

АЛЬТЕРНАТИВНАЯ КОНЦЕПЦИЯ УСТРОЙСТВА ЗАЩИТНЫХ БАРЬЕРОВ ПРИ ГЛУБИННОМ ЗАХОРОНЕНИИ РАО КЛАССА 1 НА ЕНИСЕЙСКОМ УЧАСТКЕ НИЖНЕКАНСКОГО МАССИВА

К. В. Мартынов, Е. В. Захарова, С. А. Кулюхин

Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 17 мая 2021 г.

В статье приводятся исходные данные и последовательность разработки концепции системы инженерных барьеров для пункта глубинного захоронения РАО (ПГЗРО) класса 1 (РАО-1) на Енисейском участке Нижнеканского массива (НКМ). Сформулированы главные условия безопасности, которые необходимо обеспечить при выборе материалов защитных барьеров ПГЗРО. Выполнена расчетная оценка сорбционной задержки малоподвижных и миграции мобильных долгоживущих радионуклидов РАО-1 в поровом растворе глинистых барьерных материалов. Показано, что для обеспечения безопасности ПГЗРО НКМ в консервативном варианте (без учета задержки радионуклидов вмещающими горными породами, а только за счет системы инженерных барьеров) толщина барьеров из глинистых материалов, независимо от минерального состава, должна быть не менее 1,5–2 м при установившейся в результате набухания плотности скелета материала барьера 1,4 г/см³ и выше, а масса скелета барьерного материала – не менее 100–160 т на одну упаковку РАО-1. Степень консерватизма может быть снижена после появления данных о защитных свойствах горного массива и их учета в прогнозах миграции радионуклидов.

Ключевые слова: глубинное захоронение РАО, радиационная безопасность, подземная вода, выщелачивание матрицы РАО, система инженерных барьеров, поровая и трещинная фильтрация, миграция радионуклидов, адвективный и диффузионный перенос, сорбционная задержка, глинистый материал, плотность скелета, радиоактивные отходы.

Проектная документация по пункту глубинного захоронения РАО (ПГЗРО) классов 1 и 2 (РАО-1 и РАО-2) на Енисейском участке Нижнеканского массива (НКМ) была разработана ОАО «ВНИПИПТ» в рамках ФЦП ЯРБ [1] и получила в 2015 г. положительное заключение ФАУ «Главгосэкспертиза России». Материалы проектной документации в достаточной степени отражены в открытых источниках [2, 3]. После проведения в 2015–2016 гг. дополнительных работ [4, 5] ФГУП «НО РАО» получил лицензию Ростехнадзора на размещение и сооружение ПЗРО, создаваемого в соответствии с проектной документацией

в составе подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ), без права захоронения РАО [6].

Изменение статуса объекта с ПГЗРО на ПИЛ на первом этапе строительства было вызвано большим числом неопределенностей как нормативного, так и фактического характера, связанных с содержанием проектной документации в отношении места расположения и устройства ПГЗРО и влияющих на обоснование безопасности объекта. Предложенные ОАО «ВНИПИПТ» геологический участок, схема размещения упаковок РАО и устройство системы инженерных барьеров (СИБ) вызвали возражения как со стороны

надзорных органов по выполнению формальных требований законодательства (например, замечания в протоколе ГКЗ Роснедра [7]), так и со стороны научного сообщества по существу предложенных технических решений и обеспечения безопасности объекта захоронения [8], в том числе опубликованные в открытой печати [9, 10, 11].

С целью устранения неопределенностей при обосновании безопасности была разработана Комплексная программа (Стратегический мастер-план) исследований [12] и принята новая Стратегия развития проекта ПГЗРО НКМ [13], включающая многочисленные научные, технологические, технические и конструкторские работы, направленные на совершенствование проектных решений и их экспериментальную проверку в натуральных условиях ПИЛ. Только при благоприятном исходе этих работ, подтверждающем реальность создания и безопасность функционирования ПГЗРО в обновленном виде, может быть принято решение об окончательном облике объекта и начале его эксплуатации.

Ключевым звеном для обеспечения безопасности ПГЗРО является СИБ, включающая матрицу РАО, ее упаковку и противомиграционный барьер из глинистого материала. Ее состав и конструкция призваны обеспечить допустимый выход или скорость выхода суммарной активности за пределы ПГЗРО. Конфигурация СИБ определяет технологию ее создания как в плане подготовительных горных работ, так и в части загрузки в ПГЗРО компонентов этой системы и в совокупности может рассматриваться как концепция устройства ПГЗРО.

От выбора концепции зависит, какие материалы будут использоваться для ее реализации и какие работы будут проводиться для подтверждения возможности ее воплощения в жизнь и безопасности объекта в будущем. Для ПГЗРО НКМ существует два основных начальных ограничения по выбору концепции его устройства:

1) форма, состав, радионуклидная нагрузка и первичная упаковка основной матрицы РАО-1 — остеклованные высокоактивные отходы (ОВАО) ФГУП «ПО «Маяк»;

2) горный отвод и проектные конфигурация, размеры и взаимное расположение горных выработок.

Немногочисленные опубликованные к настоящему моменту работы, содержащие критику проектной компоновки ПГЗРО НКМ, предлагают варианты ее изменения [14, 15], которые мало отличаются от исходного проекта. Фактически их следует считать не альтернативой, а модификацией проектных решений, не меняющей

основной сути проектной концепции: захоронение нескольких (от 6 до 18) упаковок РАО-1 друг над другом в вертикальных скважинах. Кроме того, эти предложения не подкреплены каким-либо анализом радиационной безопасности, обеспечиваемой СИБ в предлагаемой компоновке. Если не появятся альтернативные предложения, то все исследования по разработке нового облика ПГЗРО НКМ и обоснования его безопасности, предусмотренные в соответствии со Стратегией [13], должны будут проводиться на основе единственного варианта устройства ПГЗРО.

Очевидно, что опасность безальтернативного подхода заключается в том, что, затратив на него все силы и средства, можно остаться во все без положительного результата. В данном случае это тем более вероятно, поскольку никаких принципиальных отличий от уже подвергавшейся критике проектной конструкции в предложенных модификациях концепции нет. Это побудило нас на основании нашего опыта экспериментальных исследований физико-химических процессов взаимодействия подземных вод, матриц РАО и барьерных материалов [16–18], миграции радионуклидов в глинистых материалах и горных породах [19–21], гидродинамики и механики глинистых материалов [22, 23], а также практического опыта по созданию глиняных защитных барьеров на объектах консервации и захоронения РАО [24–26] оценить условия безопасности, которые могут обеспечить конструкция и материалы СИБ, и предложить удовлетворяющий этим условиям альтернативный вариант концепции ПГЗРО НКМ.

Последовательность разработки концепции ПГЗРО

Разработка концепции устройства защитных барьеров ПГЗРО должна быть основана на возможности локализовать миграцию радионуклидов в пространстве и/или задержать ее во времени. Для этого необходимо проанализировать следующие вопросы:

1) Радионуклидный и солевой состав выщелачиваемой матрицы РАО в условиях ПГЗРО.

2) Сорбционная емкость барьерного материала и скорость диффузии радионуклидов в поровом растворе защитных барьеров при плотности материала в условиях ПГЗРО.

3) Сорбционная задержка, разбавление и рассеяние радионуклидов при адвекционной миграции до места разгрузки загрязненных подземных вод.

Захоронение РАО

При выборе барьерных материалов необходимо обращать внимание на их физико-химическую совместимость с матрицей РАО, упаковкой, конструкционными материалами и горными породами. Барьерные материалы должны обеспечивать невозможность адвекционного выхода радионуклидов за пределы защитных барьеров. Если для их создания используется измельченный материал, то, основываясь на составе и предполагаемой технологии закладки, необходимо оценить его плотность в водонасыщенном барьере в условиях равновесия напряженно-деформированного состояния (НДС).

Только после решения этих вопросов, исходя из безопасных уровней радионуклидного загрязнения в местах разгрузки подземных вод, можно рассчитать необходимую мощность (толщину) защитных барьеров, определить геометрию и взаимную компоновку элементов ПГЗРО, а также предложить технологию его сооружения с учетом обеспечения необходимых прочностных характеристик. Относительно ПГЗРО НКМ к высказанным соображениям, безусловно, надо добавить те два начальных ограничения, которые были отмечены выше, а именно: 1) характеристики матрицы и упаковки РАО, 2) горный отвод и проектная конфигурация горных выработок. Вместе со свойствами барьерных материалов они составляют исходные данные для формирования концепции ПГЗРО.

Исходные данные и проектный облик ПГЗРО НКМ

Стеклоподобная алюмофосфатная матрица, содержащая ВАО, производится ФГУП «ПО «Маяк» и упаковывается в пеналы из углеродистой стали с герметичной крышкой из нержавеющей стали, содержащие по 3 открытых бидона с ОВАО общей массой 1,5 т (рис. 1а). В качестве дополнительной упаковки для транспортировки до ПГЗРО в проекте был предусмотрен невозвратный защитный чехол из углеродистой стали, имеющий наружный диаметр 0,7 м и длину 3,6 м. Для размещения в ПГЗРО пеналы в чехлах предполагалось устанавливать в изолирующие контейнеры (КИ) с наружным диаметром 1,2 м и длиной 4,1 м, содержащие в своей конструкции защитный слой толщиной 0,2 м из уплотненного бентонита (рис. 1б, 1в).

Проектные размеры и конфигурация горных выработок ПГЗРО, предназначенных для захоронения РАО, показаны на рис. 2. Для размещения изолирующих контейнеров (упаковок РАО-1 с тепловыделяющими ОВАО) предназначены вертикальные выработки (скважины

захоронения) диаметром 1,3 м и глубиной 75 м. Для размещения РАО-2, отходов средней активности (САО) в контейнерах ТНМК и НЖБК, предназначены горизонтальные галереи (камеры захоронения), имеющие длину 315 м (без учета заездов). Часть камер захоронения на нижнем горизонте оборудована каньонами, предназначенными для загрузки контейнеров НВЧ с нетепловыделяющими ВАО, относящимися к РАО-2.

