

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СКВАЖИННОЙ КОНЦЕПЦИИ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ РАО В РОССИИ

Б. Т. Кочкин<sup>1,2</sup>, С. А. Богатов<sup>2</sup>

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

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

Статья поступила в редакцию 22 апреля 2022 г.

*По результатам анализа российских и зарубежных публикаций, касающихся безопасности хранилищ радиоактивных отходов шахтного и скважинного типов, оценена перспективность скважинной концепции изоляции для некоторых видов отвержденных отходов, образующихся на предприятиях Российской Федерации.*

**Ключевые слова:** радиоактивные отходы, геологическое захоронение, скважинная концепция изоляции.

### Введение

Организации по обращению с отходами и научные учреждения разных стран периодически проводят обзор и анализ осуществимости различных концепций удаления радиоактивных отходов (РАО) и отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в геологическую среду. На сегодня в мировой литературе между собой сравниваются, по крайней мере, три концепции геологической изоляции РАО: шахтные хранилища (ШХ), глубокое скважинное захоронение (ГСЗ/Deep Borehole Disposal) и захоронение в латеральных глубоких скважинах (ЛСЗ/Disposal in Horizontal Drillholes) [1–3]. ГСЗ подчас представляется как социально более приемлемая альтернатива ШХ, консенсус в отношении перспективности которой начал складываться еще в 1960-х годах [4]. Вариант захоронения РАО в неглубоких скважинах — отдельная тема, которая регулируется соответствующими документами, например, МАГАТЭ [5]. Готовится новое издание этого документа с учетом приобретенного опыта и

развития концепций скважинного захоронения. В нем упоминается и концепция ГСЗ, в отношении которого констатируются различные сохраняющиеся неопределенности, например, связанные с неоднородностью горных пород или возможностью характеризовать их на таких больших глубинах [6].

Наиболее продвинутыми в плане реализации являются проекты ШХ, особенно шведский вариант KBS-3 для ОЯТ в кристаллических породах на глубинах 400–1000 м. В ряде стран имеются варианты ШХ в глинах, солях и других породах [7]. США и Великобритания — практически единственные страны с развитой ядерной энергетикой, в которых активно разрабатывается альтернативная концепция захоронения РАО в скважинах в кристаллических породах фундамента на глубине до 5000 м [8, 9]. Концепция удаления долгоживущих РАО в ГСЗ также развивается в Австралии [10] и рассматривается в ряде других стран. В США, кроме того, в самые

## Захоронение РАО

последние годы предложена концепция захоронения РАО в латеральных участках протяженных скважин, пройденных в глинистых породах осадочного чехла, залегающего на глубинах до 600–1500 м [11].

По Федеральному закону № 190-ФЗ радиоактивные отходы делятся на шесть классов в зависимости от активности, происхождения и агрегатного состояния. Концепция их захоронения привязана к классам РАО. Приповерхностное размещение установлено для РАО 3 и 4 классов. Глубокие хранилища шахтного типа предусмотрены для среднеактивных и высокоактивных отходов (САО и ВАО) 1 и 2 классов. Строительство объекта первой очереди для таких РАО намечено на участке «Енисейский» в Красноярском крае [12]. Условно скважинное (закачка в пласты-коллекторы) удаление на территории РФ практикуется только для жидких РАО на глубину до километра и успешно применяется в промышленных масштабах уже с конца 60-х гг. XX века [13, 14]. Цель настоящей статьи — оценить потенциал скважинных систем захоронения для тех твердых (отвержденных) РАО, технология изоляции которых в РФ еще не выбрана (жидкие отходы не обсуждаются).

### Успехи шахтных проектов

Шахтные хранилища долгие годы являются международным стандартом для захоронения ОЯТ и ВАО. ШХ, которые создаются для глубин 400–1000 м, используют хорошо освоенные строительные технологии, дополненные некоторыми инженерными конструкциями.

Прогресс в реализации проектов ШХ определяется принципиальной возможностью доказать их долговременную безопасность в соответствии с определяющими требованиями, закрепленными в международных и национальных нормативных документах, и огромным объемом проведенных исследований, выполненных в этом направлении. Обеспечение безопасности геологических хранилищ шахтного типа основано на использовании нескольких естественных (геологических) и искусственных (инженерных) барьеров в системе захоронения, которые выполняют защитные функции в течение различных периодов времени. Один и тот же барьер может выполнять несколько функций безопасности, а их совокупность должна обеспечить глубокоэшелонированную защиту биосферы с тем, чтобы безопасность не зависела чрезмерно от какого-либо одного из барьеров или от выполнения им какой-либо единственной функции [15, 16].

Классическая схема KBS-3 для ШХ была разработана в Швеции и принята в проектах изоляции ОЯТ и ВАО во многих странах (рис. 1). В этой схеме реализован важнейший принцип обеспечения безопасности хранилищ и защиты среды обитания от радионуклидов, размещаемых в подземном сооружении, — мультибарьерный подход. В этой и других конструкциях ШХ предусматриваются следующие барьеры: матрица с ВАО, металлическая канистра для матрицы, глинистый буфер между канистрой и вмещающей породой, заполнитель и изолирующие «пробки» магистральных тоннелей и других подземных выработок, вмещающая порода и геологическая

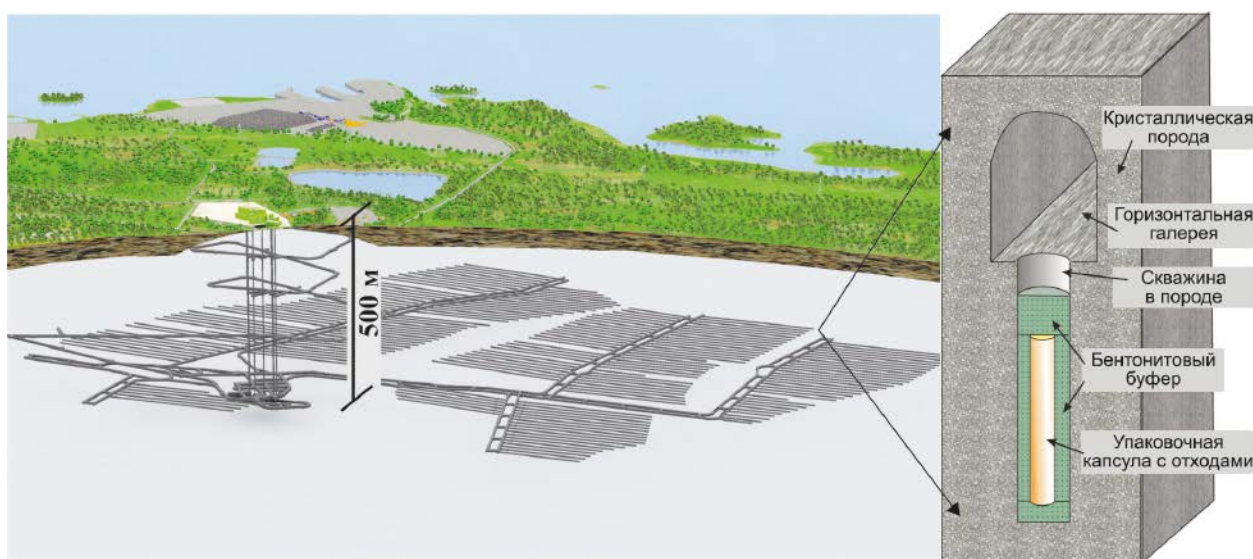


Рис. 1. Концепция KBS-3 по утилизации отработавшего ядерного топлива. Общая схема галерей подземного сооружения (слева), на врезке — схема размещения капсулы с отходами в подземной галерее (из [17, 18] с изменениями)

среда в целом, которые отделяют инженерную систему безопасности (ИББ) от биосферы [17].

Несмотря на высокую степень технической разработки этого типа проектов, их реализация в большинстве случаев до сих пор буксует из-за высоких требований к обоснованию безопасности. Метод KBS-3 разрабатывался шведским оператором РАО (SKB), начиная с середины 70-х гг. XX века. В этой схеме основная нагрузка по защите окружающей среды в долгосрочной перспективе возлагается на систему ИББ (главным образом на герметичный контейнер с медным покрытием). Процесс лицензирования в Швеции (заявка подана в 2011 году) продолжается до настоящего времени. Регулирующие органы страны требуют все новые аргументы в обоснование безопасности. До практической реализации проекта захоронения по этой технологии дошла только Финляндия. В 2015 г. финскому оператору (Posiva Oy) была выдана лицензия, и в 2016 г. началось строительство ШХ для ОЯТ на участке Олкилуото. Заявку на получение лицензии на эксплуатацию планировалось подать в 2021 г. [19].

