

АНАЛИЗ МЕЖДУНАРОДНОГО ОПЫТА ТЕХНОЛОГИЙ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТОВ ПОДЗЕМНОЙ ИЗОЛЯЦИИ РАО

С. А. Дерябин¹, С. С. Уткин², Е. В. Шевцова¹, К. С. Казаков², Е. В. Кузьмин¹,
А. С. Барин², А. В. Дёмин², В. С. Свительман², Д. А. Озёрский², М. Ю. Бамборин¹

¹ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами», Москва

²Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2024 г.

Проектирование и строительство пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) и предшествующих им подземных исследовательских лабораторий (ПИЛ) осуществляется в большинстве стран с развитой атомной энергетикой. Анализ зарубежного опыта показывает, что для обеспечения доступа на целевые глубины в проектах ПИЛ и ПГЗРО широко применяются различные варианты горных выработок: вертикальные и наклонные стволы, их комбинации, а также спиральные съезды. В мировой практике наклонные стволы и спиральные съезды начали активно использоваться во второй половине XX века на добывающих предприятиях по мере развития методов проходки механизированными способами в различных типах горных пород. Протяженность наклонных горных выработок может быть в 6–8 раз больше по сравнению с вертикальными стволами, что автоматически повышает стоимость их проходки. Тем не менее в определенных случаях более протяженная наклонная выработка и транспортировка грузов по ней с помощью автомобильного транспорта дает настолько существенные преимущества, что гораздо более целесообразным является ее строительство, чем сооружение вертикального ствола с клетьевым подъемом. Решение о создании спирального съезда или наклонного ствола может приниматься как при сооружении подземного объекта, так и в процессе его эксплуатации. Как правило, при принятии такого решения учитывается достаточно широкий перечень факторов, включающий экономическую эффективность, горно-геологические условия и необходимость повышения безопасности отдельных технологических процессов. В частности, применительно к объектам захоронения РАО наклонная горная выработка дает возможность упростить систему доставки грузов к глубинам захоронения, снижая риски и возможные последствия аварийных ситуаций и инцидентов, связанных с отказами технологического оборудования. Ее преимуществом на стадии ПИЛ является упрощение и повышение детальности процесса характеристики массива.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, пункт глубинного захоронения, вертикальный ствол, спиральный съезд, наклонный ствол, подземная исследовательская лаборатория, транспортировка РАО, выработки ПИЛ, захоронение РАО.

Подземные исследовательские лаборатории

В мировой практике сооружение ПИЛ является неотъемлемым первым этапом на пути реализации проектов создания ПГЗРО. Подробно состав решаемых ими задач обсуждался в публикациях [1]–[4], их общепризнанные в рамках международного экспертного сообщества функции зафиксированы и в ряде российских нормативных

документов [5], [6]. ПИЛ является площадкой для работ по характеристике массива горных пород, исследований надежности конструкций системы инженерных барьеров безопасности (ИББ) и эволюции барьерных материалов проектируемого ПГЗРО, создания и отработки технологий проходки горных выработок для захоронения радиоактивных отходов (РАО) [3]. Результаты проводимых в ней исследований необходимы

для принятия последующих решений о реализуемости и надежности концепции захоронения, а также демонстрации экспертному сообществу и общественности принципов, обеспечивающих его долговременную безопасность. Именно такая роль ПИЛ, создаваемой на участке «Енисейский» (Красноярский край), зафиксирована в Стратегии создания российского ПГЗРО [7].

Зарубежные проекты создания ПГЗРО находятся на различных стадиях своего жизненного цикла, и часть из них прошла неизбежный эволюционный путь, в ходе которого рассматривались различные конфигурации горных выработок и подходы к их созданию. Статус российского проекта позволяет применить лучшие зарубежные методики и накопленный опыт проектов-аналогов для поиска и сравнения конфигураций подземного комплекса сооружений, включая тип доступа на целевые глубины, с учетом ряда факторов: их оптимальности в аспекте безопасности, современности применяемых подходов, возможностей и экономической эффективности их практической реализации. Наиболее близкими к планируемому отечественному ПГЗРО с точки зрения особенностей горных пород являются проекты в Финляндии, Швеции и Китае [8], где в качестве вмещающей геологической среды рассматриваются массивы скальных горных пород. Тем не менее при изучении многообразия перечисленных факторов наработки проектов в других вмещающих средах также ценны.