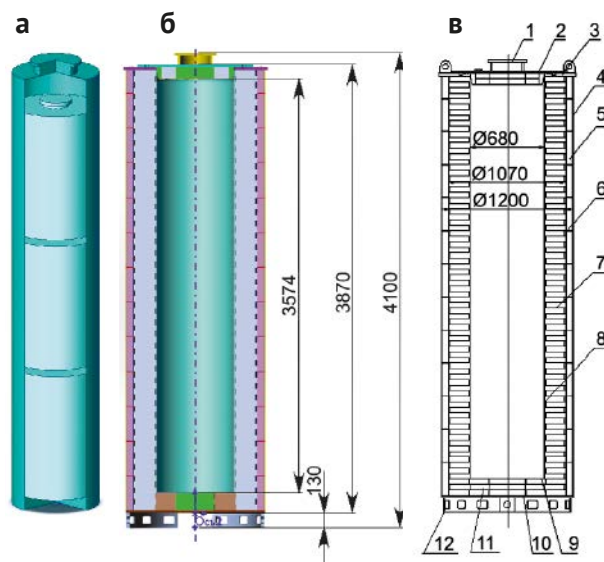


Рис. 1. Проектная упаковка РАО-1 по [2]:

а – пенал с тремя бидонами ОВАО ФГУП «ПО «Маяк», б – изолирующий контейнер (КИ) с загруженным в него пеналом в дополнительном защитном чехле, в – основные элементы КИ: 1 – люк, 2 – крышка люка, 3 – верхний фланец, 4 – наружный стакан, 5 – защита из алюминатного бетона, 6 – промежуточный стакан, 7 – защита из уплотненного бентонита, 8 – внутренний стакан, 9 – основание внутреннего стакана, 10 – основание наружного стакана, 11 – защита основания из уплотненного бентонита, 12 – юбка

Такая компоновка в отношении упаковок РАО-1 порождает две проблемы:

- 1) технические сложности при загрузке упаковок в узкие и глубокие скважины захоронения;
- 2) отсутствие пространства для создания противомиграционного барьера достаточного размера (толщины, объема, массы).

Если первая проблема теоретически имеет решение с помощью использования поворотного перегрузочного контейнера (рис. 2), то вторая – крайне ограничивает реальные возможности устройства противомиграционного барьера, обеспечивающего радиационную безопасность ПГЗРО. Кроме того, ее обоснование затрудняет эволюция механически неустойчивой конструкции, предсказанная в работе [11].

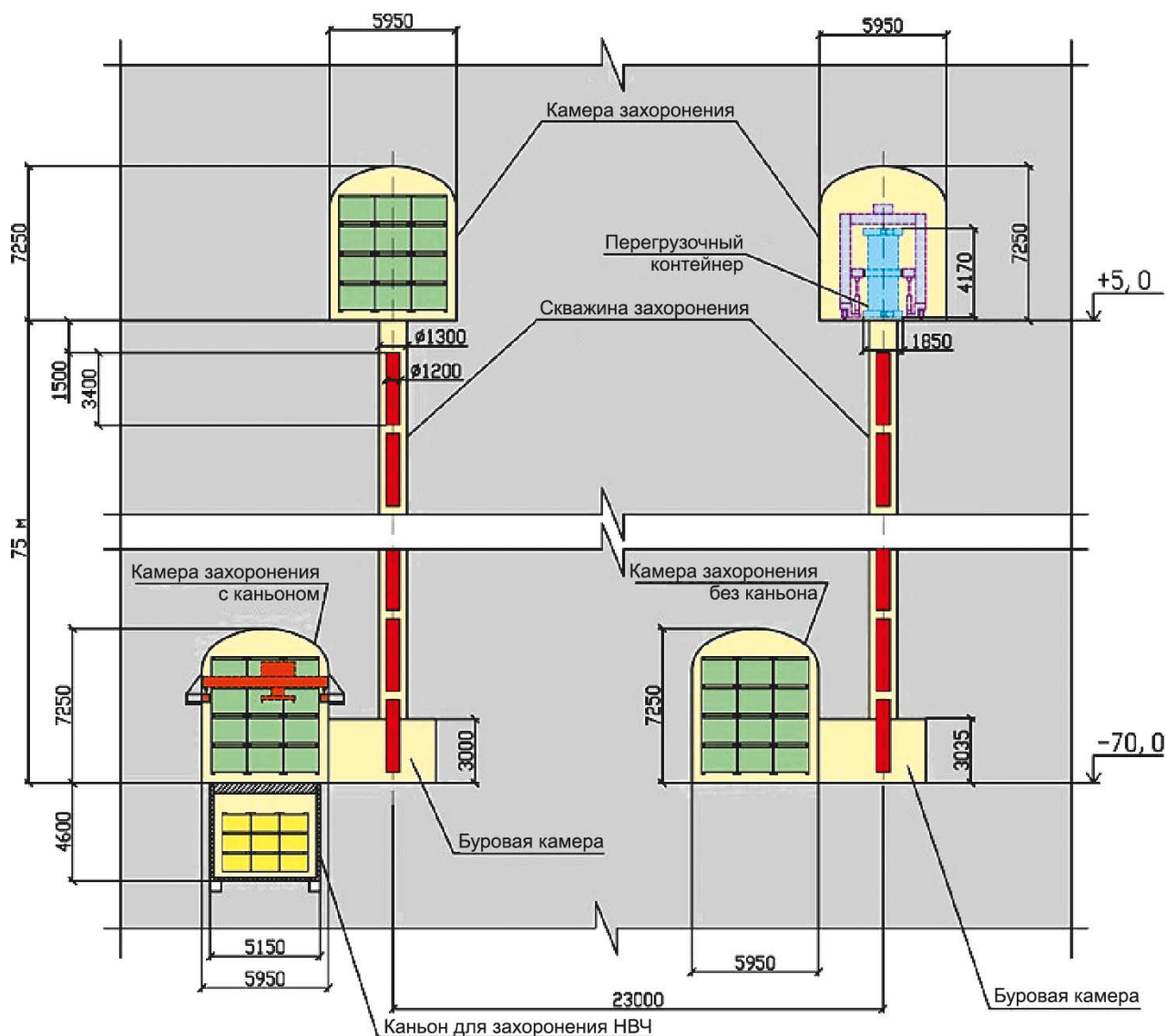


Рис. 2. Пространственное расположение камер (на горизонтах +5,0 м и -70,0 м) и скважин захоронения ПГЗРО НКМ по [2]

Информация по выщелачиванию модельных алюмофосфатных матриц РАО подземной водой в присутствии глинистых и цементных барьерных материалов в физико-химических условиях и водообменном режиме ПГЗРО приведена в работах [16–18]. Анализ экспериментальных данных позволяет оценить величины ожидаемых концентраций матричных, барьерных и породобразующих элементов, а также радионуклидов в реальных выщелатах, необходимые для расчетов распространения радиоактивного загрязнения.

Модель диффузионно-сорбционного переноса радионуклидов в поровом растворе горных пород и глинистых барьерных материалах и экспериментальные данные по коэффициентам диффузии, сорбционного распределения радионуклидов и сорбционной емкости уплотненных глинистых материалов, которые будут

использоваться в приведенных ниже миграционных расчетах, содержатся в отчете по НИР [20], но в открытой печати опубликованы только частично [21].

Изученные гидравлические и механические свойства глинистых материалов [22] вполне достаточны для предварительной оценки деформации и механической устойчивости глиняных барьеров и обоснования невозможности адвекционного выноса радионуклидов за пределы СИБ.

Главные условия (требования) безопасности при выборе материалов защитного барьера ПГЗРО НКМ

Экономически приемлемыми и научно обоснованными материалами для создания противомиграционных барьеров на объектах захоронения и консервации РАО, гарантирующими

необходимый срок сохранения защитных свойств, являются природные глинистые материалы [23, 25]. Все искусственные материалы (портландцементные бетоны, стали, матрицы РАО) в силу исходной неустойчивости в физико-химических условиях ПГЗРО деградируют достаточно быстро в масштабе времени, на которое должна быть обеспечена радиационная безопасность [11].

Состав глинистого материала, его плотность и масса в защитном барьере для обеспечения безопасности ПГЗРО на протяжении всего времени его функционирования должны выбираться исходя из следующих условий:

1) Для того чтобы исключить возможность адвекционного переноса радионуклидов, коэффициент фильтрации (K_f) воды для барьера не должен превышать порового K_f для вмещающих пород. Для пород, аналогичных гнейсам и долеритам (амфиболитам) НКМ, поровая проницаемость равна 10^{-17} м^2 [27], что соответствует $K_f = 10^{-10} \text{ м/с}$ для воды.

2) Сорбционная емкость барьера должна обеспечивать задержку определенной доли суммарной активности малоподвижных радионуклидов, содержащихся в упаковках РАО. Она будет зависеть от активности, которая может быть задержана вмещающими ПГЗРО горными породами при миграции радионуклидов в дальней зоне, а также от степени разбавления содержания радионуклидов в трещинных подземных водах на их пути от ПГЗРО до места разгрузки. Пока нет данных, позволяющих оценить эффективность геологического барьера, в качестве консервативного варианта можно рассматривать задержку глиняными защитными барьерами ПГЗРО всей суммарной активности малоподвижных радионуклидов в упаковке РАО-1. Из радиологически опасных нуклидов, содержащихся в ОВАО ФГУП «ПО «Маяк», к таким можно отнести долгоживущие радионуклиды плутония и америция. По оценкам, сделанным на основании данных работ [28, 29], в упаковке РАО-1 содержится примерно $1,3 \cdot 10^{11}$ Бк радионуклидов $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu} + ^{242}\text{Pu}$ и $6 \cdot 10^{11}$ Бк радионуклида ^{243}Am .

3) Коэффициенты диффузии мобильных радиологически опасных нуклидов ($^{79}\text{Se} - 1,5 \cdot 10^{10}$ Бк, $^{99}\text{Tc} - 3,1 \cdot 10^{11}$ Бк, $^{135}\text{Cs} - 2,4 \cdot 10^{10}$ Бк в упаковке РАО-1 [30]) в материале барьера должны обеспечить скорость их выхода за пределы СИБ, не представляющую радиационной опасности для окружающей среды с учетом сорбционной задержки радионуклидов горными породами, их разбавления и рассеяния при адвекционной миграции во вмещающем горном массиве с трещинными подземными водами до места разгрузки.