Развитие Енисейского проекта захоронения РАО в конце 2021 г. находилось на этапе подготовки к строительству подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) на месте будущего ШХ / ПГЗРО [20].

### Концепция изоляции РАО в глубоких скважинах

Скважины глубиной порядка одного километра не являются технической проблемой. Дж. Бисуик [21] предложил классификацию изоляционных скважин по глубине: более 3 км, 1–3 км и менее 1 км как глубокие, средние и мелкие соответственно. Современные дискуссии ведутся о концепции скважинного захоронения РАО на глубине более километра.

Предложение ГСЗ в качестве достойной альтернативы изоляции в ШХ всегда основывалось на геологических предпосылках естественной безопасности захоронения РАО на больших глубинах. Эти преимущества иллюстрирует схема изменения вкладов основных барьеров обеспечения долгосрочной безопасности (матрица отходов, контейнер, уплотнения и вмещающая геологическая среда) в изоляцию радионуклидов в зависимости от глубины захоронения (рис. 2).

При обосновании безопасности концепции сторонники ГСЗ опираются на геологические условия, преобладающие на больших глубинах, которые свидетельствуют о безопасности

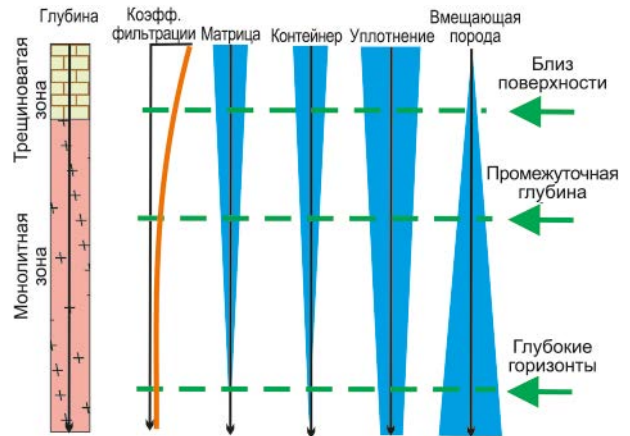


Рис. 2. Изменение вклада основных барьеров обеспечения долгосрочной безопасности ГСЗ (матрица отходов, контейнер, уплотнения и вмещающая порода) в изоляцию радионуклидов в зависимости от глубины захоронения (из [22] с изменениями)

технологии по своей сути. Из результатов бурения таких скважин (например, Кольская сверхглубокая скважина — более 12 км, КТВ Main Hole в Германии — свыше 9 км и другие проекты [23]) известно, что подземные воды, встречающиеся на глубине нескольких километров в континентальных кристаллических породах фундамента, характеризуются длительным временем пребывания, низкой скоростью движения и крайне малой вероятностью разгрузки на дневную поверхность при отсутствии глубоких разломов. Они относятся к флюидам с высокой соленостью и поэтому обладают ограниченным потенциалом вертикального перемещения из-за плотностной стратификации, препятствуют коллоидному переносу радионуклидов. Геохимические восстановительные условия в рассолах, обычных для больших глубин, ограничивают растворимость основных радионуклидов, что усиливает их замедление. Отсюда следует более легкий выбор места для скважины (главное — глубина). Сейсмобезопасность района размещения — основной показатель отсутствия угрозы для общей безопасности системы [24].

Экономические выгоды скважинных технологий определяются несколькими факторами: высокая скорость бурения скважин (в сравнении со строительством шахт), возможность, при благоприятных геологических условиях, размещать объект непосредственно у мест производства и хранения отходов и, соответственно, снизить затраты на транспортировку, слабая чувствительность концепции к составу и тепловыделению отходов, исключение террористических угроз, а также модульная стратегия сооружения дополнительных скважин на разных, в том числе



удаленных друг от друга, участках по мере такой необходимости [24].

Концепция ГСЗ вызывает интерес в связи с общим прогрессом в строительстве скважин и прочими обстоятельствами.

На территории радиохимического предприятия ПО «Маяк», геологические условия которой исключали подземное удаление жидких РАО, с 1970 по 1987 г. выполнялась работа по оценке полигона, приемлемого для сооружения скважинного могильника отвержденных ВАО. В скальных породах фундамента были пробурены несколько исследовательских скважин глубиной от 300 до 1200 м. Это была последняя попытка реализации скважинной технологии для ВАО на российской территории [25].

В 1985 г. идею изоляции актинидов, отвержденных в искусственном минеральном композите SYNROC, в очень глубоких буровых скважинах развил австралийский исследователь А. И. Рингвуд [26].

В 2003 г. англичане Н. Чэпмен и Ф. Гибб начали дискуссию о реалистичности окончательного решения проблемы утилизации ВАО в очень глубоких скважинах [27].

В 2010 г. в США был прекращен проект хранилища в недрах гор Юкка, и идея удаления РАО в глубокие скважины получила в этой стране новое развитие. В 2011 г. сотрудники Сандийской национальной лаборатории предложили Министерству энергетики США (МЭ США) вариант скважинного захоронения [28]. Проект 17-дюймовой (43 см) скважины глубиной до 5 км на сегодняшний день считается эталоном концепции ГСЗ (рис. 3).

Безопасность этой концепции основывается на условиях, ожидаемых в глубоких недрах. По этой причине инженерные барьеры в ней играют вспомогательную роль после закрытия

и изоляции объекта. Проект, разработанный в Сандийской национальной лаборатории [28], не предусматривает никаких требований к матрице отходов. Контейнеры, в которые они упакованы, предназначены для поддержания их целостности только до тех пор, пока скважина не будет герметизирована, что предотвращает только восходящий перенос высвобожденных радионуклидов в течение периода тепловыделения отходов. После этого периода геохимические условия и плотностная стратификация жидкостей восстанавливаются, благодаря чему исчезают архимедовы силы, инициирующие восходящий поток, перемещающий радионуклиды к поверхности.

В 2016 г. МЭ США приняло к реализации демонстрационную программу полевых испытаний глубоких скважин, которая предусматривала бурение двух скважин глубиной 5 км (3,1 мили) в кристаллической породе фундамента в тектонически стабильном регионе. На первом этапе планировалась проходка «характеристической» скважины диаметром на забое 8,5 дюймов (21,6 см). Она предназначалась для проведения комплекса испытаний ее физических свойств, а также научных исследований геологической среды. На втором этапе, в пределах нескольких сотен метров от «характеристической» скважины, следовало пройти «полевую испытательную» скважину диаметром на забое 17 дюймов (43 см). Эксперты по бурению были согласны с тем, что, хотя ни одна скважина диаметром 17 дюймов не была пробурена в кристаллической породе на глубину 5 км, непреодолимых технических препятствий для строительства такой скважины, по-видимому, не существует. Вторая скважина должна была показать перспективность технологии проектных и эксплуатационных работ и обеспечить доказательство безопасности изоляционного сооружения. Размещение РАО на этом этапе не предусматривалось [29]. Демонстрационная программа была прекращена уже в мае 2017 г. из-за изменений в бюджетных приоритетах МЭ США [8].