В 2017 году была опубликована серия препринтов, в которых достаточно подробно отражены мировые практики реализации проектов ПГЗРО [9], [10], а также опыт создания и эксплуатации ПИЛ [4]. Согласно сложившейся международной классификации [3], они делятся на привязанные к конкретной площадке (*site-specific*) и общего применения (*generic*). Первый тип сооружается в горных массивах, признанных перспективными для захоронения РАО. Исследования в таких лабораториях по большей части ориентированы на получение детальной информации о строении горного массива для достоверной оценки долговременной безопасности захоронения РАО на конкретном участке, а сам комплекс горных выработок создается с перспективой их взаимодействия в составе ПГЗРО.

Второй тип ПИЛ, *generic*, предназначен для отработки исследовательских подходов, технологических решений по захоронению РАО и сооружается на участках, где не планируется их изолировать (по крайней мере, в обозримой перспективе). Здесь решаются общие задачи: масштабные эксперименты релевантных для

безопасности процессов, сравнение и отработка технологий сооружения инженерных барьеров безопасности (ИББ), технологических операций по обращению с упаковками РАО и т. д.

Недавно стали выделять третий тип ПИЛ — *area-specific*, сочетающий в себе цели и задачи *site-specific* и *generic* лабораторий и отличающийся тем, что создается в пределах потенциально пригодного массива горных пород (области, в которой планируется построить ПГЗРО), но при этом выбор конкретного участка для захоронения РАО пока не подтвержден. В дальнейшем *area-specific* ПИЛ может стать частью объекта захоронения, однако это не является обязательным условием — допускается, что ПГЗРО будет создан на соседнем/смежном участке рассматриваемой области. При этом в плане конфигурации подземного комплекса сооружений и непосредственно организации доступа на целевые глубины применяются подходы, характерные для *site-specific* ПИЛ. Своим появлением этот тип обязан интенсификации проекта Beishan (КНР), на который распространяются действующие в стране ограничения в сфере лицензирования и недропользования для целей захоронения РАО [11].

Еще один признак, по которому принято разделять ПИЛ — это размещаются ли они в уже существующих объектах подземной инфраструктуры (тоннелях или выработках горнодобывающих предприятий) или в новых, специально сооруженных [2]. Из первой группы можно перечислить такие лаборатории, как немецкие Asse, Morsleben и Konrad, чешские Bukov и Josef, G-Tunnel в США, а также Tournemire во Франции. Ко второй группе относятся: Beishan в КНР, шведская Aspö, финская ONKALO, KURT в Корее, Hagonobe в Японии и другие, в том числе ПИЛ на участке «Енисейский». Также некоторые из них, например, Mont Terri и Grimsel в Швейцарии, сооружаются параллельно существующим тоннелям.

Доступ на целевые глубины в ПИЛ и ПГЗРО

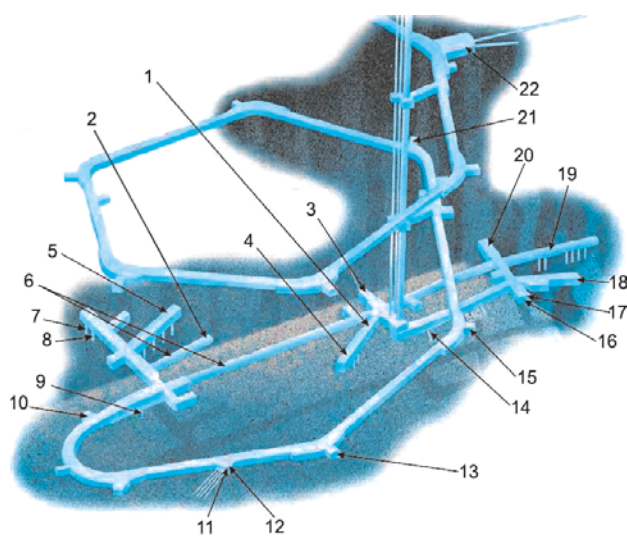
Одним из значимых технологических аспектов создания и последующего развития ПИЛ является способ организации доступа с поверхности к комплексу горизонтальных горных выработок на целевых глубинах. Если лаборатории сооружаются в существующих объектах, то они лишены проблемы выбора, так как доступ к целевым глубинам предопределен проектом объекта-предшественника. В специально построенных ПИЛ в этих целях применяются различные комбинации горных выработок, табл. 1.