4) Глиняный барьер должен обладать физико-химической и механической устойчивостью в условиях взаимодействия с окружающей средой в течение времени, необходимого для обеспечения безопасности ПГЗРО. Наличие внутренних напряжений, в том числе вызванных набуханием глинистых минералов, недопустимо, так как может привести к изменению геометрии барьера и плотности материала, приводящих к нарушению выполнения вышеуказанных условий.

Необходимые и достаточные значения характеристик глинистых материалов для защитного барьера ПГЗРО НКМ

Выполнение *первого условия обеспечения безопасности ПГЗРО*, из обозначенных в предыдущем разделе, реализуется наиболее просто. Даже разные по минеральному составу глинистые материалы при не очень высоких значениях плотностей скелета, которые достижимы даже при самых простых технологиях создания барьеров, могут обеспечить обозначенное выше максимальное значение коэффициента фильтрации воды — 10^{-10} м/с [22].

При этом надо понимать, что такие значения K_f предотвращают количественную фильтрацию подземной воды только в условиях естественных градиентов гидравлического давления — меньше $0,001 \text{ МПа/м}$. На этапе эксплуатации ПГЗРО в области гидравлической депрессионной воронки за счет разницы напоров до 5 МПа могут возникнуть настолько высокие градиенты, что предотвращать фильтрацию через глиняный барьер станет не только невозможно, но даже опасно, так как давление на него может привести к его локальному разрушению.

По этой причине добиваться от материалов фильтрационного барьера слишком низких значений K_f , что, в свою очередь, требует подбора особого состава материала (с большой долей монтмориллонита) и/или особо высокой плотности скелета, достижимой только с применением технологий предварительного уплотнения (прессования) и укладки, нецелесообразно как с экономической, так и с научной стороны.

Для выполнения *второго условия безопасности* необходимо создать барьер, содержащий такую массу материала, которая будет достаточна для сорбционного поглощения всей суммарной активности малоподвижных радионуклидов. Рассмотрим эту задачу для радионуклидов плутония и америция. Для того чтобы не учитывать их все по отдельности, перейдем к массовым характеристикам. Суммарная масса в упаковке РАО-1 долгоживущих радионуклидов плутония

($^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu} + ^{242}\text{Pu}$), рассчитанная из вышеприведенной оценки суммарной активности по [28, 29], составляет примерно 36 г, америция (^{243}Am) — 80 г.

Для расчета массы глинистого барьерного материала (M_T) можно использовать выражение:

$$M_T = m_T / (K_d \cdot C_p). \quad (1)$$

Как видно из этой формулы, искомая величина M_T зависит как от массы сорбированного элемента (m_T), так и от коэффициента сорбционно-го распределения (K_d) и концентрации элемента в поровом растворе барьера (C_p). Наши исследования состава выщелатов модельных алюмофосфатных матриц РАО показали, что концентрации редкоземельных элементов и актинидов, кроме урана и нептуния, в физико-химических условиях ПГЗРО не превышают $1 \cdot 10^{-6}$ г/л [16–18].

Коэффициенты сорбционного распределения для малоподвижных радионуклидов ($K_d^{\text{экс}}$) экспериментально определяются в суспензиях при соотношении массы сорбента к объему раствора ($M_T/V_p^{\text{экс}} = 1$ г/20 см³). Для условий реального глиняного барьера, в котором соотношения фаз существенно отличаются, требуется выполнить пересчет $K_d^{\text{реал}}$ с учетом реальной плотности скелета барьерного материала ($\rho_T^{\text{реал}}$) по формуле:

$$K_d^{\text{реал}} = K_d^{\text{экс}} \cdot (M_T/V_p^{\text{экс}}) / (2,75 - \rho_T^{\text{реал}}) / 2,75 \rho_T^{\text{реал}}. \quad (2)$$

По нашим данным, экспериментальные значения $K_d^{\text{экс}}$ в модельных растворах выщелатов алюмофосфатных матриц РАО примерно одинаковы на разных по минеральному составу (каолиновых, бентонитовых, смешанных) глинистых материалах и составляют для плутония $1,5 \cdot 10^4$ см³/г, для америция — $2 \cdot 10^4$ см³/г [20]. Для ожидаемой плотности скелета глинистого материала в водонасыщенном засыпном защитном барьере ($1,4$ г/см³) значения $K_d^{\text{реал}}$, рассчитанные по формуле (2), составят: для плутония — $3,7 \cdot 10^2$ см³/г, для америция — $5 \cdot 10^2$ см³/г.

Масса барьерного материала в рассматриваемом случае будет равна для плутония 97 т, для америция — 160 т. При выбранном $\rho_T^{\text{реал}} = 1,4$ г/см³ рассчитанные значения соответствуют $V_T^{\text{реал}}$, равному 71 и 114 м³ соответственно. Барьер цилиндрической формы, окружающий упаковку РАО-1, имеющую габариты: высота $h = 3,6$ м и диаметр $d = 0,7$ м, — должен иметь наружные размеры для плутония $h = 6,6$ м, $d = 3,7$ м и для америция — $h = 7,2$ м, $d = 4,5$ м, то есть толщина барьера должна составлять для плутония 1,5 м, для америция — 1,9 м.

Оценка выполнения *третьего условия безопасности* — это наиболее сложный вопрос, так как в настоящее время нет данных для того,

чтобы корректно учесть сорбционную задержку радионуклидов горными породами массива, вмещающего ПГЗРО, разбавление и рассеяние радионуклидов при миграции с трещинными подземными водами до места разгрузки. Это может привести к выбору как слишком консервативного варианта барьера, так и недостаточного для обеспечения безопасности ПГЗРО. В связи с этим пока можно лишь выполнить расчетную оценку задержки выхода мобильных радионуклидов при их диффузионном переносе в барьерах из разных по минеральному составу и плотности глинистых материалов.

Первый вариант расчета выполнен для барьера, который, в соответствии с проектной концепцией [2, 15], имеет начальную толщину $L = 0,2$ м и сооружается методом закладки из прессованных блоков с плотностью скелета $\rho_T = 1,8$ г/см³. Второй вариант — для засыпного барьера, имеющего начальную толщину $L = 1,5$ м при плотности скелета $\rho_T = 1,4$ г/см³. Характеристики барьера для второго варианта расчета были обоснованы выше как минимальные значения, необходимые для фиксации всей суммарной активности долгоживущих малоподвижных радионуклидов.

В качестве материалов для барьеров рассмотрим два варианта. Первый — это материал «Б» из бентонита месторождения «10-й Хутор» (Хакассия), содержащего 70% масс. монтмориллонита, второй — смешанный материал «К+Б» из 30% масс. того же бентонита и 70% масс. белого каолина Кампановского месторождения (Красноярский край), глинистые минералы которого представлены преимущественно каолинитом (55% масс.). Смешанный материал, с учетом небольшого обогащения глинистой фракцией при подготовке, содержит 40% масс. каолинита и 30% масс. монтмориллонита и является аналогом барьерных смесей, которые используются для создания внутреннего барьера Новоуральского ПГЗРО ФГУП «НО РАО» и консервации ПУР «АД» ФГУП «ГХК» [24]. Неглинистые (обломочные) фракции материалов представлены в основном кварцем и полевыми шпатами.

Монтмориллонит бентонита месторождения «10-й Хутор» относится к щелочноземельному типу и обладает слабым набуханием при водонасыщении. Индекс свободного набухания бентонита в модельном выщелате алюмофосфатных матриц РАО — не более 18 мл на 2 г (коллоидальность — 30%). Однако в процессе длительных (более одного года) диффузионных экспериментов с материалами «Б» и «К+Б» было обнаружено, что их набухания достаточно для того, чтобы оба материала, предварительно

Значения характеристик мобильных радионуклидов и барьерных материалов по данным [16–18, 20, 30], использованных в расчетах диффузионного переноса радионуклидов

Радионуклид	$T_{1/2}$, лет	В упаковке РАО-1 (1,5 т ОВАО)		C_p в выщелате, мг/дм ³	Материал Б, $\rho_T = 1,1$ г/см ³		Материал К+Б, $\rho_T = 1,4$ г/см ³	
		Масса m_0 , г	Активность $A_0/10^{10}$, Бк		$D_e \cdot 10^8$, см ² /с	K_d , см ³ /г	$D_e \cdot 10^8$, см ² /с	K_d , см ³ /г
⁷⁹ Se	6,50·10 ⁴	5,75	1,48	0,24	3,82	–	3,37	–
⁹⁹ Tc	2,11·10 ⁵	484,5	30,5	0,5	9,80	–	–	–
¹³⁵ Cs	2,30·10 ⁶	563,7	2,39	0,34	12,2	66	15,9	70

уплотненные до значения плотности скелета 1,8 г/см³, даже в условиях ограниченного пространства при водонасыщении стремились увеличить свой объем за счет заполнения технологических пустот, деформации тефлоновых элементов экспериментальных ячеек, выдавливания через технологические зазоры в смежные полости. Многократные измерения влажности и плотности образцов после экспериментов показали, что плотность скелета для материала Б понижалась до значения 1,1 г/см³, а для материала К+Б — до 1,4 г/см³, которые соответствовали равновесному давлению набухания в условиях экспериментов. Полученные данные дают основание полагать, что в ПГЗРО равновесие между набухающими глинистыми барьерными материалами, элементами конструкций и вмещающими породами, ограничивающими их объем, будет достигаться при близких значениях плотности глинистых материалов.

