характеристик стекла для этих крайних случаев дан в табл. 2 в виде диапазона значений. Но возможно и даже более вероятно промежуточное состояние этого материала, характеристики которого, указанные в скобках, будут приниматься во внимание при анализе сценария эволюции ПГЗРО.

Опираясь на схему устройства системы ИББ для РАО класса 1 (табл. 1) и основные характеристики материалов ИББ (табл. 2), рассмотрим последовательность и продолжительность основных эволюционных процессов, которые будут происходить после закрытия ПГЗРО (табл. 3). Эволюция ИББ включает три этапа, различающиеся движущими силами и продолжительностью.

Первый этап, объединяющий процессы с 1 по 7, проходит на фоне высокого локального

градиента давления подземных вод, вызывающего фильтрацию сквозь трещиноватые горные породы и пористые барьерные материалы, которую временно прерывают только водонепроницаемые стальные оболочки ИББ. По мере потери каждой из этих оболочек гидроизолирующих свойств в результате локальной коррозии, ускоряемой повышенной температурой, фильтрация возобновляется, и подземные воды заполняют порово-трещинное пространство материалов ИББ и технологические пустоты. Продолжительность этого этапа оценивается в срок до полутора тысяч лет. При этом процессы следуют один за другим, как это отражено на рис. 2, на котором для всех процессов отражена максимальная оценка их продолжительности.

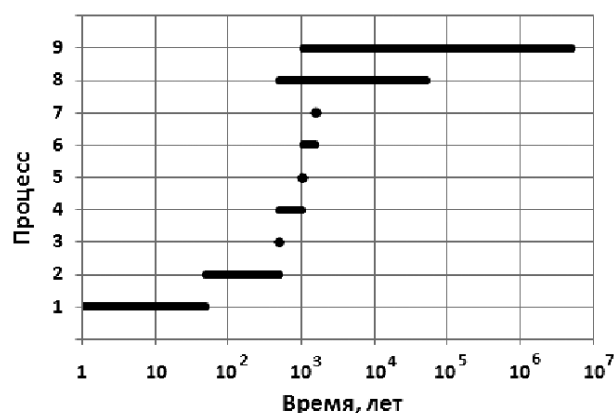


Рис. 2. Основные процессы эволюции материалов ИББ для РАО класса 1 после закрытия ПГЗРО. Номера соответствуют табл. 3

Такие процессы, как объемная коррозия стальных оболочек и растворение цементного камня, постепенно приводящие к дегградации бетона, начавшись на первом этапе, продолжают в дальнейшем до полной потери этими элементами ИББ своих прочностных характеристик. Эти процессы не отражены на рис. 2, но являются важнейшей составляющей следующего этапа эволюции системы ИББ. Второй этап эволюции ИББ (процесс 8) связан с объемной дегградацией барьерных материалов, приводящей к потере ими механической прочности. Этот процесс происходит в результате химических, электрохимических и радиационных воздействий на материалы в присутствии водного раствора. В начале этапа ускоряющее воздействие может оказывать повышенная температура.

Но главным фактором, ускоряющим дегградацию материалов ИББ, может оказаться их взаимное влияние в случае несовместимости их химических свойств. Самым неоднозначным из используемых материалов в этом случае является бетон. Его функционал и сам по себе представляется не очень впечатляющим (табл. 2), но избыточно высокие значения рН раствора (до 12 и выше), который образуется в результате