Таблица 1. Варианты доступа на целевые глубины в специально сооруженных ПИЛ

Страна	Название	Тип ПИЛ	Тип пород	Доступ на целевые глубины	Статус объекта	Глубина, м
Бельгия	HADES	generic	осадочные (глины)	вертикальные стволы	действующая	230
Германия	Gorleben	site-specific	осадочные (соли)	вертикальные стволы	недействующая	840
Канада	Whiteshell	generic	скальные	вертикальные стволы	действующая	240–420
КНР	Beishan	area-specific	скальные	спиральный съезд и вертикальные стволы	строящаяся	550
	BET	generic	скальные	наклонный ствол	выведена из эксплуатации	250
Корея	KURT	generic	скальные	вертикальные стволы	строящаяся	90
США	WIPP	site-specific	осадочные (соли)	вертикальные стволы	действующий ПЗРО	655
	Busted Butte (в составе Yucca Mountain)	site-specific	осадочные (туфы)	вертикальные и наклонные стволы	недействующая	300
Финляндия	ONKALO	site-specific	скальные	спиральный съезд и вертикальные стволы	лицензирование для захоронения РАО	500
Франция	Bure	site-specific	осадочные (глины)	вертикальные стволы	действующая	500
Швеция	Äspö	generic	скальные	спиральный съезд и вертикальные стволы	действующая	450
Япония	Horonobe	generic	осадочные	вертикальные стволы	действующая	250
	Mizunami	generic	скальные	вертикальные стволы	недействующая	500

Как видно из представленных примеров, вертикальные стволы — это неотъемлемая часть комплекса специально сооруженных подземных лабораторий, вне зависимости от их типов и вмещающих горных пород. И хотя в большинстве случаев они являются их основными транспортными проходками, в ряде ПИЛ они дополняются наклонными горными выработками — спиральными съездами и наклонными стволами, которые имеют выход на поверхность и предназначены для транспортировки оборудования, подъема горной массы на поверхность при помощи самоходной техники, а также вентиляции [12].

В ПИЛ Äspö [13] (рис. 1), ONKALO [14] (рис. 2) и Beishan [15] (рис. 3) спиральный съезд выполняет роль транспортной и исследовательской выработки, в которой размещаются исследовательские участки. Также на рис. 4 приведен пример расположения исследовательской лаборатории BET (Beishan Exploration Tunnel), где роль транспортной выработки выполняет наклонный ствол. При этом стоит отметить, что в настоящее время наклонный ствол не применяется ни в одной из действующих специально созданных ПИЛ и в составе комплекса подземных сооружений используются исключительно комбинации вертикальных стволов и спиральных съездов либо только вертикальные стволы.



- 1 — применение альтернативных материалов для изготовления буфера; 2 — эксперимент по установке закупорки и засыпки; 3 — проект Миникан; 4 — испытания стабильности цепоиков; 5 — демо тест; 6 — эксперимент Zedex; 7 — повторное извлечение канистр; 8 — эксперимент с нагревательными элементами (TBT-test); 9 — Ласгит; 10 — эксперимент LTDE; 11 — проект Коллоид; 12 — эксперимент TRUE-1; 13 — проект Rex; 14 — проект по определению химического состава паровой воды скелета горных пород; 15 — исследование двухфазного движения грунтовых вод; 16 — проект Микроб; 17 — эксперимент RNR; 18 — Лот; 19 — прототипный пункт захоронения; 20 — исследование процессов задержания радионуклидов; 21 — эксперимент RNR; 22 — горизонтальное размещение упаковок с ОЯТ

Рис. 1. Схема горных выработок и расположение исследовательских участков в горных выработках ПИЛ Äspö (Швеция) [13]



Рис. 2. Схема горных выработок ПИЛ и ПГЗРО ONKALO (Финляндия) [14]



Исследования, выполняемые в процессе горнопроходческих работ

- геологическое картирование горных пород;
- 3D лазерное сканирование;
- геофизические исследования;
- геологическое изучение буровыми методами;
- оценка качества массива;
- видео- и фотодокументация проходки.