Описанный эффект набухания учтен при расчетах. Принято, что:

- материал Б, изначально уплотненный до 1,8 г/см³, при водонасыщении изменяет плотность до 1,1 г/см³ с увеличением объема, пропорциональным изменению толщины барьера от 0,2 до 0,3 м;
- материал К+Б, изначально уплотненный до 1,8 г/см³, при водонасыщении изменяет плотность до 1,4 г/см³ с увеличением объема, пропорциональным изменению толщины барьера от 0,20 до 0,25 м;
- материал Б, изначально уплотненный до 1,4 г/см³, при водонасыщении изменяет плотность до 1,1 г/см³ с увеличением объема, пропорциональным изменению толщины барьера от 1,5 до 1,7 м;
- материал К+Б, изначально уплотненный до 1,4 г/см³, при водонасыщении не изменяет свою плотность, а также объем и толщину барьера (1,5 м).

Значения массы (m_0) и активности (A_0) радиологически значимых мобильных радионуклидов в упаковке РАО-1 [30], их концентрации (C_p) в выщелатах алюмофосфатных матриц [16–18] и диффузионно-сорбционные характеристики:

эффективные коэффициенты диффузии (D_e) и сорбционного распределения (K_d) в поровом растворе глинистых материалов разного состава и плотности [20], использованные в расчетах диффузионного переноса радионуклидов, представлены в таблице.

Селен и технеций находятся в водных растворах в форме анионов: селенита SeO_3^{2-} и пертехнетата TcO_4^- , цезий — в форме катиона Cs^+ . Их концентрации в поровом растворе барьерных глинистых материалов оценены исходя из результатов экспериментов по выщелачиванию модельных алюмофосфатных матриц РАО в физико-химических условиях ПГЗРО и для всех рассматриваемых радионуклидов имеют один порядок. Эффективные коэффициенты диффузии из растворов с составом выщелатов алюмофосфатных матриц РАО возрастают для обоих глинистых материалов в последовательности $Se < Tc < Cs$ в 4–5 раз (для материала К+Б данные для технеция пока не получены) и практически не зависят от состава материалов.

Из рассматриваемых радионуклидов только цезий проявляет сорбционную задержку, близкую для обоих материалов. Значения K_d , представленные в таблице, рассчитаны по результатам диффузионных экспериментов по соотношению:

$$K_d \cdot \rho_T = D_e / D_a, \quad (3)$$

где D_a — действительный коэффициент диффузии. Активность (A_3) долгоживущего радионуклида цезия, сорбированного барьерами при его поровой диффузии в барьерных материалах, рассчитана по формуле, аналогичной (1), а время сорбционной задержки (t_3) — по формуле:

$$t_3 = L^2 / 2\pi D_a. \quad (4)$$

Результаты расчета сорбционной задержки ¹³⁵Cs в барьерах разной начальной толщины из двух различных по минеральному составу глинистых материалов показаны на рис. 3. Из полученных результатов видно, что добиться сорбции значительной доли активности ¹³⁵Cs и существенного увеличения времени этого процесса можно только за счет повышения толщины барьера.

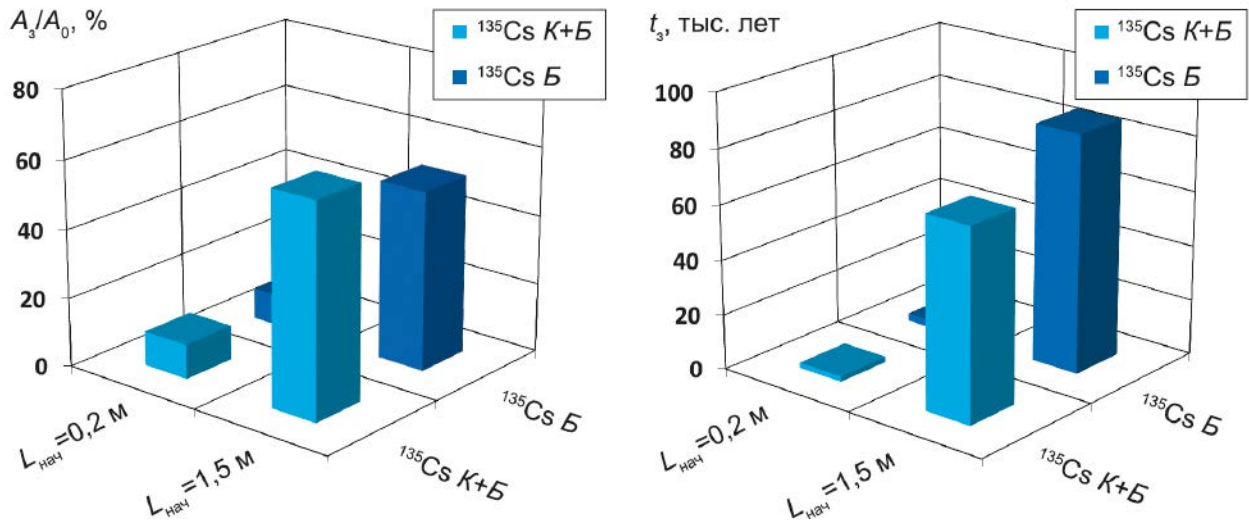


Рис. 3. Доли активности ^{135}Cs , сорбированного разными барьерами (A_3), от его исходной активности в упаковке РАО-1 (A_0) и времена сорбционной задержки (t_3)

После завершения сорбционного насыщения барьерных материалов долгоживущий радионуклид цезия, также как несорбирующиеся радионуклиды технеция и селена, благодаря диффузионному массопереносу будет выходить за пределы защитного барьера. Скорости выхода активности (A_d) радионуклидов при стационарной поровой диффузии через глиняные барьеры и время выхода (t_d) всей активности, содержащейся в упаковке РАО-1, с учетом распада, показаны на рис. 4. Суммарный диффузионный выход радионуклидов из упаковки за пределы глиняных барьеров за время t_d с учетом сорбционной задержки (для ^{135}Cs) и распада показан на рис. 5.

Для расчета A_d и t_d решалась система уравнений:

$$A_d = (C_p \cdot D_e \cdot S \cdot t_d) / L, \quad (5)$$

$$A_d = A_0 \cdot \exp(-\lambda t_d), \quad (6)$$

где S — площадь упаковки РАО-1 ($7,0 \text{ м}^2$), λ — постоянная распада радионуклидов. Для ^{135}Cs во втором уравнении системы (6) исходная активность (A_0) в упаковке уменьшалась на распад за время t_3 и активность сорбированного радионуклида (A_3):

$$A_d = (A_0 \cdot \exp(-\lambda t_3) - A_3) \cdot \exp(-\lambda t_d). \quad (7)$$

Из рис. 5б видно, что суммарная активность радионуклида, которая может выйти за пределы барьера в процессе поровой диффузии, уменьшается относительно его исходной активности в упаковке РАО за счет сорбции на барьерном материале (для ^{135}Cs) и радиоактивного распада за время сорбции (для ^{135}Cs) и диффузии. В результате этого долю вышедшей за пределы барьера активности радионуклидов в упаковке РАО от исходной можно заметно уменьшить только за счет толщины барьера.

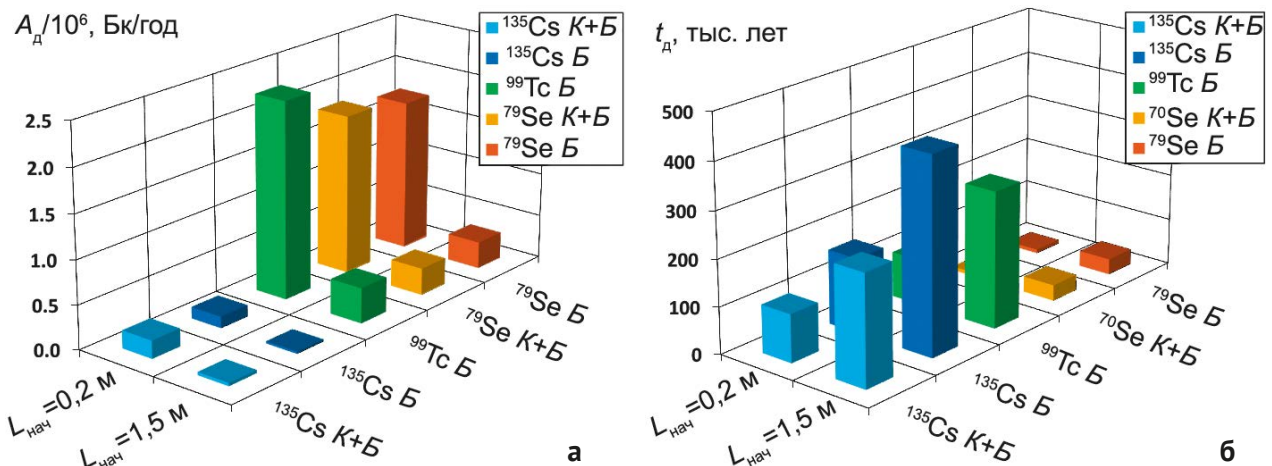


Рис. 4. Годовые выходы активности радионуклидов (A_d) при поровой диффузии через разные барьеры (а) и времена выхода всей активности (t_d) из упаковки РАО-1 (б)

Захоронение РАО

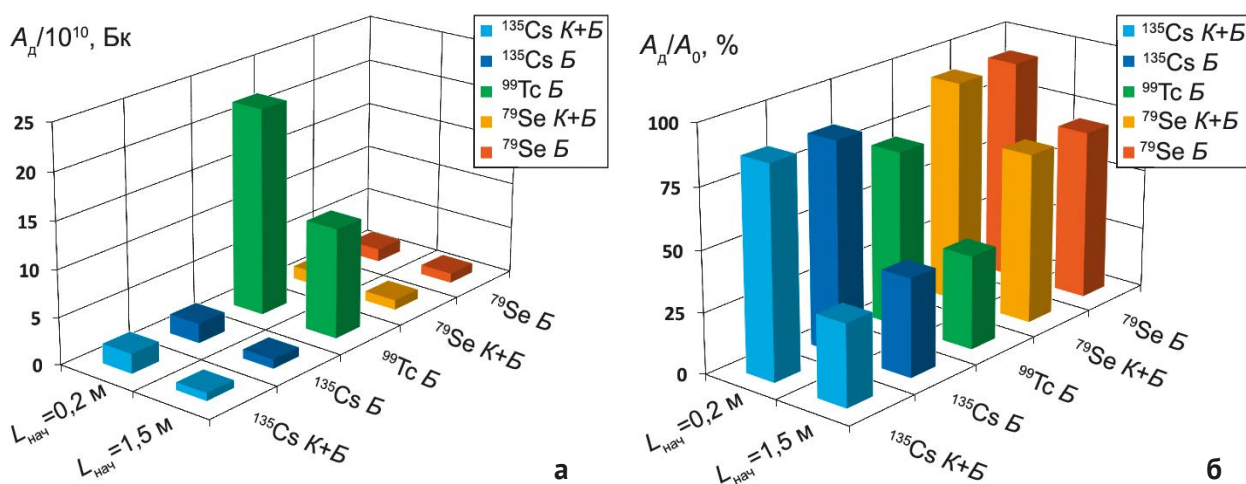


Рис. 5. Суммарные активности (а) и доли от исходных активностей радионуклидов в упаковке РАО (б), вышедшие за счет поровой диффузии через разные барьеры

Несмотря на то что для технеция, по сравнению с другими мобильными радионуклидами, наблюдается максимальное уменьшение барьерами доли вышедшей активности в упаковке РАО от исходной (рис. 5б), его суммарная активность, вышедшая за пределы барьеров, представляет собой наибольшую радиологическую опасность из рассматриваемых радионуклидов (рис. 5а). Уменьшить ее, хотя бы до уровня другого несорбирующегося радионуклида (селена), можно путем снижения скорости выхода технеция через барьеры за счет увеличения их толщины (рис. 4а).