**Таблица 3. Последовательность и продолжительность процессов эволюции ИББ для РАО класса 1 после закрытия ПГЗРО**

Процесс	Продолжительность	Результат
1. Восстановление гидравлического давления в зоне дренирования горных выработок.	$n - n \cdot 10$ лет	Возникновение контакта внешней стальной оболочки ИК с подземными водами при повышенной температуре под давлением до 5 МПа.
2. Локальная коррозия внешней стальной оболочки ИК.	$n \cdot 10 - n \cdot 10^2$ лет	Потеря внешней стальной оболочкой ИК герметичности, возникновение контакта бетонной оболочки ИК с подземными водами под давлением до 5 МПа при повышенной температуре.
3. Фильтрация подземных вод под давлением сквозь поры и трещины бетонной оболочки ИК.	$n \cdot 10^{-1} - n$ лет	Возникновение контакта внутренней стальной оболочки ИК с подземными водами под давлением до 5 МПа. Начало объемной деградации бетонной оболочки ИК при повышенной температуре.
4. Локальная коррозия внутренней стальной оболочки ИК.	$n \cdot 10 - n \cdot 10^2$ лет	Потеря внутренней стальной оболочкой ИК герметичности, возникновение контакта уплотненного бентонита с подземными водами под давлением до 5 МПа на фоне постепенного понижения температуры.
5. Фильтрация подземных вод измененного состава после взаимодействия с бетоном под давлением сквозь уплотненный бентонит.	$n - n \cdot 10$ лет	Возникновение контакта стального чехла с измененными подземными водами под давлением до 5 МПа. Начало объемной деградации бентонита при повышенной относительно фона температуре.
6. Локальная коррозия стального чехла и пенала.	$n \cdot 10 - n \cdot 10^2$ лет	Потеря стальным чехлом и пеналом герметичности, возникновение контакта остеклованных РАО с измененными подземными водами под давлением до 5 МПа на фоне продолжающегося понижения температуры.
7. Заполнение под давлением пустот внутри пенала и порово-трещинного пространства стекломатрицы водным раствором, образовавшимся после взаимодействия подземных вод с бетоном, бентонитом и сталью. Выравнивание гидравлического давления в пределах ИББ, исчезновение локального напора и активной фильтрации через материалы ИББ. Начало выщелачивания стекломатрицы при постепенном понижении температуры до фоновых значений, сопровождающееся уменьшением объема и увеличением пористости твердых фаз. Активный радиолиз воды.	$n - n \cdot 10$ лет	Насыщение водного раствора компонентами стекломатрицы и РН, радиолитическое газовыделение, начало деградации стекломатрицы и диффузии РН через бентонитовый барьер. Эти процессы могут стартовать как при повышенной температуре, так и при близких к фоновым значениях. В результате газовыделения может локально повыситься давление в жидкости и возникнуть гидравлический напор, направленный наружу и провоцирующий фильтрацию загрязненного РН раствора. Другое следствие радиолиза – образование окислительной обстановки, способствующей повышению подвижности редокс-чувствительных РН и повышенной коррозии стали, а также окислению бентонита, понижающему рН раствора и вызывающему ускоренную деградацию бетона.
8. Объемная коррозия стальных оболочек, деградация бетона и стекломатрицы. Потеря барьерными конструкциями прочностных кондиций в последовательности: бетон, сталь, стекло.	$n \cdot 10^4$ лет	Вариант 1 (катастрофический). Нарушение сплошности бентонитового барьера, залповый выброс загрязненных РН материалов, прежде всего раствора, за пределы ИББ. Вариант 2 (эволюционный). Фильтрация загрязненного РН раствора за пределы ИББ через бентонитовый барьер под избыточным давлением, увеличивающимся до первых МПа к нижним упаковкам РАО. Возможна комбинация этих вариантов. В любом случае такое развитие событий является крайне негативным, при этом оно может наступить в обозримый отрезок времени
8а. Для проекта размещения РАО класса 1 в вертикальных 75-метровых скважинах при постепенном ослаблении прочности всей конструкции ИК возможно оседание потерявших прочность упаковок РАО в скважине с постепенным или скачкообразным увеличением под их весом избыточного давления на жидкую фазу нижних упаковок на несколько МПа.		
8б. Для упаковок РАО класса 1, размещенных в горизонтальных горных выработках, при отсутствии внешних воздействий (здесь не рассматриваются) прочность конструкции не оказывает влияния на эволюцию системы ИББ. При сорбционном насыщении барьерных материалов возможен переход к стационарным процессам.		
9. Деградация бентонитового барьера с постепенным увеличением водопроницаемости и скорости диффузии.	$n \cdot 10^6$ лет	На фоне общего понижения радиационного воздействия возможно постепенное ускорение диффузии и локальный адвекционный вынос РН за пределы ИББ.



взаимодействия бетона с подземными водами («щелочной шлейф»), отрицательно влияют на устойчивость бентонита и особенно стекломатрицы, приводя к их ускоренной деградации. К тому же, именно бетон — первый из материалов ИББ, который теряет прочность. Таким образом, его замена в конструкции ИК на иной материал, например чугун, а в идеале — каменное (базальтовое) литье, могла бы значительно увеличить срок службы упаковки РАО.

Продолжительность этапа потери прочности может составлять десятки тысяч лет, в основном за счет прочности стальных оболочек, но рано или поздно она также будет утрачена, и возникнет ситуация, характеризующая приемлемость проектной компоновки упаковок РАО класса 1 в целом. С большой вероятностью схема заполнения 75-метровой вертикальной скважины, заложенная в проект, приведет к нежелательным вариантам развития событий, и любой из них можно считать негативным (табл. 3, п. 8а). В то же время при горизонтальной схеме расположения в горных выработках упаковок РАО класса 1, прочность барьерных материалов в этом контексте не представляется характеристикой, критичной для эволюции ПГЗРО (табл. 3, п. 8б).