Исследования, выполняемые на различных глубинных отметках

- отработка технологии проходки выработок с помощью ТПК;
- исследования параметров НДС;
- гидрогеологические исследования (мониторинг и единичные замеры);
- замеры деформации контура горных выработок;
- исследования параметров EDZ;
- отбор проб образцов горных пород и воды.

Рис. 3. Схема горных выработок и расположение исследовательских участков в ПИЛ Veishan (КНР) [15]

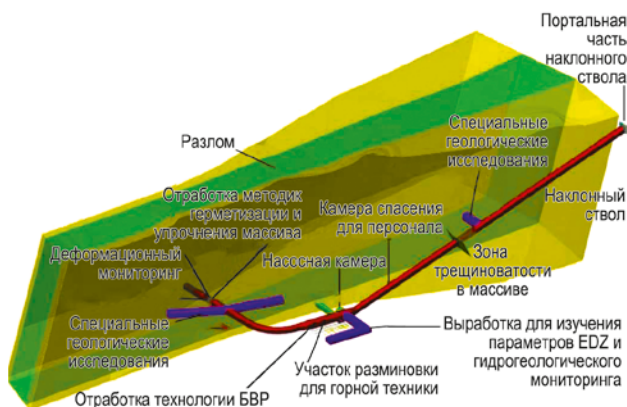


Рис. 4. Схема горных выработок и расположение исследовательских участков в Beishan Exploration Tunnel (КНР) [15]

Обзор практик применения наклонных выработок будет неполным, если помимо ПИЛ не будут упомянуты непосредственно объекты геологического захоронения, находящиеся в настоящее время на различных этапах их жизненных циклов. Наклонные стволы, предназначенные для транспортирования упаковок с РАО, присутствуют в составе таких объектов (рис. 5–10), как Yucca Mountain в США [16] (создавался для изоляции высокоактивных РАО (ВАО) и отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), приостановлен по политическим причинам), Bataarati в Венгрии [17] (низко- и среднеактивные РАО – НАО и САО, действующий), Forsmark в Швеции [18] (НАО и САО, получено разрешение на расширение объекта).

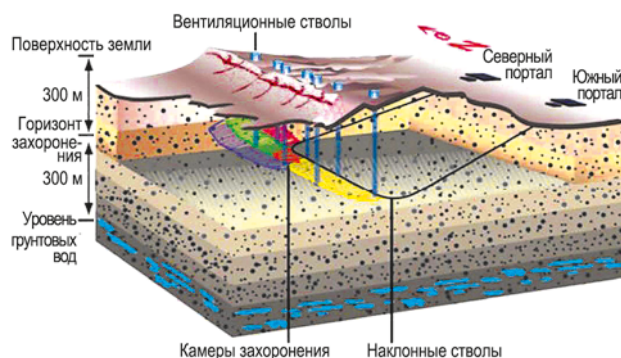


Рис. 5. Наклонные стволы в составе пункта сухого хранилища ОЯТ в туфах на глубине 300 м, проект Yucca Mountain (США) [16]

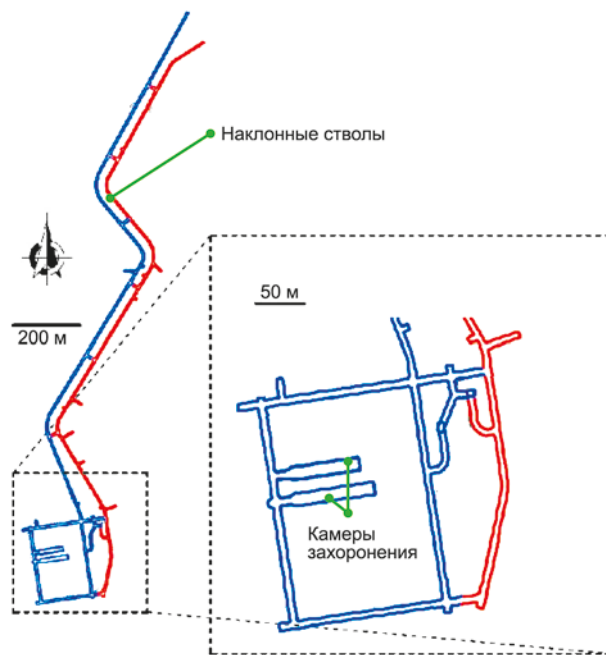


Рис. 6. Схема горных выработок объекта для захоронения САО и НАО в скальных породах на глубине 250 м, проект Bataarati (Венгрия) [17]