Успехи в технологии бурения нефтегазовых скважин, проникающих к углеводородным залежам по наклонной, вплоть до горизонтальной, траектории породили проекты удаления ОЯТ и ВАО в латеральные отрезки протяженных скважин. Проект ЛСЗ, подробно обоснованный в работе [11], нацелен на осадочные пласты на глубине около 1,5 км (рис. 4а). Глинистые породы на этой глубине будут, по утверждению авторов, практически непроницаемы. Следует отметить, что в США пробурено огромное количество горизонтальных скважин для гидроразрыва

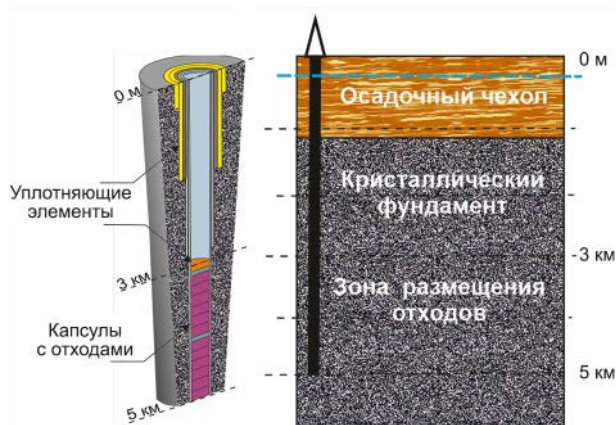


Рис. 3. Обобщенная схема глубокой скважинной утилизации ВАО (из [28] с упрощениями)

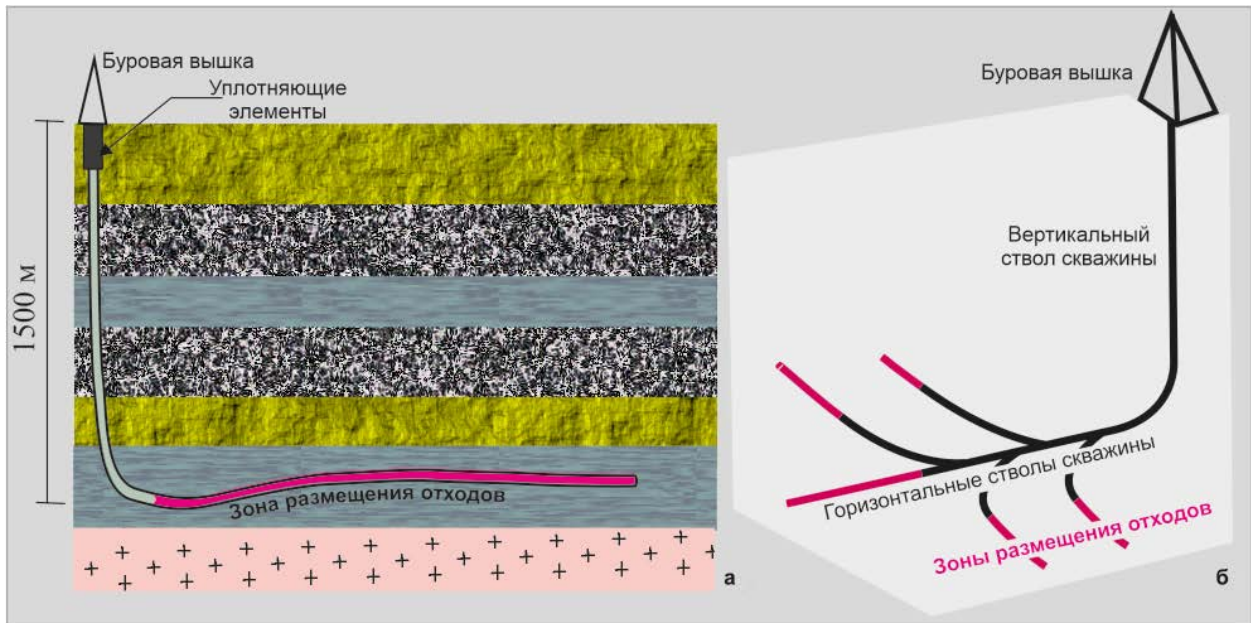


Рис. 4. Схема концепции изоляции ВАО в горизонтальных буровых скважинах (а) с вариантом ветвящихся стволов (б) (из [11, 31] с упрощениями)

глинистого пласта нефтяных и газовых месторождений с использованием метода бокового бурения ствола. В РФ имеются скважины с рекордной горизонтальной протяженностью (более 10 км). В 2017 г. на месторождении Одопту на о. Сахалин пробурена скважина О-5RD, установившая мировой рекорд длины по ее стволу — 15 000 метров [30]. Вертикальная глубина при этом немного превышает 1 км.

Как вариант концепции ЛСЗ предложен проект удаления ВАО или ОЯТ с использованием скважин, ветвящихся на некоторой глубине в горизонтальной плоскости [31]. Вертикальный ствол скважины проходится до глубины вмещающего слоя, на которой от него осуществляется бурение горизонтальных боковых стволов, причем возможно бурение и вторичных боковых стволов — для увеличения общего объема системы удаления отходов (рис. 4б).

Конструктивные решения системы ИББ в концепции ЛСЗ в основном повторяют систему ГСЗ. Герметизация скважины осуществляется цементом, заполняющим кольцевое пространство между стальной обсадной колонной и породой в стенке скважины. Отходы, упакованные в стальную капсулу, располагаются в боковом стволе. Различия связаны с глубиной размещения. Принцип обеспечения безопасности ЛСЗ повторяет принцип ГСЗ с опорой на геологическую среду в том, что стратификация солености, геохимия вод с низким редокс-потенциалом и пробки в скважине должны подавить вынос радионуклидов в биосферу [11].

По определению Дж. Бисуика [21], скважины латерального бурения попадают в классы средних или мелких. Концепция ГСЗ с ее принципами обеспечения безопасности может быть реализована только в действительно глубоких скважинах. С предложением концепции латеральных скважин в проектах скважинного захоронения наметился переход от концепции сверхглубоких скважин в кристаллических породах фундамента к концепции горизонтальных ветвящихся скважин в породах осадочного чехла, согласно которой проекты размещения по геологическим условиям и своей геометрии выработок уже мало отличаются от шахтных хранилищ в пластичных породах [2].

### Проблемы скважинных систем

В дискуссии, развернутой в статье [27], проект «очень глубокой скважинной утилизации РАО» оптимистично представлялся довольно простым решением. В дальнейшем он столкнулся с разного рода проблемами.

На международном техническом семинаре по глубокому скважинному захоронению радиоактивных отходов, проведенном Советом при МЭ США в октябре 2015 года, было показано, что инженерные ограничения концепции ГСЗ относятся прежде всего к диаметру скважины и параметрам уже существующих упаковок РАО. Последние могут превышать современные технические возможности бурения. Относительно «узкие» скважины повышают риск

«застревания» упаковки до достижения целевой глубины.

Вторая проблема связана с характеристикой зоны захоронения. В системе ГСЗ, в отличие от ШХ, невозможен непосредственный доступ персонала к вмещающей породе. Это очевидно затруднит сбор геологической информации, необходимой для достоверной оценки безопасности в соответствии с существующими нормативными документами, потребует разработки адекватной системы сбора и тестирования данных, и процесс характеризации среды может оказаться даже более сложным, чем для ШХ.

Третья проблема относится к политике обращения с РАО и носит стратегический характер. В странах с развитой ядерной энергетикой трудно отказаться от технологии ШХ из-за объема накопленных упаковок. В целом имеющиеся оценки эффективности ГСЗ не указывают на какое-либо заметное улучшение долгосрочной безопасности этой технологии по сравнению с методикой захоронения в ШХ для большинства типов РАО. Их размещение в глубоких скважинах не устраняет необходимости использования шахтного геологического хранилища для основной массы накопленных ВАО или ОЯТ. Именно так считают в МЭ США, которое в качестве потенциальных кандидатов на захоронение по технологии ГСЗ определило лишь несколько специфических типов РАО [29]. В их перечень вошли: капсулы с цезием и стронцием, необработанные кальцинированные ВАО, солевые отходы обработки натриевого топлива и некоторое количество ОЯТ, хранящегося на разных площадках.

Похожие оценки рисков получила технология ГСЗ у специалистов в ряде других стран. Оператор РАО в Великобритании (NIREX) определил, что существуют аспекты концепции ГСЗ, которые требуют тщательной оценки, без которой она остается лишь потенциальной альтернативой ШХ [32]. В последних публикациях сторонников ГСЗ в Великобритании ее внедрение для ВАО, наоборот, предлагается запустить в срочном порядке [9]. Шведские специалисты считают, что в технологии ГСЗ пока «слишком много вопросительных знаков, чтобы сделать концепцию привлекательной для шведских условий». SKB критически относится к проекту ГСЗ, но рассматривает его прежде всего потому, что Закон о ядерной деятельности 1984 г. требует разнообразия исследовательских программ по обращению с ядерными отходами [33]. В Германии начиная с 2013 г. концепция ГСЗ рассматривается как приемлемая альтернатива ШХ из-за поэтапного отказа от атомной энергетики. Объем

ОЯТ позволяет задействовать менее 100 глубоких скважин, например, в соляных толщах [34]. В последние годы сотрудники немецких организаций работают над этим проектом в коллаборации с австралийскими исследователями [35].