Такой вариант закладки упаковок РАО рассматривается в зарубежных проектах и как альтернативный, и как основной. Компания Posiva Oy, ответственная за захоронение ОЯТ АЭС в Финляндии, совместно со шведской компанией SKB, наряду с базовой концепцией KBS-3V, изучают возможность горизонтальной ориентации канистр с ОЯТ (KBS-3H) в ПИЛ ONKALO, расположенной в гранитогнейсах в районе Олкилуото [13]. Чешский оператор по обращению с РАО SÚRAO выбрал концепцию KBS-3H в качестве основной для создания ПГЗРО в гранитах и подбирает участок для реализации этого проекта [14]. NRC, национальный регулятор в США, с 1976 г. реализует проект захоронения ВАО в горизонтальных выработках в вулканических туфах Юкка Маунтин [15]. Такие примеры можно продолжить для ПГЗРО и ПИЛ, заложенных не только в кристаллических, но и в осадочных породах [8].

Итак, если благодаря горизонтальной компоновке или какому-то другому способу удастся избежать негативных последствий потери прочности упаковками РАО, то эволюция ПГЗРО перейдет к последнему, самому продолжительному этапу, в ходе которого будут продолжаться процессы выщелачивания и переноса РН, начавшиеся при обводнении стекломатрицы, но теперь на фоне постепенной деградации барьерных свойств бентонита. Главной задачей для продления этого периода до максимально возможной продолжительности является задача свести по возможности транспорт РН к диффузионному механизму, самому медленному и самому эффективному способу вовлечения в процесс задержки РН полной сорбционной емкости барьерных материалов. Исходя

из устойчивости бентонита в природной среде, даже с учетом последствий теплового и радиационного воздействия, можно рассчитывать, что он сохранит свои барьерные свойства в течение миллионов лет. В то же время вопрос о толщине, плотности и составе бентонитового барьера требует тщательного расчета и экспериментальной проверки для обеспечения необходимых для данного конкретного случая характеристик по фильтрационным, компрессионным, диффузионным и сорбционным параметрам.

### Заключение и выводы

Анализ локализации и эволюции ПГЗРО на участке Енисейский позволяет сделать вывод о том, что обеспечить безопасность этого объекта для захоронения РАО классов 1 и 2 можно на период, по крайней мере, нескольких миллионов лет при условии корректировки некоторых проектных решений. Эту корректировку предлагается провести, во-первых, в отношении принципов взаиморасположения и пространственной ориентировки групп горных выработок для размещения упаковок РАО: расположение на большем количестве горизонтов, в пределах небольших монолитных участков, выявленных при детальной разведке, ориентировка загрузочных выработок вдоль простирающихся геологических структур. Во-вторых, в отношении применения альтернативного (горизонтального) способа размещения упаковок РАО класса 1 в выработках. В-третьих, в отношении более обоснованного подбора конструкционных материалов ИББ (например, чугун или каменное литье вместо бетона для ИК) и расчета необходимой для них толщины, плотности и состава (бентонит и другие глиняные материалы и смеси).

### Литература

1. *Абрамов А. А., Бейгул В. П.* Создание подземной исследовательской лаборатории на участке «Енисейский» Нижнеканского массива: состояние и дальнейшее развитие работ // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2017. № 8/108. — URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2017/08/22/78690>
2. *Кудрявцев Е. Г., Гусаков-Станюкович И. В., Камнев Е. Н. и др.* Федеральный объект подземного захоронения отвержденных радиоактивных отходов в России: практические шаги к созданию // Безопасность окружающей среды. 2008. № 4. С. 106—112.
3. *Лобанов Н. Ф., Бейгул В. П., Камнев Е. Н. и др.* Федеральный объект окончательной подземной изоляции долгоживущих РАО на Горно-химическом комбинате // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2011. № 1. С. 18—23. — URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2017/01/11/23479>