Рис. 7. Схема горных выработок для размещения короткоживущих РАО, а также НАО и САО на глубине до 60 м, проект Forsmark [18]

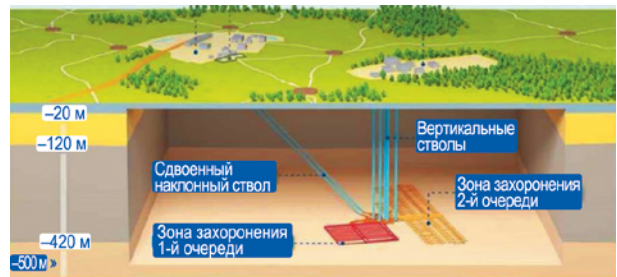


Рис. 10. Наклонные стволы в составе объекта окончательной изоляции высокоактивных и долгоживущих РАО, проект Cigeo (Франция) [21], [22]

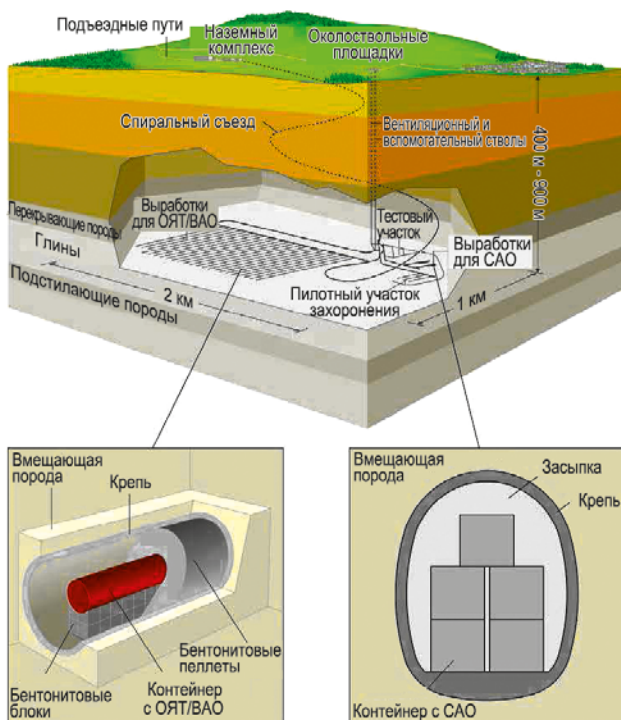


Рис. 8. Схема горных выработок Nördlich Lägern, объекта для захоронения РАО в Швейцарии [19]

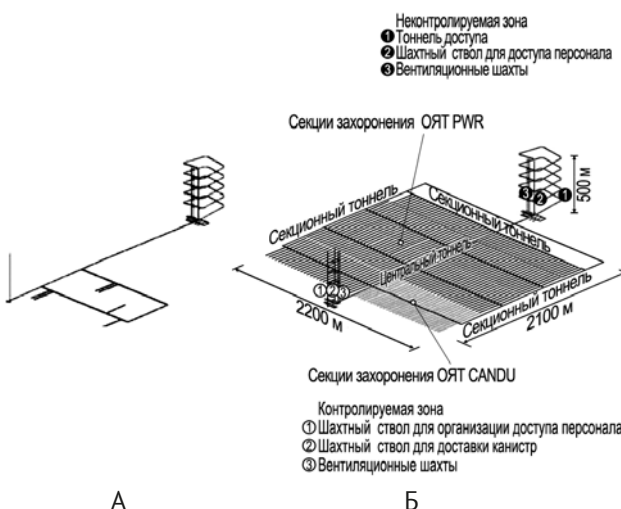


Рис. 9. Вариант концептуальной схемы горных выработок пункта захоронения ОЯТ KRS (Корея): А – стадия ПИЛ; Б – стадия ПГЗРО [20]

Также спиральные съезды и наклонные стволы будут применяться на планируемых объектах изоляции ВАО: Nördlich Lägern в Швейцарии [19], KRS в Корее [20], Cigeo во Франции [21], [22]. В отношении последнего стоит добавить, что объект будет включать в себя часть выработок ПИЛ Виге, доступ на целевые глубины в которой обеспечивается вертикальными стволами.