Сравнение скоростей и продолжительностей диффузионного выхода активности мобильных радионуклидов, выщелоченных из упаковки РАО-1, через разные по толщине барьеры из материала Б с учетом сорбции и радиоактивного распада показано на рис. 6. За счет увеличения конечной толщины барьера в шесть раз суммарная годовая активность радионуклидов,

преодолевших защитный барьер, уменьшается на всех этапах в те же шесть раз, а продолжительность этапов увеличивается в три раза.

Таким образом, расчеты диффузионно-сорбционного переноса радионуклидов в поровом растворе глинистых барьерных материалов показали, что ни состав материала, ни его плотность не оказывают такого существенного влияния на фиксирующие и задерживающие свойства защитных барьеров, как их толщина (масса, объем). В связи с этим значительного эффекта замедления диффузионного переноса мобильных радионуклидов, также как и большой сорбционной задержки малоподвижных радионуклидов, можно достичь, используя глиняные барьеры толщиной не менее 1,5–2 м.

Выполнение *четвертого условия безопасности* при выборе глинистых материалов защитных барьеров связано с их физико-химической и механической устойчивостью при взаимодействии с окружающей средой в течение всего

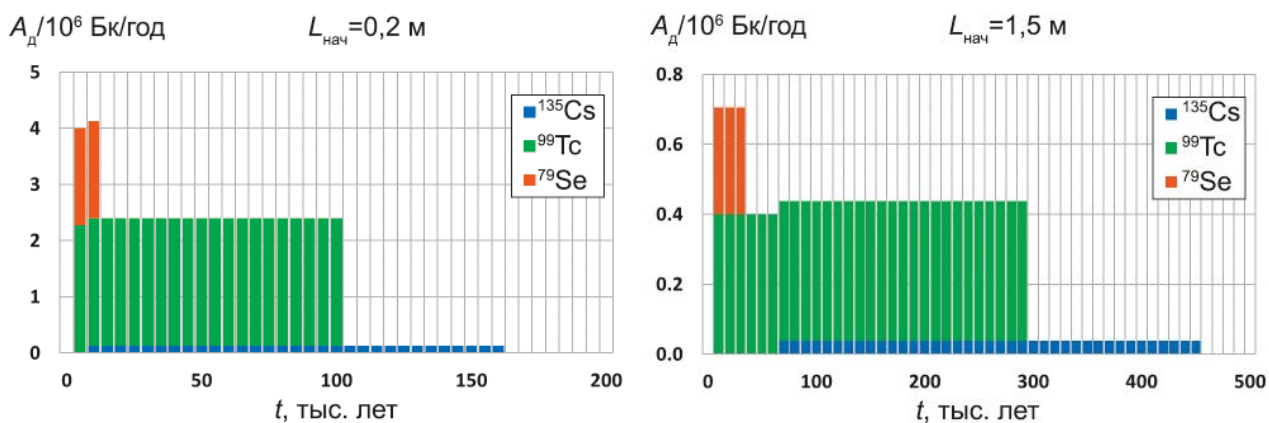


Рис. 6. Продолжительность и годовые выходы активности радионуклидов из упаковки РАО-1 при поровой диффузии через разные по толщине барьеры из материала Б

времени, необходимого для обеспечения безопасности ПГЗРО. В отношении физико-химической устойчивости природные глинистые материалы обладают абсолютным преимуществом по сравнению с искусственными материалами: матричными материалами, бетонами, сталями.

Глинистые минералы (каолинит, монтмориллонит) находятся в физико-химическом равновесии с окружающей средой и будут сохранять свои свойства в течение длительного времени [25]. Их устойчивость в условиях ПГЗРО ограничена только физико-химическими возмущениями, связанными с вмешательством человека в природную систему, например: изменением состава, водородного показателя и окислительно-восстановительного потенциала подземной воды за счет растворения искусственных матричных и конструкционных материалов (алюмофосфатные, боросиликатные, портландцементные и другие матрицы РАО, стальные и железобетонные элементы конструкций, бетонная крепь горных выработок и т. д.), коррозией стальных упаковок РАО, радиолитическими процессами и радиационным тепловыделением, неаборигенной микробной активностью. По этой причине вмешательство в физико-химическое равновесие вмещающего горного массива при строительстве и эксплуатации ПГЗРО должно быть минимизировано.

Механическая устойчивость глиняных барьеров определяется их деформационными и прочностными характеристиками [23]. Наличие внутренних напряжений, в том числе вызванных набуханием глинистых минералов, недопустимо, так как неизбежно ведет к изменению геометрии барьера и плотности материала. Этот эффект, наблюдавшийся в экспериментах по изучению диффузии компонентов порового раствора через уплотненные образцы глинистых материалов, был описан выше. При одинаковой начальной плотности скелета, равной $1,8 \text{ г/см}^3$, бентонитовый материал, содержащий 70% масс. монтмориллонита, при набухании в ограниченном объеме понизил плотность до $1,1 \text{ г/см}^3$, в то время как смешанный каолин-бентонитовый материал, содержащий 30% масс. монтмориллонита, в тех же условиях понизил плотность только до $1,4 \text{ г/см}^3$.

Деформация под действием внешней нагрузки или как ответ внешней среды на внутренние напряжения никогда не бывает равномерной, что приводит к локальному истончению барьеров. Уменьшение плотности при набухании снижает не только миграционные, но и прочностные характеристики глиняного барьера (угол внутреннего трения и удельное сцепление). Ослабление

прочности усугубляет опасность истончения барьеров даже под нагрузкой, оказываемой на барьеры упаковками РАО, не говоря уже о внешних нагрузках, вызываемых тектоническими напряжениями и подвижками горных пород.

Локация в проектных выработках ПГЗРО НКМ упаковок РАО-1 и защитного барьера, достаточного для обеспечения безопасности

Резюмируя приведенные выше расчеты и соображения, основанные на экспериментальных данных по миграции радионуклидов в поровом растворе глиняных барьеров и гидромеханических характеристиках глинистых барьерных материалов, можно сформулировать основные требования к составу, плотности и размерам (толщине, массе, объему) защитного барьера для РАО-1. Состав материала должен быть полиминеральным и содержать не менее 70% масс. глинистой фракции, включая 30% масс. щелочноземельного (малонабухающего) монтмориллонита и 40% масс. каолинита. Плотность скелета водонасыщенного материала в ненапряженном состоянии (при отсутствии давления набухания) должна быть не менее $1,4 \text{ г/см}^3$. Минимальная толщина барьера должна составлять 1,5 м, минимальная масса — 100 т сухого материала на одну упаковку.

Однако возникает вопрос, есть ли место в проектных горных выработках ПГЗРО НКМ для барьера такой толщины и массы на одну упаковку РАО-1? Ответ будет положительный, если упаковки РАО-1 размещать в горизонтальных галереях — камерах захоронения, имеющих сечение $37,4 \text{ м}^2$ (без каньона) и длину 315 м. Упаковки РАО-1 можно размещать в галереях как вдоль, так и поперек их продольной оси с разными расстояниями по вертикали и горизонтали друг от друга в зависимости от технического удобства установки на место, тепловыделения, радионуклидного состава и других соображений, влияющих на безопасность.

Локация РАО-1 в горизонтальных галереях делает ненужной технически сложную проходку вертикальных скважин большого диаметра. Однако при таком размещении упаковок с РАО-1 место, предназначенное для размещения упаковок РАО-2 на двух рабочих горизонтах, оказывается занято. Для его восполнения можно, например, предложить проходку еще двух аналогичных горизонтов внутри проектного горного отвода, сократив расстояние между ними до 25 м. Эти работы могут быть обеспечены за счет экономии средств от исключения из проекта вертикальных скважин захоронения.

С точки зрения обеспечения безопасности расположение РАО всех классов, сосредоточенных в разных матрицах и помещенных в различные типы упаковок, на разных горизонтах является более предпочтительным, чем в непосредственной близости друг от друга, как это подразумевается проектной схемой (рис. 2). Это будет минимизировать взаимное физико-химическое влияние из-за выщелачивания химически контрастных матричных материалов, температурного воздействия тепловыделяющих РАО на другие типы, радиолитического и коррозионного газовыделения активных в этом отношении РАО на пассивные. Для научного обоснования распределения типов РАО по горизонтам и участкам необходимы прогнозные расчеты миграции подземных вод в ближней зоне ПГЗРО, тепловых полей и полей напряжений, интенсивности и состава газогенерации различного генезиса, коррозии и выщелачивания упаковок и матриц РАО после загрузки и закрытия объекта.