Технология ЛСЗ, особенно в варианте ветвящихся стволов на уровне размещения РАО, заметно сближается с технологией ШХ, наследуя преимущества и недостатки всех трех концепций. Особый интерес представляет идея латеральной ветвящейся скважины в горизонтах глинистых осадочных формаций. Один проект ШХ в соляных толщах (WIPP) уже реализован в США [7].

Ветвящаяся сеть боковых скважин по сути аналогична сети горных выработок в ШХ. Это позволит изучить структуру и свойства среды захоронения в объеме, необходимом для достоверной оценки безопасности по существующим (или адаптированным) стандартам. Современные технологии могут обеспечить быструю проходку боковых скважин. Непригодные участки вмещающего горизонта можно сразу исключать из объема размещения. Это даст возможность ускоренного ввода объекта ЛСЗ по сравнению с ШХ. Надежным экраном от вертикальной миграции подземных вод с горизонта размещения послужит чехол из переслаивающихся водонепроницаемых осадочных пород и водоносных горизонтов с высокой соленостью общей мощностью более 500–1000 м. Важным изолирующим фактором является способность глинистых пород к самозалечиванию механических деформаций, которые могут возникнуть после размещения под внешними тектоническими стрессами. Следует признать, что концепция ЛСЗ наследует некоторые технические риски ГСЗ, например, такие как закупорка скважины при перекосе канистры. Операционные риски, возможно, компенсируются быстрой проходкой новых стволов и пластичностью среды размещения.

В горизонтальных скважинах можно утилизировать отходы, не подлежащие извлечению после размещения и пригодные для упаковки в канистры ограниченного диаметра. Согласно ГОСТ 20692-2003, который распространяется на шарошечные долота для сплошного бурения скважин в рыхлых породах, серийно выпускаются долота диаметром 490 и 508 мм. В условиях развитой ядерной энергетики Российской Федерации и при наличии потенциально пригодных осадочных толщ по всей территории, вариант скважинного захоронения ЛСЗ может оказаться перспективным для ряда отходов.



Что касается технологии ГСЗ, то, хотя в настоящее время глубокие скважины рассматриваются лишь для захоронения отработавших радиационных источников и связанных с их кондиционированием небольших количеств САО и НАО [5, 6]<sup>1</sup>, ее перспективы, по мнению авторов, могут быть гораздо шире.

При достаточной изученности горных пород степень локализации радионуклидов на глубинах порядка нескольких километров может быть существенно выше по сравнению с «классическими» пунктами геологического захоронения ОЯТ и ВАО на глубине несколько сот метров (ШХ). Однако платой за лучшую изоляцию РАО является значительно меньшая вместимость ГСЗ и технологические проблемы бурения глубоких скважин достаточно большого диаметра. В связи с этим роль ГСЗ, кроме захоронения отработавших источников ионизирующего излучения, может быть связана с захоронением относительно небольших объемов ВАО, чье размещение в «классических» ПГЗРО по параметрам тепловыделения или долгосрочной радиотоксичности может оказаться проблематичным.

#### РАО в РФ, потенциально пригодные для захоронения в скважинах

Особые проблемы, как известно, связаны с такими категориями РАО, как, например, графит из реакторов или отходы, содержащие радий. Их уровни радиоактивности могут быть относительно низкими, но они могут включать долгоживущие радионуклиды, включая <sup>14</sup>C, <sup>36</sup>Cl и <sup>226</sup>Ra [19]. К сожалению, такой тип отходов, как реакторный графит, объемы которого в РФ оцениваются величиной около 50 тыс. м<sup>3</sup>, разместить в скважинах проблематично, поэтому рассматриваются более простые варианты [36, 37].

Утилизация в скважинах может оказаться решением, соразмерным фактической опасности и объему некоторых видов отходов в странах с развитой ядерной энергетикой. В перспективе перехода РФ к ядерной энергетике на быстрых нейтронах появятся новые типы РАО [38]. Потенциальными кандидатами для скважинной утилизации могут рассматриваться отходы после трансмутации минорных актинидов в короткоживущие радионуклиды [39].

Далее рассматриваются примеры некоторых «проблемных» ВАО, включая содержащие <sup>129</sup>I ВАО и ОЯТ новых топливных циклов, связанных

с высокой глубиной выгорания делящихся элементов.

#### Йод-129

Основным радионуклидом, формирующим в долгосрочной перспективе потенциальные дозовые нагрузки на население при геологическом захоронении ОЯТ и ВАО, является <sup>129</sup>I ( $T_{1/2} = 15,7 \cdot 10^6$  лет, см., например, [40–43]). Данное утверждение справедливо даже для остеклованных высокоактивных отходов (ОВАО), в которых после растворения ОЯТ остается не более нескольких сотых долей исходной активности данного радионуклида [44, 45].

Высокая радиологическая опасность РАО, содержащих <sup>129</sup>I и размещаемых в ПГЗРО, связана с тем, что этот радионуклид практически не сорбируется горными породами. При периоде полураспада <sup>129</sup>I около 16 млн лет характерные времена задержки в несколько тысяч лет, обеспечиваемые ПГЗРО на глубинах 400–500 м в кристаллических породах [40–42] и задержкой порядка миллиона лет в глинистых породах [43], могут оказаться недостаточными.

В Российской Федерации йод, выделяющийся при переработке ОЯТ, улавливается сорбентом на основе оксида алюминия, импрегнированным AgNO<sub>3</sub>, с возможностью регенерации, которая заключается в промывке сорбента гидразин-нитратом в щелочной среде с восстановлением серебра и переходом йода в раствор. Из раствора йод может осаждаться в виде йодидов или йодатов металлов (Pb, Ba, Cu, Na) и включаться в цементную или битумную матрицу. После выработки ресурса адсорбционных колонн <sup>129</sup>I должен храниться непосредственно на сорбенте. Однако при таком хранении, за счет непрочной связи йода, возможен его унос и распространение в биосфере, что требует повышения безопасности хранения или переработки сорбента с удельной активностью по <sup>129</sup>I порядка  $2 \cdot 10^5$  Бк/г [46]. В этой же работе также предложен способ выделения и иммобилизации йода из отработавшего сорбента колонн в прессованном порошке меди, содержащем йодид меди — CuI. Ожидаемая удельная активность компаунда по <sup>129</sup>I составляет около  $2,5 \cdot 10^6$  Бк/г. По принятой в Российской Федерации классификации РАО [47] как отработанный сорбент, так и компаунд относятся к РАО класса 2 и подлежат глубинному захоронению.

Возможно, что технология ГСЗ окажется еще более безопасной для захоронения РАО, содержащих <sup>129</sup>I, по сравнению с имеющимися проектами.

<sup>1</sup> Пока действует версия SSG-1 2009 г. [5].

### *Остеклованные ВАО новых топливных циклов*

В настоящее время ведутся работы по увеличению концентрации радионуклидов в остеклованных ВАО. В [48] приведены ожидаемые радиационные характеристики боросиликатного стекла (БСС), которое формируется при переработке ОЯТ ВВЭР-1000 с глубиной выгорания 50 ГВт·сут/т(U) после выдержки 7 лет. При 20%-м содержании оксидов исходных ВАО от переработки 1 т ОЯТ образуется 100–110 л БСС с энерговыделением чуть меньше 30 кВт/м<sup>3</sup>. Для снижения энерговыделения до 2 кВт/м<sup>3</sup>, допустимого по критериям приемлемости ОВАО [49], должно пройти около 200 лет, что может оказаться неприемлемым для будущих поколений.

Похожая проблема возникает при выборе способа переработки топлива, возвращаемого в Российскую Федерацию по международным договорам. Одной из альтернатив является выделение делящихся элементов, используемых для изготовления нового ядерного топлива, и возврат образующейся при переработке короткоживущей цезиево-стронциевой фракции обратно заказчика для захоронения (см., например, [50]).

Одной из проблем такого решения являются объем и время выдержки возвращаемой цезиево-стронциевой фракции РАО до возможности захоронения в ШХ или приповерхностном ПЗРО. В обоих рассмотренных случаях возникает альтернатива «разбавления» РАО до приемлемого тепловыделения в разумные сроки или обращения с концентрированными ОВАО с очень высоким тепловыделением. В последнем случае вариант ГСЗ может оказаться предпочтительнее.