4. Поляков Ю. Д., Лобанов Н. Ф., Бейгул В. П. Обеспечение безопасности объектов окончательной изоляции долгоживущих РАО в Красноярском крае // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2013. № 3–4. — URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2017/01/11/51503>.
5. 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.
6. Андерсон Е. Б., Белов С. В., Камнев Е. Н. и др. Подземная изоляция радиоактивных отходов / Под ред. В. Н. Морозова. — М.: Изд-во «Горная книга», 2011. — 592 с.
7. Озерский А. Ю. Геохимические особенности нижнеархейских пород на участке вероятного подземного строительства в южной части Енисейского кряжа // Разведка и охрана недр. 2012. № 7. С. 39–44.
8. Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Капырин И. В. и др. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО / Под ред. И. И. Линге, Ю. Д. Полякова. — М.: Изд-во «Комтехпринт», 2015. — 208 с.
9. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности» (НП-055-14). — Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22 августа 2014 г. № 379. — Москва, 2014. — 26 с.
10. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения» (НП-093-14). — Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2014 г. № 572. — Москва, 2014. — 43 с.
11. Мартынов К. В., Константинова Л. И., Захарова Е. В. Влияние температуры на выщелачивание модельного фосфатного стекла с имитаторами радиоактивных отходов // Вопросы радиационной безопасности. 2015. № 4. С. 10–21.
12. Болдырев К. А., Крючков Д. В., Мартынов К. В. и др. Разработка расчетных методов оценки миграции радионуклидов за пределы ИББ с учетом их эволюции: Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2017-11. — Москва: ИБРАЭ РАН, 2017. — 23 с.
13. Gribi P., Johnson L., Suter D. et al. Safety Assessment for a KBS-3H Spent Nuclear Fuel Repository at Olkiluoto. Process report POSIVA 2007-09. — POSIVA OY, Olkiluoto FI-27160, Eurajoki, Finland, — 2007. — 438 p. — URL: [http://www.posiva.fi/files/494/POSIVA\\_2007-09web.pdf](http://www.posiva.fi/files/494/POSIVA_2007-09web.pdf)
14. Deep Geological Repository. — SÚRAO. — URL: <https://www.surao.cz/en/dgr>
15. Rechard R. P., Liu H.-H., Tsang Y. W. Finsterle S. Site characterization of the Yucca Mountain disposal system for spent nuclear fuel and high-level radioactive waste // Reliability Engineering and System Safety. 2014. V. 122. P. 32–52.

### Информация об авторах

Мартынов Константин Валентинович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН (119071, Москва, Ленинский проспект, 31, корп. 4), e-mail: [mark0s@mail.ru](mailto:mark0s@mail.ru)

Захарова Елена Васильевна, кандидат химических наук, заведующая лабораторией, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН (119071, Москва, Ленинский проспект, 31, корп. 4), e-mail: [zakharova@ipc.rssi.ru](mailto:zakharova@ipc.rssi.ru)

### Библиографическое описание данной статьи

Мартынов К. В., Захарова Е. В. Анализ локализации и сценария эволюции ПГЗРО на участке Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 2 (3). — С. 52–62.

## THE ANALYSIS OF LOCALIZATION AND THE SCENARIO OF EVOLUTION OF DGDF FOR RW AT THE YENISEISKY SITE (KRASNOYARSK REGION)

Martynov K. V., Zakharova E. V.

A. N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Article received 07 February 2018

On the basis of the analysis of localization and evolution of the Deep Geological Disposal Facility (DGDF) for Radioactive Waste (RW) at the Yeniseisky site the conclusion has been drawn that at placement of RW of classes 1 and 2 ensuring radiation safety of this object for, at least, several million years requires correction of some components of the project. First, it is offered to carry out correction concerning the principles of interposition and spatial orientation of groups of excavations for placement of packages with RW: to arrange them on bigger number of operating levels, within smaller, but monolithic sites revealed at detailed investigation and to orient loading excavations according

to geological structures. Secondly, correction of the project is necessary concerning use of alternative horizontal placement of packages with RW of a class 1 in excavations. Thirdly, more reasonable choice of constructional and barrier materials, for example, use of cast iron or stone casting instead of concrete is useful for the isolating container, or calculation of sufficient thickness, density and optimum composition for bentonite and other clay materials and mixes. Also other specific proposals are discussed.

**Keywords:** isolation of radioactive waste, geological structure, excavation, underground water, engineering barrier, degradation of materials, migration of radionuclides, radiation safety.