В заключение раздела следует отметить, что проектные размеры камер захоронения позволяют не только создавать вокруг упаковок РАО-1 защитный барьер необходимой для обеспечения безопасности толщины, но также использовать существующие подземные горнопроходческие машины и механизмы для транспортировки и установки упаковок РАО на место захоронения в горных выработках, равно как для засыпки и необходимого уплотнения сухих барьерных материалов.

Выводы

Выполненные расчетные оценки сорбции и миграции радионуклидов в глинистых материалах защитных барьеров РАО-1 в виде остеклованной алюмофосфатной матрицы показали, что для обеспечения безопасности ПГЗРО НКМ в консервативном варианте (без учета задержки радионуклидов вмещающими горными породами, а только за счет СИБ) глиняные барьеры, независимо от минерального состава материалов, должны обладать мощностью (толщиной) не менее 1,5–2 м и массой 100–160 т и выше на одну упаковку РАО-1 при плотности скелета материала в водонасыщенном барьере не менее 1,4 г/см³. Такие минимальные требования к барьеру, наряду с использованием глинистого материала, делающего невозможным адвекционный перенос радионуклидов в условиях ПГЗРО, обеспечивают полную сорбционную фиксацию барьером малоподвижных долгоживущих радионуклидов и уменьшение скорости

выхода мобильных радионуклидов за пределы барьера в шесть раз по сравнению с барьером, предусмотренным в проекте ПГЗРО НКМ. Степень консерватизма может быть снижена после появления данных о защитных свойствах горного массива и их учета в определении миграции радионуклидов.

Для размещения упаковок РАО-1 в ПГЗРО НКМ без потери количественных показателей и создания вокруг них защитного глиняного барьера достаточной толщины и массы для обеспечения безопасности могут быть использованы горизонтальные выработки камер захоронения, предназначенные в проекте для РАО-2. Для компенсации места количество горизонтов для захоронения РАО-2 в пределах горного отвода ПГЗРО может быть увеличено до четырех за счет исключения мероприятий по проходке вертикальных скважин захоронения большого диаметра, предусмотренных в проекте для РАО-1.

Упаковки РАО-1 могут размещаться в камерах захоронения вдоль или поперек оси камер с разной дистанцией. Варьирование плотностью размещения и расположением на разных горизонтах упаковок РАО различных классов позволяет максимально разделить в пространстве контрастные по составу и характеристикам матрицы РАО и материалы упаковок для минимизации из взаимного влияния друг на друга, которое может вызвать усиление выщелачивания и миграции радионуклидов. Использование горизонтальных горных выработок облегчает технологию загрузки упаковок РАО в ПГЗРО, засыпки и первоначального уплотнения материала глиняных защитных барьеров.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Литература

1. Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года». Постановление Правительства Российской Федерации № 444 от 13 июля 2007 г. — URL: <http://фцп-яrb2030.рф/about/archiv/> (дата обращения 25.03.2021).
2. Материалы обоснования лицензии на размещение и сооружение не относящегося к ядерным установкам пункта хранения РАО, создаваемого в соответствии с проектной документацией на строительство объектов окончательной изоляции РАО (Красноярский край, Нижне-Канский

массив) в составе подземной исследовательской лаборатории (включая материалы оценки воздействия на окружающую среду). Т. 1. 112 с., Т. 3. 158 с. Москва, ФГУП «НО РАО», 2015. — URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/> (дата обращения 25.03.2021).

3. 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.

4. Отчет по обоснованию безопасности деятельности по размещению и сооружению не относящегося к ядерным установкам пункта хранения РАО, создаваемого в соответствии с проектной документацией на строительство объектов окончательной изоляции РАО (Красноярский край, Нижне-Канский массив) в составе подземной исследовательской лаборатории. — Москва, ФГУП «НО РАО», 2015.

5. Караулов В. А., Заблоцкий К. А. Геологическое доизучение (оценочная стадия) горного массива участка «Енисейский» для обоснования расширения интервала захоронения радиоактивных отходов до глубин 450—525 метров (+5 — –70 м БС) объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижне-Канский массив). — Красноярск, ОАО «Красноярскгеология», 2015.

6. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Лицензия № ГН-0.1.0.2-304-3318 от 27 декабря 2016 г. — URL: <http://www.norao.ru/waste/glossary/Лицензия ГН 01 02 304 3318 на размещение и сооружение пункта хр.pdf> (дата обращения 25.03.2021).

7. Утверждение заключения государственной экспертизы материалов Геологического доизучения (оценочная стадия) горного массива участка Енисейский для обоснования расширения интервала захоронения радиоактивных отходов до глубин 450—525 м объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижне-Канский массив). Протокол ГКЗ Роснедра № 4523-пс от 03.02.2016.

8. Оптимизация исследований и разработка системы принятия решений по реализации стратегического мастер-плана по оценке и обоснованию долговременной безопасности ПГЗРО для захоронения РАО 1 и 2 классов в Нижне-Канском массиве (участок «Енисейский») : Отчет о НИР по государственному контракту № Н.4д.241.20.17.1044 от 29.03.2017. — Москва. ИБРАЭ РАН, 2017.

9. Дорофеев А. Н., Большов Л. А., Линге И. И., Уткин С. С., Савельева Е. А. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта

глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 33—42.

10. Морозов О. А., Расторгуев А. В., Неуважаев Г. Д. Оценка состояния геологической среды участка «Енисейский» (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. 2019. № 4(9). С. 46—62. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62.

11. 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.

12. Комплексная программа исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров (Стратегический мастер-план исследований в обосновании безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия ПГЗРО в Нижнеканском массиве (Красноярский край). — Москва. ГК «Росатом», 2018.

13. Крюков О. В. Стратегия создания пункта глубинного захоронения РАО // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 114—120.

14. Бейгул В. П., Павлов Д. И. Сравнение альтернативных схем захоронения РАО класса 1 в составе ПГЗРО // Атомная энергия 2.0 Статьи. 12.11.2019. — URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2019/11/12/98998> (дата обращения 25.03.2021).

15. Богатов С. А., Крючков Д. В., Павлов Д. И., Сыченко Д. В. Анализ различных концепций захоронения РАО класса 1 в кристаллических породах // Радиоактивные отходы. 2020. № 3 (12). С. 66—77. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-66-77.

16. Определение параметров миграции радионуклидов в материалах барьеров безопасности и вмещающих горных породах после выщелачивания компонентов фосфатного стекла в условиях ПГЗРО. Этап № 2. Определение предельных концентраций (удельных активностей) матричных компонентов и радионуклидов при выщелачивании из фосфатных матриц в присутствии бентонита в условиях ПГЗРО : Отчет по НИР по договору № 1/16974-Д от 15.05.2019. — Москва, ИФХЭ РАН. 2020. 178 с.

17. Мартынов К. В., Захарова Е. В. Выщелачивание частично закристаллизованной фосфатной матрицы РАО в статическом режиме // Вопросы радиационной безопасности. 2020. № 3. С. 21—32.

18. Мартынов К. В., Захарова Е. В. Выщелачивание матриц с радиоактивными отходами в условиях захоронения на примере модельного фосфатного стекла // Радиохимия. 2021. Т. 63. № 1. С. 80—92. DOI: 10.31857/S0033831121010123.

19. Мартынов К. В., Коневник Ю. В., Захарова Е. В. Барьерные свойства кристаллических горных пород при миграции радионуклидов. // Радиохимия. 2017. Т. 59. № 4. С. 371—378.

20. Определение параметров миграции радионуклидов в материалах барьеров безопасности и вмещающих горных породах после выщелачивания компонентов фосфатного стекла в условиях ПГЗРО. Этап №3. Определение эффективных коэффициентов диффузии и коэффициентов сорбционного распределения радионуклидов и их имитаторов после выщелачивания из фосфатного стекла в уплотненных бентонитовых материалах и трещинно-поровых растворах основных горных пород ПГЗРО : Отчет по НИР по договору № 1/16974-Д от 15.05.2019. — Москва, ИФХЭ РАН. 2020. 189 с.
21. *Мартынов К. В., Коневник Ю. В., Захарова Е. В.* Диффузия элементов РАО в глиняных защитных барьерах // Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии / Отв. редактор О. А. Луканин. — Москва, ГЕОХИ РАН. 2020. С. 307—310.
22. *Мартынов К. В., Жаркова В. О., Захарова Е. В.* Компрессионные и фильтрационные свойства барьерных материалов // Глины и глинистые минералы: VI Российская Школа по глинистым минералам «Agrilla Studium-2019» и IV Российское Собрание по глинам и глинистым минералам «ГЛИНЫ-2019», Москва, 07—15 ноября 2019 года. Материалы докладов. — Москва, ИГЕМ РАН, 2019. С. 265—268. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42530322> (дата обращения 25.03.2021).
23. *Мартынов К. В., Захарова Е. В., Дорофеев А. Н., Зубков А. А., Прищеп А. А.* Функциональные свойства глинистых материалов для защитных барьеров радиационно опасных объектов // Радиоактивные отходы. 2020. №4(13). С. 42—57.
24. *Захарова Е. В., Мартынов К. В.* Требования к барьерным глинистым материалам для захоронения и консервации радиационно-опасных объектов // Глины и глинистые минералы: VI Российская Школа по глинистым минералам «Agrilla Studium-2019» и IV Российское Собрание по глинам и глинистым минералам «ГЛИНЫ-2019», Москва, 07—15 ноября 2019 года. Материалы докладов. — Москва, ИГЕМ РАН, 2019. С. 257—259. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42530314> (дата обращения 25.03.2021).
25. *Мартынов К. В., Захарова Е. В., Дорофеев А. Н., Зубков А. А., Прищеп А. А.* Использование глинистых материалов для создания защитных барьеров радиационно опасных объектов // Радиоактивные отходы. 2020. №3(12). С. 39—53. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-39-53.
26. Пат. RU 2730859 С1, Российская Федерация. Способ получения барьерного материала / *Захарова Е. В., Жаркова В. О., Прищеп А. А., Мартынов К. В., Кузов В. А., Измestьев А. М.* № 2019136926; заявл. 19.11.2019; опубл. 26.08.2020. 10 с.
27. *Шмонов В. М., Витовтова В. М., Жариков А. В.* Флюидная проницаемость пород земной коры. — М.: Научный мир, 2002. 216 с.
28. *Ремизов М. Б., Козлов П. В., Борисенко В. П., Деметтьева И. И., Блохин П. А., Самойлов А. А.* Разработка алгоритма оценки радионуклидного состава остеклованных ВАО ФГУП «ПО «Маяк» для цели их безопасного захоронения // Радиоактивные отходы. 2018. № 3 (4). С. 102—110.
29. *Блохин А. И., Блохин П. А., Казиева С. Т.* Применение расчетного кода TRACT для оценок радионуклидных составов и радиационных характеристик ОЯТ и РАО класса 1 // Радиоактивные отходы. 2020. №4(13). С. 99—111. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-99-111.
30. *Богатов С. А., Блохин П. А., Козлов П. В., Ремизов М. Б.* Оценочный расчет активности некоторых долгоживущих радионуклидов в составе РАО класса 1 — остеклованных ВАО, образующихся при переработке ОЯТ реакторов ВВЭР // Вопросы радиационной безопасности. 2019. № 2. С. 39—46.