### *Топливные циклы, связанные с высокой глубиной выгорания делящихся элементов*

Ограниченные ресурсы природного урана приводят к необходимости интенсивного развития технологий, обеспечивающих наработку новых делящихся изотопов из <sup>238</sup>U и <sup>232</sup>Th, что может увеличить сырьевую базу атомной энергетики в сотни раз по сравнению с «классическим» подходом, основанным на извлечении из природного урана изотопа <sup>235</sup>U. Будущее ядерной отрасли России и ее устойчивое развитие в настоящее время ассоциируются с переходом к замкнутому топливному циклу и формированием двухкомпонентной ядерной энергетики [51], которая подразумевает наработку <sup>239</sup>Pu из обедненного или природного <sup>238</sup>U в реакторах на быстрых нейтронах

Дополнением или альтернативой развитию ядерной энергетики на основе быстрых реакторов может служить термоядерный синтез, ориентированный на производство нового топлива.

Данная концепция рассматривалась еще на заре развития атомной энергетики [52] и в настоящее время обрела новые перспективы. Например, в [53] утверждается, что присутствие менее 15 % гибридных термоядерных реакторов может в полном объеме решить топливные проблемы ядерной энергетики.

В гибридных реакторах, где термоядерная установка является источником быстрых нейтронов для делящихся нуклидов в подкритическом blankets, появляется возможность использовать в качестве топлива и нарабатываемые из тория, урана и плутония минорные актиниды (МА)<sup>1</sup> и достигать предельных значений глубины выгорания смешанного топлива, которая ограничивается лишь способностью удержания радионуклидов в матрице. Наиболее стойкой топливной матрицей в настоящее время обладает дисперсное топливо из т. н. TRISO частиц (TRi-structural ISOtropic), в которых топливосодержащее керамическое ядро окружено защитными слоями из пиролитического графита, SiC или ZrC. Частицы диаметром около 1 мм распределены в графитовой матрице [55]. В [56] приводится, что подобное топливо может в достаточной степени удерживать активность, соответствующую делению 95–99 % исходных тяжелых атомов.

При данной глубине выгорания и наработке осколочных нуклидов утилизация подобного ОЯТ нецелесообразна, а захоронение в классических ПЗРО может оказаться неприемлемым как из-за остаточного тепловыделения, так и радиологической опасности.

## Заключение

Концепция скважинного захоронения разных классов РАО рассматривается как альтернатива классическим проектам шахтного типа. В нескольких странах на теоретическом и предпроектном уровнях активно разрабатываются проекты размещения ВАО и САО на глубинах 3–5 км в вертикальных скважинах, вскрывающих кристаллические породы фундамента. Сравнительно недавно предложено использовать для удаления РАО горизонтальные участки изогнутых скважин, вскрывающих осадочные породы на глубинах 1–3 км.

Концепция скважинного захоронения опирается на изоляционные преимущества геологических условий на больших глубинах, но встречает технические и нормативно-правовые препятствия.

<sup>1</sup> В подкритических blankets снимаются проблемы управления реактивностью, связанные с меньшими долями запаздывающих нейтронов в <sup>239</sup>Pu и МА по сравнению с <sup>235,238</sup>U [55].



Ей может отдаваться предпочтение для решения проблем изоляции некоторых специфических типов РАО. В РФ такими могли бы стать отходы, содержащие йод-129, а в перспективе — ОВАО новых топливных циклов, включая отходы реакторов на быстрых нейтронах и гибридных установок.

В любом случае потребуется преодоление ограничений, которые накладывают параметры ствола скважины, совершенствование методов дистанционного изучения структур горных пород, а также технологические возможности кондиционирования РАО и подготовки матриц и упаковок, пригодных для утилизации в скважинах.

### Благодарности

Работа выполнена при частичном финансировании ИГЕМ РАН Министерством образования и науки РФ (грант № 13.1902.21.0018).

### Литература

1. Krall L., McCartin T., Macfarlane A. Siting Deep Boreholes for Disposal of Radioactive Waste: Consequences for Tight Coupling between Natural and Engineered Systems // *Environ. Sci. Technol.* 2020. Vol. 54. No. 2. Pp. 629–646. DOI: 10.1021/acs.est.9b03440.
2. Kochkin B., Malkovsky V., Yudinsev S., Petrov V., Ojovan M. Problems and perspectives of borehole disposal of radioactive waste // *Prog. Nucl. Energy.* 2021. Vol. 139. Pp. 103867. DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103867.
3. Finsterle S., Muller R. A., Grimsich J., Bates E. A., Midgley J. Post-Closure Safety Analysis of Nuclear Waste Disposal in Deep Vertical Boreholes // *Energies.* 2021. Vol. 14. P. 6356. DOI: 10.3390/en14196356.
4. Cotton M. Deep borehole disposal of nuclear waste: trust, cost and social acceptability // *Journal of Risk Research.* 2021. DOI: 10.1080/13669877.2021.1957988.
5. Международное агентство по атомной энергии. Скважинные объекты захоронения радиоактивных отходов. Серия норм МАГАТЭ по безопасности № SSG-1. МАГАТЭ, Вена, 2009.
6. Borehole Disposal Facilities for Radioactive Waste. Draft IAEA safety guide DS512, Step 8, 8 September 2021. 113 p. — URL: [https://www.iaea.org/sites/default/files/21/09/draft\\_ds512.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/21/09/draft_ds512.pdf) (дата обращения: 04.04.2022).
7. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО / Под ред. И. И. Линге, Ю. Д. Полякова. — М. : Комтехпринт, 2015. 208 с.
8. Freeze G., Sassani D., Brady P. V., Hardin E., Mallants D. The Need for a Borehole Disposal Field Test for Operations and Emplacement — 21220 // WM2021 Conference, March 8–12, 2021, Phoenix, Arizona, USA. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/354234538> (дата обращения 04.04.2022).
9. Gibb F. G. F., Beswick A. J. A deep borehole disposal solution for the UK's high-level radioactive waste // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Energy*, 2021. DOI: 10.1680/jener.21.00015.
10. Mallants D., Piane C. D., Dewhurst D. et al. A framework for streamlining RD&D activities for deep borehole disposal — 22117 // WM2022 Conference, March 6–10, 2022, Phoenix, Arizona, USA. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/358914255> (дата обращения 04.04.2022).
11. Muller R. A., Finsterle S., Grimsich, J. et al. Disposal of High-Level Nuclear Waste in Deep Horizontal Drillholes // *Energies.* 2019. Vol. 12. Iss. 11. P. 2052. DOI: 10.3390/en12112052.
12. Бейгул В. П., Красильников В. Я. Определены основные этапы создания пункта глубинного захоронения РАО в Нижнеканском массиве. — URL: <http://фцп-ярб2030.рф/society/news/11.12.2018> (дата обращения 11.12.2018).
13. Рыбальченко А. И., Пименов М. К., Костин П. П. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. — М. : ИздАТ, 1994. 256 с.
14. Рыбальченко А. И., Курочкин В. М., Ершов Б. Г., Захарова Е. В., Косарева И. М., Зубков А. А. 50 лет глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов — практические и научные результаты // *Геоэкология.* 2014. № 1. С. 86–90.
15. МАГАТЭ. Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности, № SSR-5. Вена, МАГАТЭ, 2011. 104 с.
16. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности. НП-055-14 // *Ядерная и радиационная безопасность.* 2015. № 4 (78). С. 59–87.
17. Hedin A., Olsson O. Crystalline Rock as a Repository for Swedish Spent Nuclear Fuel // *Elements.* 2016. Vol. 12. No. 4. Pp. 247–252.
18. Сайт posiva.fi. — URL: [http://www.posiva.fi/en/media/image\\_gallery](http://www.posiva.fi/en/media/image_gallery) (дата обращения 09.02.2016).
19. Status and trends in spent fuel and radioactive waste management. IAEA Nuclear Energy Series No. NW T 1.14 (Rev. 1). Vienna, IAEA, 2022.
20. Абрамов А. А., Большов Л. А., Дорофеев А. Н., Игин И. М., Казаков К. С., Красильников В. Я., Линге И. И., Торхов Н. Н., Уткин С. С. Подземная исследовательская лаборатория в Нижнеканском массиве: эволюционная проработка облика // *Радиоактивные отходы.* 2020. № 1 (10). С. 9–21. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-9-21.