### References

1. Abramov A. A., Bejgul V. P. Sozdanie podzemnoj issledovatel'skoj laboratorii na uchastke «Enisejskij» Nizhnekanskogo massiva: sostoyanie i dal'nejshee razvitie rabot // Bezopasnost' jadernyh tekhnologij i okruzhajushej sredy. 2017. no 8/108. URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2017/08/22/78690>
2. Kudryavtsev E. G., Gusakov-Stanyukovich I. V., Kamnev E. N. i dr. Federal'nyj ob'ekt podzemnogo zakhoroneniya otverzhdyonnyh radioaktivnyh otkhodov v Rossii: prakticheskie shagi k sozdaniyu // Bezopasnost' okruzhajushej sredy. 2008. No 4. S. 106–112.
3. Lobanov N. F., Bejgul V. P., Kamnev E. N. i dr. Federal'nyj ob'ekt okonchatel'noj podzemnoj izolyacii dolgozhivuschih RAO na Gorno-khimicheskom kombinatе // Bezopasnost' jadernyh tekhnologij i okruzhajushej sredy. 2011. No 1. S. 18–23. URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2017/01/11/23479>
4. Polyakov Yu. D., Lobanov N. F., Bejgul V. P. Obe-spechenie bezopasnosti ob'ektov okonchatel'noj izolyacii dolgozhivuschih RAO v Krasnoyarskom krae // Bezopasnost' jadernyh tekhnologij i okruzhajushej sredy. 2013. No 3–4. URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2017/01/11/51503>
5. Kochkin B. T., Mal'kovskij V. I., Yudinsev S. V. Nauchnye osnovy ocenki bezopasnosti geologicheskoy izolyacii dolgozhivuschih radioaktivnyh otkhodov (Enisejskij proekt). M.: IGEM RAN, 2017. 384 s.
6. Anderson E. B., Belov S. V., Kamnev E. N. i dr. Podzemnaya izolyaciya radioaktivnyh otkhodov / Pod red. V. N. Morozova. M.: Izd-vo «Gornaya kniga», 2011. 592 s.
7. Ozerskii A. Yu. Geohimicheskie osobennosti nizhnearhejskih porod na uchastke veroyatnogo podzemnogo stroitel'stva v yuzhnoj chaste Enisejskogo kryazha // Razvedka i ohrana neдр. 2012. No 7. S. 39–44.
8. Cebakovskaya N. S., Utkin S. S., Kapyrin I. V. i dr. Obzor zarubezhnyh praktik zahoroneniya OYAT i RAO / Pod red. I. I. Linge, Yu. D. Polyakova. M.: Izd-vo «Komtekhpriint», 2015. 208 s.
9. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj ehnergii «Zahoronenie radioaktivnyh otkhodov. Principy, kriterii i osnovnye trebovaniya bezopasnosti» (NP-055-14). – Utv. prikazom Federal'noj sluzhby po ehkologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 22 avgusta 2014 g. No 379. Moskva, 2014. 26 s.
10. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj ehnergii «Kriterii priemlemosti radioaktivnyh otkhodov dlya zahoroneniya» (NP-093-14). – Utv. prikazom Federal'noj sluzhby po ehkologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 15 dekabrya 2014 g. No 572. Moskva, 2014. 43 s.
11. Martynov K. V., Konstantinova L. I., Zaharova E. V. Vliyanie temperatury na vyschelachivanie model'nogo fosfatnogo stekla s imitatorami radioaktivnyh otkhodov // Voprosy radiacionnoj bezopasnosti. 2015. No 4. S. 10–21.
12. Boldyrev K. A., Kryuchkov D. V., Martynov K. V. i dr. Razrabotka raschetnyh metodov ocenki migracii radionuklidov za predely IBB s uchetom ih evolyucii: Preprint IBRAEH № IBRAE-2017-11. Moskva: IBRAEH RAN, 2017. 23 s.
13. Gribi P., Johnson L., Suter D. et al. Safety Assessment for a KBS-3H Spent Nuclear Fuel Repository at Olkiluoto. Process report POSIVA 2007-09. – POSIVA OY, Olkiluoto FI-27160, Eurajoki, Finland. 2007. 438 p. URL: [http://www.posiva.fi/files/494/POSIVA\\_2007-09web.pdf](http://www.posiva.fi/files/494/POSIVA_2007-09web.pdf)
14. Deep Geological Repository. SÚRAO [ehlektronnyj resurs]. URL: <https://www.surao.cz/en/dgr>
15. Recharde R. P., Liu H.-H., Tsang Y. W., Finsterle S. Site characterization of the Yucca Mountain disposal system for spent nuclear fuel and high-level radioactive waste // Reliability Engineering and System Safety. 2014. V. 122. P. 32–52.

---

### Information about the authors

Martynov Konstantin Valentinovich, PhD, Senior Researcher, A. N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS (31, Leninsky Av., Moscow, 119071), e-mail: mark0s@mail.ru.

Zakharova Elena Vasil'evna, PhD, Head of the Laboratory, A. N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS (31, Leninsky Av., Moscow, 119071), e-mail: zakharova@ipc.rssi.ru.

### Bibliographic description

Martynov K. V., Zakharova E. V. The Analysis of Localization and the Scenario of Evolution of DGDF for RW at the Yeniseisky Site (Krasnoyarsk Region). *Radioactive Waste*, 2018, no 2 (3), pp. 52–62. (In Russian).