Информация об авторах

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

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

Кулюхин Сергей Алексеевич, доктор химических наук, заместитель директора, Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН (119071, Москва, Ленинский пр-т, д. 31, корп. 4), e-mail: kulyukhin@ipc.rssi.ru.

Библиографическое описание статьи

Мартынов К. В., Захарова Е. В., Кулюхин С. А. Альтернативная концепция устройства защитных барьеров при глубинном захоронении РАО класса 1 на Енисейском участке Нижнеканского массива // Радиоактивные отходы. 2022. № 2 (19). С. 68–84. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-68-84.

ALTERNATIVE CONCEPTUAL DESIGNS OF SAFETY BARRIERS PROPOSED FOR DEEP RW CLASS 1 DISPOSAL AT THE YENISEISKIY SITE IN THE NIZHNEKANSKIY ROCK MASS

Martynov K. V., Zakharova E. V., Kulyukhin S. A.

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

Article received on May 17, 2021

The paper presents initial data and a flowchart supporting the conceptual development of an engineered safety barrier system (EBS) intended for a deep disposal facility (DDF) for RW Class 1 (RW-1) to be established at the Yeniseiskiy site within the Nizhnekanskiy rock mass (NKM). It sets forth the key safety conditions that should be provided when a particular EBS material is selected under DDF designs. The study presents estimated sorption retention of non-mobile and migration of mobile long-lived RW-1 radionuclides in the porous solution of clay-based barrier materials. The study showed that under conservative assumptions (with no account taken of radionuclide retardation by bedrocks given their retention provided solely by the EBS) to provide NKM DDF safety, the clay-based barrier thickness should not be less than 1.5–2 m given the barrier material dry density of not less than 1.4 g/cm³ resulted from its saturation. As for the barrier material dry mass, it should not be less than 100–160 tones per single RW-1 package. The degree of conservatism may be decreased along with the growing knowledge on the protective properties of the rock mass and its consideration in further calculations of radionuclide migration.

Keywords: deep RW disposal, radiation safety, underground research laboratory, leaching of RW matrix, system of engineered safety barriers, pore and crack filtration, radionuclide migration, advective and diffusive transport, sorption retention, clay-based material, dry density, radioactive waste.

Acknowledgements

The research has been financially supported by the Russian Ministry of Science and Higher Education.

References

1. Federal'naya tselevaya programma "Obespecheniye yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti na 2008 god i na period do 2015 goda" [Federal Target Program Nuclear and Radiation Safety in 2008 – 2015]. Government Decree of the Russian Federation No. 444 of July 13, 2007 — URL: <http://ftsp-yarb2030.rf/about/archiv/> (accessed on March 25, 2021).

2. Materialy obosnovaniya litsenzii na razmeshcheniye i sooruzheniye ne odnosyashchegosya k yadernym ustanovkam punkta khraneniya RAO, sozdavayemogo v sootvetstvii s proyektnoy dokumentatsiyey na stroitel'stvo ob'yektov okonchatel'noy izolyatsii RAO (Krasnoyarskiy kray, Nizhne-Kanskiy massiv) v sostave podzemnoy issledovatel'skoy laboratorii (vkluyuchaya materialy otsenki vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu) [Siting and Construction License Application for a RW Storage Facility Considered as a Non-Nuclear Facility and Developed in Accordance with the Design Documentation for the Construction of Final RW Disposal Facilities (Krasnoyarsk Territory, Nizhnekanskiy Rock Mass) as Part of an Underground Research Laboratory (Including Environmental Impact

- Assessment)]. — FSUE NO RAO Publ. Moscow, 2015. Vol. 1. 112 p., Vol. 3. 158 p. — URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/> (accessed on March 25, 2021).
3. Kochkin B. T., Mal'kovskiy V. I., Yudinsev S. V. *Nauchnyye osnovy otsenki bezopasnosti geologicheskoy izolyatsii dolgozhivushchikh radioaktivnykh otkhodov (Yeniseyskiy proyekt)* [Scientific Foundations for the Safety Assessment of Long-Lived Radioactive Waste Disposal in Geological Formations (Yeniseiskiy project)]. — Moscow, IREM RAN Publ., 2017. 384 p.
 4. *Otchot po obosnovaniyu bezopasnosti deyatel'nosti po razmeshcheniyu i sooruzheniyu ne otnosyashchegosya k yadernym ustanovkam punkta khraneniya RAO, sozdavayemogo v sootvetstviy s proyektnoy dokumentatsiyey na stroitel'stvo ob'yektov okonchatel'noy izolyatsii RAO (Krasnoyarskiy kray, Nizhne-Kanskiy massiv) v sostave podzemnoy issledovatel'skoy laboratorii* [Safety Analysis Report on the Siting and Construction of an RW SF Considered as a Non-Nuclear Facility and Established According to the Designs Developed for the Construction of Final RW Disposal Facilities (Krasnoyarsk Territory, Nizhnekanskiy Rock Mass) as Part of an Underground Research Laboratory]. — Moscow, FSUE NO RAO Publ., 2015.
 5. Karaulov V. A., Zablotskiy K. A. *Geologicheskoye doizucheniye (otsenoch'naya stadiya) gornogo massiva uchastka "Yeniseyskiy" dlya obosnovaniya rasshireniya intervala zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov do glubin 450—525 metrov (+5 — –70 m BS) ob'yektov okonchatel'noy izolyatsii radioaktivnykh otkhodov (Krasnoyarskiy kray, Nizhne-Kanskiy massiv)* [Additional Geological Studies (Appraisal Phase) of the Rock Mass at the Yeniseiskiy Site Supporting the Decision-Making on the Expansion of the RW Disposal Interval to a Depth of 450—525 m (+5 — –70m BS) for Final Deep RW Disposal Facilities (Krasnoyarsk Territory, Nizhnekanskiy Rock Mass)]. — Krasnoyarsk, JSC Krasnoyarskgeologiya Publ., 2015.
 6. Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision. License No. GN-0.1,0.2-304-3318 of December 27, 2016 — URL: http://www.norao.ru/waste/glossariy/Лицензия_ГН_01_02_304_3318_на_размещение_и_сооружение_пункта_хр.pdf (accessed on March 25, 2021).
 7. *Utverzhdeniye zaklyucheniya gosudarstvennoy ekspertizy materialov Geologicheskogo doizucheniya (otsenoch'naya stadiya) gornogo massiva uchastka Yeniseyskiy dlya obosnovaniya rasshireniya intervala zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov do glubin 450—525 m ob'yektov okonchatel'noy izolyatsii radioaktivnykh otkhodov (Krasnoyarskiy kray, Nizhne-Kanskiy massiv)* [Approved Expert State Review Findings on Additional Geological Studies (Appraisal Phase) of the Rock Mass at the Yeniseiskiy Site Supporting the Decision-Making on the Expansion of the RW Disposal Interval to a Depth of 450—525 m for Final Deep RW Disposal Facilities (Krasnoyarsk Territory, Nizhnekanskiy Rock Mass)]. — Minutes of State Commission on Mineral Reserves, Rosnedra No. 4523-ps of February 3, 2016.
 8. *Optimizatsiya issledovaniy i razrabotka sistemy prinyatiya resheniy po realizatsii strategicheskogo master-plana po otsenke i obosnovaniyu dolgovremennoy bezopasnosti PGZRO dlya zakhoroneniya RAO 1 i 2 klassov v Nizhne-Kanskom massive (uchastok "Yeniseyskiy")* [R&D optimization and development of a decision-making system enabling the implementation of a strategic master plan on the long-term safety assessment and demonstration of a DDF intended for radioactive waste disposal of Class 1 and 2 in the Nizhnekanskiy rock mass (Yeniseiskiy site). — Report on R&D performed under the state contract No. N.4d.241.20.17.1044 of March 29, 2017]. Moscow, IBRAE RAS Publ., 2017.
 9. Dorofeev A. N., Bolshov L. A., Linge I. I., Utkin S. S., Saveleva E. A. *Strategicheskoye doizucheniye v obosnovaniye bezopasnosti sooruzheniya, ekspluatatsii i zakrytiya punkta glubinnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov* [Strategic Master Plan for R&D Demonstrating the Safety of Construction, Operation and Closure of a Deep Geological Disposal Facility for Radioactive Waste]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2017, no. 1, pp. 32—41.
 10. Morozov O. A., Rastorguev A. V., Neuvazhaev G. D. *Otsenka sostoyaniya geologicheskoy sredy uchastka Yeniseyskiy (Krasnoyarskiy kray)* [Assessing the State of the Geological Environment at the Yeniseyskiy Site (Krasnoyarsk Region)]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2019, no. 4 (9), pp. 46—62. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62.
 11. Martynov K. V., Zakharova E. V. *Analiz lokalizatsii i stsenariya evolyutsii PGZRO na uchastke Yeniseyskiy (Krasnoyarskiy kray)* [The Analysis of Localization and the Scenario of Evolution of DGDF for RW at the Yeniseiskiy Site (Krasnoyarsk Region)]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 52—62.
 12. *Comprehensive R&D Program Demonstrating the Long-Term Safety of RW Disposal and Providing Operational Parameter Optimization (Strategic Master Plan for R&D Demonstrating the Safety of DDF RW Construction, Operation and Closure in the Nizhnekanskiy Rock Mass (Krasnoyarsk Territory).* — Moscow, SC Rosatom Publ., 2018.
 13. Kryukov O. V. *Strategiya sozdaniya punkta glubinnogo zakhoroneniya RAO* [Strategy for the development of RW deep disposal facility]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 3 (4), pp. 114—120.
 14. Beygul V. P., Pavlov D. I. *Sravneniye al'ternativnykh skhem zakhoroneniya RAO klassa 1 v sostave*