21. *Beswick J.* Status of technology for deep borehole disposal: Report for the UK Nuclear Decommissioning Authority, Harwell, UK, April 2008. — URL: [http://www.mkg.se/uploads/DB/NDA\\_Status\\_of\\_Technology\\_for\\_Deep\\_Borehole\\_Disposal\\_April\\_2008.pdf](http://www.mkg.se/uploads/DB/NDA_Status_of_Technology_for_Deep_Borehole_Disposal_April_2008.pdf) (дата обращения 01.04.2012).
22. *Mallants D., Beiraghdar Y.* Radionuclide transport and deep borehole disposal: preliminary safety assessments — 21202 // WM2021 Conference, March 7—11, 2021, Phoenix, Arizona, USA.
23. *Chur C.* Experience in Deep Drilling in Crystalline Rocks: Presentation at the NWTRB Workshop. Washington DC, October, 2015.
24. *Gibb F. G. F.* An international perspective on deep borehole disposal: Presentation at the NWTRB Workshop. Washington DC, October, 2015.
25. *Прозоров Л. Б., Лобанов Н. Ф., Баринов А. С.* Перспективы использования хранилищ с вертикальным размещением РАО // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2012. № 3. С. 121—135.
26. *Ringwood A.* Disposal of high-level nuclear wastes: A geological perspective // Mineralogical Magazine. 1985. Vol. 49 (351). Pp. 159—176. DOI: 10.1180/minmag.1985.049.351.04.
27. *Chapman N., Gibb F. G. F.* A Truly Final Waste Management Solution — Is Very Deep Borehole Disposal a Realistic Option for HLW or Fissile Material? // Radwaste Solutions. 2003. No. 10. Pp. 26—35.
28. *Arnold B. W., Brady P. V., Bauer S. J., Pye S., Herrick C., Finger J.* Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste // SAND2011-6749 Unlimited Release Printed October 2011. DOI: 10.2172/1029790.
29. U. S. NWTRB. Technical Evaluation of the U.S. Department of Energy Deep Borehole Disposal Research and Development Program : A Report to the U. S. Congress and the Secretary of Energy. January 2016. 72 p.
30. Сайт: [rosneft.ru](http://rosneft.ru) — URL: <https://www.rosneft.ru/press/news/item/188675/> (дата обращения 04.04.2022).
31. *Crichlow H.* Improved disposal of intact spent nuclear fuel assemblies in ultra deep geological formations in lateral wellbores. November 2018. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/330370012> (дата обращения 14.04.2021).
32. *Beswick A. J., Gibb F. G. F., Travis K. P.* Deep borehole disposal of nuclear waste: engineering challenges // In Proceedings of the ICE-Energy; ICE Publishing: London, UK, 2014. Vol. 167. Pp. 47—66. DOI:10.1680/ENER.13.00016.
33. *Grundfelt B.* Long-Term Safety of Deep Borehole Disposal in Comparison with Disposal in a Mined Facility : Presentation at the NWTRB Workshop. Washington DC, October, 2015.
34. *Bracke G., Charlier F., Liebscher A., Schilling F. R., Röckel T.* About the Possibility of Disposal of HLRW in Deep Boreholes in Germany // Geosciences. 2017. Vol. 7. No. 3. P. 58. DOI: 10.3390/geosciences7030058.
35. *Fischer T., Engelhardt H.-J., Mallants D.* Methodology for Designing Deep Boreholes for Disposal of Radioactive Waste // WM2022 Conference, March 6—10, 2022, Phoenix, Arizona, USA. <https://www.researchgate.net/publication/359023585>.
36. *Дорофеев А. Н., Комаров Е. А., Захарова Е. В., Волкова А. Г., Линге И. И., Иванов А. Ю., Уткин С. С., Павлюк А. О., Котляревский С. Г.* К вопросу захоронения реакторного графита // Радиоактивные отходы. 2019. № 2 (7). С. 18—30. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-18-30.
37. *Волков В. Г., Сафронова Н. Н., Морозов Ф. Т., Комаров Е. А., Зимин В. К., Былкин Б. К., Зверков Ю. А., Павлюк А. О., Котляревский С. Г., Кан Р. И.* О проблеме заключительного этапа обращения с облученным графитом блоков АЭС с водографитовыми реакторами // Радиоактивные отходы. 2021. № 2 (15). С. 10—20. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-10-20.
38. *Адамов Е. О., Лопаткин А. В., Муравьев Е. В., Рачков В. И., Хомяков Ю. С.* Национальная стратегия развития ядерной энергетики: два подхода к новой технологической платформе ядерной энергетики // Известия РАН. Энергетика. 2019. № 1. С. 3—14. DOI: 10.1134/S0002331019010035.
39. *Жеребцов А. А., Варлаков А. П., Германов А. В., Шаров Д. А., Ельцин В. Ф., Чураков А. К., Скакун Г. Е.* Подходы к характеристике РАО, образующихся при реализации проекта «ПРОРЫВ» // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 88—94.
40. Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto — Assessment of Radionuclide Release Scenarios for the Repository System 2012. — Posiva Oy Report POSIVA 2012-09, December 2012. 443 p.
41. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. — Main report of the SR-Site project, SKB Technical Report TR-11-01, March 2011.
42. Geological Disposal. Generic Post-closure Safety Assessment. — NDA Report no. NDA/RWMD/030, December 2010. 169 p.
43. Dossier Argile. Tome Phenomenological evolution of a geological repository. — ANDRA Report, December 2005. 527 p.
44. 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. I–IV. — Москва, ФГУП «НО РАО», 2015. — URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/> (дата обращения 01.10.2018).
45. Богатов С. А., Блохин П. А., Козлов П. В., Ремизов М. Б. Оценочный расчёт 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.
46. Истомин И. А. Разработка и внедрение технологии обращения с йодом-129 в процессе переработки облученного ядерного топлива энергетических реакторов: дисс. канд. физ.-мат. наук. — Озерск, 2002. 100 с.
47. Постановление Правительства от 19.10.2012 № 1069 (в редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 04.02.2015 № 95) «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов».
48. Алой А. С., Блохин А. И., Блохин П. А., Ковалев Н. В. Радиационные характеристики боросиликатного стекла, содержащего высокоактивные отходы // Радиоактивные отходы. 2020. № 3 (12). С. 93–100. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-93-100.
49. НП-093-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения».
50. Стратегия обращения с отработавшим ядерным топливом Белорусской атомной электростанции. — URL: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/blr196008.pdf> (дата обращения 13.04.2022).
51. Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. Основные положения. — М. : Минатом России, 2000. 26 с.
52. Курчатов И. В. О возможности создания магнитных термоядерных реакторов. / В кн.: Собрание научных трудов. Т. 5. — М. : Наука, 2012. С. 78–81.
53. Ильгисонис В. И., Ильин К. И., Новиков С. Г., Оленин Ю. А. О программе российских исследований в области управляемого термоядерного синтеза и плазменных технологий // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11. С. 963–969. DOI: 10.31857/S0367292121110172.
54. Селезнев Е. Ф. Кинетика реакторов на быстрых нейтронах / Под ред. акад. РАН А. А. Саркисова; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. — М. : Наука, 2013. 239 с.
55. Kugeler K., Nabielek H., Buckthorpe D. Editors: Scheuermann W., Haneklaus N., Fütterer M. The High Temperature Gas-cooled Reactor Safety considerations of the (V)HTR-Modul. — European Commission, 2017. 264 p. doi:10.2760/270321
56. Farmer J. C. LIFE Materials: Overview of Fuels and Structural Materials Issues. Volume 1. LLNL-TR-407386 – Rev. 1, October 2008. 171 p.

---

## Информация об авторах

Кочкин Борис Тимофеевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35). Старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: btk@igem.ru.

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

## Библиографическое описание статьи

Кочкин Б. Т., Богатов С. А. Перспективы использования скважинной концепции для удаления РАО в России // Радиоактивные отходы. 2022. № 2 (19). С. 85–99. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-85-99.



## BOREHOLE RW DISPOSAL CONCEPT AND PROSPECTS OF ITS IMPLEMENTATION IN RUSSIA

Kochkin B. T.<sup>1,2</sup>, Bogatov S. A.<sup>2</sup>

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

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

Article received on April 22, 2022

*The paper evaluates the prospects of borehole disposal considering a number of solidified RW types generated at Russian enterprises, which was done based on analyzed world literature sources discussing the safety of radioactive waste storage facilities of mine and borehole types.*

**Keywords:** radioactive waste, geological disposal, borehole disposal concept.

### Acknowledgments

This study was implemented with partial IGEM RAS sponsorship from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (grant no. 13.1902.21.0018).