- PGZRO [Comparison of Alternative Disposal Options for RW Class 1 within a Deep Disposal Facility]. *Atomnaya energiya 2.0 Statiy — Atomic Energy 2.0 Articles*. November 12, 2019. — URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2019/11/12/98998> (accessed on March 25, 2021).
15. Bogatov S. A., Kryuchkov D. V., Pavlov D. I., Sychenko D. V. Analiz razlichnykh kontseptsiy zakhoroneniya RAO klassa 1 v kristallicheskikh porodakh [Analysis of Various Concepts for RW Class 1 Disposal in Crystalline Rocks]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 3 (12), pp. 66–77. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-66-77.
16. Identification of radionuclide migration parameters in safety barrier materials and bedrocks following phosphate glass component leaching under DDFRW conditions. Stage No.2. Maximum concentrations (specific activities) of matrix components and radionuclides during their leaching from phosphate matrices in the presence of bentonite under DDFRW conditions. — R&D Report developed under contract No. 1/16974-D of May 15, 2019. IPChE RAN, 2020. 178 p.
17. Martynov K. V., Zakharova Ye. V. Vyshchelachivaniye chastichno zakristallizovannoy fosfatnoy matritsy RAO v staticheskom rezhime [Leaching of Partially Crystallized RW Phosphate Matrix Under a Static Mode]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Issues of Radiation Safety*, 2020, no. 3, pp. 21–32.
18. Martynov K. V., Zakharova Ye. V. Vyshchelachivaniye matrits s radioaktivnymi otkhodami v usloviyakh zakhoroneniya na primere model'nogo fosfatnogo stekla [Leaching of Radioactive Waste Matrices under Disposal Conditions Based on the Case Study of a Simulated Phosphate Glass]. *Radiokhimiya — Radioactive Chemistry*, 2021, vol. 63, no. 1, pp. 80–92. DOI: 10.31857/S0033831121010123.
19. Martynov K. V., Konevnik Yu. V., Zakharova Ye. V. Bar'yernyye svoystva kristallicheskikh gornyykh porod pri migratsii radionuklidov [Barrier Properties of Crystalline Rocks during Radionuclide Migration]. *Radiokhimiya — Radioactive Chemistry*, 2017, vol. 59, no. 4, pp. 371–378.
20. *Opreделение параметров миграции радионуклидов в материалах барьеров безопасности и вмещающих горных породах после выщелачивания компонентов фосфатного стекла в условиях PGZRO. Этап № 3. Определение эффективных коэффициентов диффузии и коэффициентов сорбционного распределения радионуклидов и их имитаторов после выщелачивания из фосфатного стекла в уплотненных бентонитовых материалах и трещинно-поровых растворах основных горных пород PGZRO* [Identification of radionuclide migration parameters in safety barrier materials and bedrocks following phosphate glass component leaching under DDFRW conditions. Stage No. 3. Evaluation of effective diffusion coefficients
- and sorption distribution coefficients for radionuclides and their imitators following phosphate glass leaching in compacted bentonite materials and fissure-pore solutions of the DDFRW host rocks]. R&D Report developed under contract No. 1/16974-D of May 15, 2019. — Moscow, IPChE RAN, 2020. 189 p.
21. Martynov K. V., Konevnik Yu. V., Zakharova Ye. V. Diffuziya elementov RAO v glinyanykh zashchitnykh bar'yerakh [Diffusion of radioactive waste elements in clay-based safety barriers]. *Trudy Vserossiyskogo yezhegodnogo seminara po eksperimental'noy mineralogii, petrologii i geokhimii* [Proceedings of the All-Russian Annual Workshop on Experimental Mineralogy, Petrology and Geochemistry]. Editor in Chief O. A. Lukanin. — Moscow, GEOKHI RAS Publ., 2020. Pp. 307–310.
22. Martynov K. V., Zharkova V. O., Zakharova Ye. V. Kompresionnyye i fil'tratsionnyye svoystva bar'yernyykh materialov [Compression and filtration properties of barrier materials]. *Gliny i glinistyye mineraly: VI Rossiyskaya Shkola po glinistym mineralam "Agrilla Studium-2019" i IV Rossiyskoye Soveshchaniye po glinam i glinistym mineralam "GLINY-2019"* [Clays and Clay Minerals: VI Russian School on Clay Minerals Agrilla Studium-2019 and IV Russian Meeting on Clays and Clay Minerals CLAYS-2019], Moscow, November 7-15, 2019. Proceedings. — Moscow, IGEM RAS Publ., 2019. Pp. 265–268. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42530322> (accessed on March 25, 2021).
23. Martynov K. V., Zakharova E. V., Dorofeev A. N., Zubkov A. A., Prishchep A. A. Funktsional'nyye svoystva glinistykh materialov dlya zashchitnykh bar'yerov radiatsionno opasnykh ob'yektov [Performance of Clay Materials Constituting to Safety Barriers in Radiation Hazardous Facilities]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 4 (13), pp. 42–57. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-42-57.
24. Zakharova Ye. V., Martynov K. V. Trebovaniya k bar'yernym glinistym materialam dlya zakhoroneniya i konservatsii radiatsionno-opasnykh ob'yektov [Requirements to Barrier Clay Materials Intended for the Entombment and Isolation of Radiation-Hazardous Facilities]. *Gliny i glinistyye mineraly: VI Rossiyskaya Shkola po glinistym mineralam "Agrilla Studium-2019" i IV Rossiyskoye Soveshchaniye po glinam i glinistym mineralam "GLINY-2019"* [Clays and Clay Minerals: VI Russian School on Clay Minerals Agrilla Studium-2019 and IV Russian Meeting on Clays and Clay Minerals CLAYS-2019], Moscow, November 7–15, 2019. Proceedings. — Moscow, IGEM RAN Publ., 2019. Pp. 257–259. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42530314> (accessed on March 25, 2021).
25. Martynov K. V., Zakharova E. V., Dorofeev A. N., Zubkov A. A., Prishchep A. A. Ispol'zovaniye glinistykh

materialov dlya sozdaniya zashchitnykh bar'yerov radiatsionno opasnykh ob"yektov [Use of Clay Materials in the Construction of Protective Barriers at Radiation Hazardous Facilities]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 3 (12), pp. 39–53. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-39-53.

26. Sposob polucheniya bar'yernogo materiala [Method for Barrier Material Fabrication]. Patent No. RU 2730859 C1, Russian Federation / Zakharova Ye. V., Zharkova V. O., Prishchep A. A., Martynov K. V., Kuzov V. A., Izmet'yev A. M.; No. 2019136926; application date: 19.11.2019; publication date: 26.08.2020. 10 p.

27. Shmonov V. M., Vitovtova V. M., Zharikov A. V. *Flyuidnaya pronitsayemost' porod zemnoy kory* [Fluid Permeability in the Rocks of the Earth's Crust]. — Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2002. 216 p.

28. Remizov M. B., Kozlov P. V., Borisenko V. P., Dementeva I. I., Blokhin P. A., Samoylov A. A. Razrabotka algoritma otsenki radionuklidnogo sostava osteklovannykh VAO FGUP "PO "Mayak" dlya tseli ikh bezopasnogo zakhroneniya [Development of an Algorithm Allowing to Estimate the Radionuclide

Composition of Vitrified HLW of FSUE PA Mayak for the Purpose of Their Safe Disposal]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 3 (4), pp. 102–110.

29. Blokhin A. I., Blokhin P. A., Kazieva S. T. Primeneniye raschetnogo koda TRACT dlya otsenok radionuklidnykh sostavov i radiatsionnykh kharakteristik OYAT i RAO klassa 1 [TRACT Computer Code Application in the Assessment of SNF and RW Class 1 Radionuclide Compositions and Radiation Characteristics]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive waste*, 2020, no. 4 (13), pp. 99–111. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-99-111.

30. Bogatov S. A., Blokhin P. A., Kozlov P. V., Remizov M. B. Otsenochnyy raschet aktivnosti nekotorykh dolgozhivushchikh radionuklidov v sostave RAO klassa 1 — osteklovannykh VAO, obrazuyushchikhsya pri pererabotke OYAT reaktorov VVER [Estimated Activity of Some Long-Lived Radionuclides Found in RW Class 1 — Vitrified HLW from SNF Reprocessing from WWER Reactors]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Issues of Radiation Safety*, 2019, no. 2, pp. 39–46.

Information about the authors

Martynov Konstantin Valentinovich, Ph.D., leading researcher, A. N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences (31, bld. 4, Leninsky prospect, Moscow, 119071, Russia), e-mail: mark0s@mail.ru.

Zakharova Elena Vasilievna, Ph.D., head of laboratory, A. N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences (31, bld. 4, Leninsky prospect, Moscow, 119071, Russia), e-mail: zakharova@ipc.rssi.ru.

Kulyukhin Sergey Alekseevich, Doctor of Chemical Sciences, Deputy Director, A. N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences (31, bld. 4, Leninsky prospect, Moscow, 119071, Russia), e-mail: kulyukhin@ipc.rssi.ru.

Bibliographic description

Martynov K. V., Zakharova E. V., Kulyukhin S. A. Alternative Conceptual Designs of Safety Barriers Proposed for Deep RW Class 1 Disposal at the Yeniseiskiy Site in the Nizhnekanskiy Rock Mass. *Radioactive Waste*, 2022, no. 2 (19), pp. 68–84. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-68-84. (In Russian).