### References

1. Krall L., McCartin T., Macfarlane A. Siting Deep Boreholes for Disposal of Radioactive Waste: Consequences for Tight Coupling between Natural and Engineered Systems. *Environ. Sci. Technol.*, 2020, vol. 54, no. 2, pp. 629–646. DOI: 10.1021/acs.est.9b03440.
2. Kochkin B., Malkovsky V., Yudinsev S., Petrov V., Ojovan, M. Problems and perspectives of borehole disposal of radioactive waste. *Prog. Nucl. Energy*, 2021, vol. 139, pp. 103867. DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103867.
3. Finsterle S., Muller R. A., Grimsich J., Bates E. A., Midgley J. Post-Closure Safety Analysis of Nuclear Waste Disposal in Deep Vertical Boreholes. *Energies*, 2021, vol. 14, p. 6356. DOI: 10.3390/en14196356.
4. Cotton M. Deep borehole disposal of nuclear waste: trust, cost and social acceptability. *Journal of Risk Research*, 2021. DOI: 10.1080/13669877.2021.1957988.
5. IAEA. Borehole Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety Guide, IAEA Safety № SSG-1. IAEA, Vienna, 2009.
6. *Borehole Disposal Facilities for Radioactive Waste*. Draft IAEA safety guide DS512, Step 8, 8 September 2021. 113 p. — URL: [https://www.iaea.org/sites/default/files/21/09/draft\\_ds512.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/21/09/draft_ds512.pdf) (accessed on 04.04.2022).
7. *Obzor zarubezhnykh praktik zakhroneniya OYAT i RAO* [Overview of International SNF and RW Disposal Practices] / Edt. by I. I. Linge and Yu. D. Polyakov. Moscow, Komtekhpriint Publ., 2015. 208 p.
8. Freeze G., Sassani D., Brady P. V., Hardin E., Mallants D. The Need for a Borehole Disposal Field Test for Operations and Emplacement — 21220. *WM2021 Conference*, March 8–12, 2021, Phoenix, Arizona, USA. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/354234538> (accessed on 04.04.2022).
9. Gibb F. G. F., Beswick A. J. A deep borehole disposal solution for the UK's high-level radioactive waste. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Energy*, 2021. DOI: 10.1680/jener.21.00015.
10. Mallants D., Piane C. D., Dewhurst D. et al. A framework for streamlining RD&D activities for deep borehole disposal — 22117. *WM2022 Conference*, March 6–10, 2022, Phoenix, Arizona, USA. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/358914255> (accessed on 04.04.2022).
11. Muller R. A., Finsterle S., Grimsich, J. et al. Disposal of High-Level Nuclear Waste in Deep Horizontal Drillholes. *Energies*, 2019, vol. 12, iss. 11, p. 2052. DOI: 10.3390/en12112052.
12. Beigul V. P., Krasilnikov V. Ya. *Opredeleny osnovnyye etapy sozdaniya punkta glubinnogo zakhroneniya RAO v Nizhnekanskom massive* [The Main Stages in the Development of a Deep Disposal Facility for Radioactive Waste in the Nizhnekanskiy Massif Have Been Specified]. — URL: <http://фцпрб2030.рф/society/news/> (accessed on 11.12.2018).
13. Rybalchenko A. I., Pimenov M. K., Kostin P. P. et al. *Glubinnoye zakhroneniye zhidkikh radioaktivnykh otkhodov* [Deep Disposal of Liquid Radioactive Waste]. Moscow, IzdAT Publ., 1994. 256 p.
14. Rybalchenko A. I., Kurochkin V. M., Ershov B. G., Zakharova E. V., Kosareva I. M., Zubkov A. A. *50 let glubinnogo zakhroneniya zhidkikh radioaktivnykh otkhodov — prakticheskiye i nauchnyye rezul'taty* [50 Years of Deep Liquid Radioactive Waste Disposal — Practical and Scientific Results]. *Geoekologiya — Geoecology*, 2014, no. 1, p. 86–90.

15. IAEA, Disposal of Radioactive Waste. *Specific Safety Requirements, SSR-5*. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2011. 104 p.
16. Zakhoronenie radioaktivnykh otkhodov. Printsipy, kriterii i osnovnye trebovaniya bezopasnosti. NP-055-14 [Disposal of Radioactive Waste. Principles, Criteria and Basic Safety Requirements. NP-055-14]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' — Nuclear and Radiation Safety*, 2015, no. 4 (78), pp. 59–87.
17. Hedin A., Olsson O. Crystalline Rock as a Repository for Swedish Spent Nuclear Fuel. *Elements*, 2016, vol. 12, no. 4, pp. 247–252.
18. *Web-site of posiva.fi*. — URL: [http://www.posiva.fi/en/media/image\\_gallery](http://www.posiva.fi/en/media/image_gallery) (accessed on 09.02.2016).
19. Status and trends in spent fuel and radioactive waste management. *IAEA Nuclear Energy Series No. NW T 1.14 (Rev. 1)*. Vienna, IAEA, 2022.
20. Abramov A. A., Bolshov L. A., Dorofeev A. N., Igin I. M., Kazakov K. S., Krasilnikov V. Y., Linge I. I., Trokhov N. N., Utkin S. S. Podzemnaya issledovatel'skaya laboratoriya v Nizhnekanskom massive: evolyutsionnaya prarabotka oblika [Underground Research Laboratory in the Nizhnekanskiy Massif: Evolutionary Design Study]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 1 (10), pp. 9–21. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-9-21.
21. Beswick J. *Status of technology for deep borehole disposal*, Report for the UK Nuclear Decommissioning Authority, Harwell, UK, April 2008. — URL: [http://www.mkg.se/uploads/DB/NDA\\_Status\\_of\\_Technology\\_for\\_Deep\\_Borehole\\_Disposal\\_April\\_2008.pdf](http://www.mkg.se/uploads/DB/NDA_Status_of_Technology_for_Deep_Borehole_Disposal_April_2008.pdf) (accessed on 01.04.2012).
22. Mallants D., Beiraghdar Y. Radionuclide transport and deep borehole disposal: preliminary safety assessments — 21202. *WM2021 Conference*, March 7–11, 2021, Phoenix, Arizona, USA.
23. Chur C. *Experience in Deep Drilling in Crystalline Rocks*. Presentation at the NWTRB Workshop. Washington DC, October, 2015.
24. Gibb F. G. F. *An international perspective on deep borehole disposal*. Presentation at the NWTRB Workshop. Washington DC, October, 2015.
25. Prozorov L. B., Lobanov N. F., Barinov A. S. Perspektivy ispol'zovaniya khranilishch s vertikal'nym razmeshcheniyem RAO [Prospects of Vertical Layouts for Radioactive Waste Disposal]. *Bezopasnost' yadernykh tekhnologiy i okruzhayushchey sredy — Safety of Nuclear Technologies and the Environment*, 2012, no. 3, pp. 121–135.
26. Ringwood A. Disposal of high-level nuclear wastes: A geological perspective. *Mineralogical Magazine*, 1985, vol. 49 (351), pp. 159–176. DOI:10.1180/minmag.1985.049.351.04.
27. Chapman N., Gibb F. G. F. A Truly Final Waste Management Solution — Is Very Deep Borehole Disposal a Realistic Option for HLW or Fissile Material? *Radwaste Solutions*, 2003, no. 10, pp. 26–35.
28. Arnold B. W., Brady P. V., Bauer S. J., Pye S., Herrick C., Finger J. Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. *SAND2011-6749*. Unlimited Release Printed October 2011. DOI: 10.2172/1029790.
29. U. S. NWTRB. *Technical Evaluation of the U.S. Department of Energy Deep Borehole Disposal Research and Development Program*. A Report to the U. S. Congress and the Secretary of Energy. January 2016. 72 p.
30. *Web-site of rosnetft.ru* — URL: <https://www.rosneft.ru/press/news/item/188675/> (accessed on 04.04.2022).
31. Crichlow H. *Improved disposal of intact spent nuclear fuel assemblies in ultra deep geological formations in lateral wellbores*. November 2018. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/330370012> (accessed on 14.04.2021).
32. Beswick A. J., Gibb F. G. F., Travis K. P. Deep borehole disposal of nuclear waste: engineering challenges. In *Proceedings of the ICE—Energy*; ICE Publishing: London, UK, 2014, vol. 167, pp. 47–66. DOI:10.1680/ENER.13.00016.
33. Grundfelt B. *Long-Term Safety of Deep Borehole Disposal in Comparison with Disposal in a Mined Facility*. Presentation at the NWTRB Workshop. Washington DC, October, 2015.
34. Bracke G., Charlier F., Liebscher A., Schilling F. R., Röckel T. About the Possibility of Disposal of HLRW in Deep Boreholes in Germany. *Geosciences*, 2017, vol. 7, no. 3, p. 58. DOI: 10.3390/geosciences7030058.
35. Fischer T., Engelhardt H.-J., Mallants D. Methodology for Designing Deep Boreholes for Disposal of Radioactive Waste. *WM2022 Conference*, March 6–10, 2022, Phoenix, Arizona, USA. <https://www.researchgate.net/publication/359023585>.
36. Dorofeev A. N., Komarov E. A., Zakharova E. V., Volkova A. G., Linge I. I., Utkin S. S., Ivanov A. Yu., Pavliuk A. O., Kotlyarevskij S. G. K vo-prosu zakhoroneniya reaktornogo grafitu [On Reactor Graphite Disposal]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2019, no. 2 (7), pp. 18–30. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-18-30.
37. Volkov V. G., Safronova N. N., Morozov F. T., Komarov E. A., Zimin V. K., Bylkin B. K., Zverkov Yu. A., Pavlyuk A. O., Kotlyarevskiy S. G., Kan R. I. O probleme zaklyuchitel'nogo etapa obrashcheniya s obluchennym grafitom blokov AES s vodografitovymi reaktoramami [On the Challenge Associated with the Final Stage of Irradiated Graphite Management from Water-Graphite NPP Reactor Units]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2021, no. 2 (15), pp. 10–20. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-10-20.

38. Adamov Ye. O., Lopatkin A. V., Murav'yev Ye. V., Rachkov V. I., Khomyakov Yu. S. Natsional'naya strategiya razvitiya yadernoy energetiki: dva podkhoda k novoy tekhnologicheskoy platforme yadernoy energetiki [National Strategy for the Development of Nuclear Energy: Two Approaches to the New Technological Platform for Nuclear Power]. *Izvestiya RAN. Energetika — RAS News. Energy*, 2019, no. 1, pp. 3–14. DOI: 10.1134/S0002331019010035.
39. Zherebtsov A. A., Varlakov A. P., Germanov A. V., Sharov D. A., Eltsin V.F., Churakov A. K., Skakun G. E. Podkhody k kharakterizatsii RAO, obrazuyushchikhsya pri realizatsii proyekta “PRORYV” [Approaches to the Characterization of RW Generated During Implementation of the Project PRORYV]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 88–94.
40. *Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto — Assessment of Radionuclide Release Scenarios for the Repository System 2012*. Posiva Oy Report POSIVA 2012-09, December 2012. 443 p.
41. *Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project*, SKB Technical Report TR-11-01, March 2011.
42. *Geological Disposal. Generic Post-closure Safety Assessment*. NDA Report no. NDA/RWMD/030, December 2010. 169 p.
43. *Dossier Argile. Tome Phenomenological evolution of a geological repository*. ANDRA Report, December 2005. 527 p.
44. *Materialy obosnovaniya litsenzii na razmeshchenie i sooruzhenie ne odnosyashchegosya k yadernym ustanovkam punkta khraneniya RAO, sozdavaemogo v sootvetstvii s proektnoi dokumentatsiei na stroitel'stvo ob'ektov okonchatel'noi izolyatsii RAO (Krasnoyarskii krai, Nizhne-Kanskii massiv) v sostave podzemnoi issledovatel'skoi laboratorii (vkluyuchaya materialy otsenki vozdeistviya na okruzhayushchuyu sredu)* [Materials of a siting and construction license application for a RW storage facility not considered a nuclear facility developed in accordance with design documentation for final RW disposal facilities construction (including EIA materials)]. Vol. I–IV. Moscow, FSUE NO RAO Publ., 2015. — URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/> (accessed on October 1, 2018).
45. 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 Calculation Focused on the Activity of Some Long-lived Radionuclides Contained in RW Class 1 — Vitrified HLW from the Reprocessing of SNF from VVER Reactors]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Issues of Radiation Safety*, 2019, no. 2, pp. 39–46.
46. Istomin I. A. *Razrabotka i vnedreniye tekhnologii obrashcheniya s yodom-129 v protsesse pererabotki obluchennogo yadernogo topliva energeticheskikh reaktorov* [Development and Implementation of a Method for Iodine-129 Management During the Reprocessing of Irradiated Nuclear Fuel from Power Reactors] : diss.... cand. phys.-math. sciences. Ozersk, 2002. 100 p.
47. *Government Decree No. 1069 of October 19, 2012 (as amended by Decree No. 95 of the Government of the Russian Federation of February 4, 2015) On the Criteria Used to Categorize Solid, Liquid and Gaseous Waste as Radioactive Waste, the Criteria Used to Categorize Radioactive Waste as Non-removable Radioactive Waste and Removable Radioactive Waste and Classification Criteria for Removable Radioactive Waste*.
48. Aloy A. S., Blokhin A. I., Blokhin P. A., Koval'ev N. V. Radiatsionnyye kharakteristiki borosilikatnogo stekla, soderzhashchego vysokoaktivnyye otkhody [Radiation Characteristics of Borosilicate Glass Containing High-Level Waste]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no.3 (12), pp. 93–100. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-93-100.
49. NP-093-14. *Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii “Kriterii priemlemosti radioaktivnykh otkhodov dlya zakhoroneniya”* [Federal Norms and Rules in the Field of Atomic Energy Use. Radioactive Waste Acceptance Criteria for Disposal].
50. *Strategiya obrashcheniya s otrabotavshim yadernym toplivom Belorusskoi atomnoi ehlektrostantsii* [Spent Nuclear Fuel Management Strategy of the Belarusian Nuclear Power Plant]. — URL: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/blr196008.pdf> (accessed on 13.04.2022).
51. *Strategiya razvitiya atomnoi ehnergetiki Rossii v pervoi polovine XXI veka. Osnovnye polozheniya* [Strategy for Nuclear Power Development in Russia in the First Half of the XXI Century. Basic Provisions]. Moscow, Minatom of Russia Publ., 2000. 26 p.
52. Kurchatov I. V. *O vozmozhnosti sozdaniya magnitnykh termoyadernykh reaktorov* [On the Potential Development of Magnetic Thermonuclear Reactors]. In the book: *Collection of scientific papers*. Vol. 5. Moscow, Nauka Publ., 2012. Pp. 78–81.
53. Ilgisonis V. I., Ilyin K. I., Novikov S. G., Olenin Yu. A. *O programme Rossiyskikh issledovaniy v oblasti upravlyayemogo termoyadernogo sinteza i plazmennyykh tekhnologiy* [About the Program of Russian Research in the Field of Controlled Thermonuclear Fusion and Plasma Technologies]. *Fizika plazmy — Plasma Physics*, 2021, vol. 47, no. 11, pp. 963–969. DOI: 10.31857/S0367292121110172.



54. Seleznev E. F. *Kinetika reaktorov na bystrykh neytronakh* [Kinetics of Fast Neutron Reactors]. Ed. A. A. Sarkisov; Nuclear Safety Institute, Russian Academy of Sciences. — Moscow, Nauka Publ., 2013. 239 p.
55. Kugeler K., Nabielek H., Buckthorpe D. Editors: Scheuermann W., Haneklaus N., Fütterer M. *The High Temperature Gas-cooled Reactor Safety considerations of the (V)HTR-Modul*. European Commission, 2017. 264 p. DOI: 10.2760/270321.
56. Farmer J. C. *LIFE Materials: Overview of Fuels and Structural Materials Issues*. Vol. 1. LLNL-TR-407386 – Rev. 1, October 2008. 171 p.
- 

### Information about the authors

*Kochkin Boris Timofeevich*, Dr. of Science, Principal scientist, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetnyi lane, Moscow, 119017, Russia), Senior scientist, Nuclear Safety Institute of RAS (52, Bolshaya Tulkaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: btk@igem.ru.

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

### Bibliographic description

Kochkin B. T., Bogatov S. A. Borehole RW Disposal Concept and Prospects of its Implementation in Russia. *Radioactive Waste*, 2022, no. 2 (19), pp. 85–99. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-85-99. (In Russian).