Мировым флагманским проектом захоронения ВАО и ОЯТ является уже упомянутый в перечне *site-specific* ПИЛ проект ONKALO (рис. 2) финской компании Posiva Oy. В настоящее время в Управлении Финляндии по радиационной и ядерной безопасности (STUK) проходит рассмотрение ее заявка на получение лицензии на эксплуатацию ПГЗРО в скальном массиве на глубине до 450 м, срок предоставления заключения ожидается до конца 2024 г. [23]. Спиральный съезд в составе комплекса подземных сооружений ONKALO, пройденный буровзрывным способом (БВР) на стадии ПИЛ, будет использоваться для транспортировки упаковок к выработкам захоронения.

Наклонные стволы и спиральные съезды в вышеперечисленных проектах имеют уклон $6^\circ - 10^\circ$, позволяющий применять в них пневмоколесный и автомобильный транспорт для доставки различных грузов, включая РАО. В ПИЛ ONKALO и Beishan принят угол спирального съезда порядка 6° [24], [25]. Уклон и радиусы поворотов в спиральном съезде определяются типом транспортных средств, горно-геологическими условиями, способом проходки (буровзрывной, механизированный или комбинированный).

Спиральный съезд имеет одно важное преимущество по сравнению с наклонным стволом в случае их применения в комбинации с вертикальными стволами для ПИЛ и/или ПГЗРО: порталная часть наклонного ствола требует дополнительной площадки, которая может быть значительно удалена в плане от основного комплекса подземных сооружений. Портал спирального съезда может быть расположен как в

пределах общей территории строительства объекта, так и вне ее границ.

Из способов создания наклонных горных выработок наиболее прогрессивным является безвзрывная проходка с применением тоннелепроходческого комплекса (ТПК) [15], [26], позволяющий сегодня сооружать выработки в крепких и очень крепких породах (рис. 11), таких как граниты и



Рис. 11. Тоннелепроходческий комплекс Beishan №1 для прокладки тоннелей в скальных породах [29]

гнейсы. С точки зрения подземного строительства важными преимуществами данного способа являются: высокие темпы проходки, возможность его автоматизации и конвейерной выдачи на поверхность отбитой горной массы, крепление свода выработки без остановки горнопроходческих работ, а также меньшее, по сравнению с методом БВР, техногенное воздействие на массив (рис. 12) [27]. К недостаткам можно отнести большой радиус поворотов для спиральных съездов, обусловленный длиной ТПК, и высокую стоимость горнопроходческого оборудования. Технология применения ТПК хорошо освоена, с ее помощью выполняется строительство объектов подземной инфраструктуры: железнодорожные и автомобильные тоннели, горные выработки на добывающих предприятиях, например, ранее в туфах на объекте Yucca Mountain [28], а в настоящее время в гранитах проходит спиральный съезд для ПИЛ Beishan [29].

Возможности применения мирового опыта в российском проекте создания ПИЛ и ПГЗРО

К числу наиболее близких проектов к ПИЛ, сооружаемой на участке «Енисейский», по составу решаемых задач и типам вмещающих горных пород можно отнести лаборатории ONKALO [30] и Beishan [15]. На их примере рассмотрим эволюцию конфигураций выработок, обеспечивающих доступ к целевым глубинам, и подходы к их созданию.

Ранние варианты проекта ONKALO не имели в составе комплекса сооружений наклонной горной выработки [24]. На стадии ПГЗРО для транспортировки РАО планировалось использовать вертикальный или наклонный ствол (рис. 13А, Б). Решение о строительстве спирального съезда в составе объектов ПИЛ ONKALO было принято компанией Posiva Oy в 2002 году [31] по результатам сравнения различных вариантов. Всего было рассмотрено 9 различных комбинаций горных выработок для доступа на целевую глубину. Варианты с наличием единственной выработки в составе комплекса подземных сооружений (вертикальный или наклонный ствол) были исключены как не обеспечивающие безопасность на стадии эксплуатации и темпы захоронения РАО [32]. Практически в это же время шведской компанией SKB осуществлялась проработка различных конфигураций ПГЗРО на участках Oskarshamn и Östhammar, в том числе анализировались и преимущества спирального съезда [33].

К итоговому сравнению были отнесены следующие варианты: два вертикальных ствола; вертикальный и наклонный стволы; спиральный съезд и вертикальные стволы. Как для стадии ПИЛ, так и ПГЗРО предпочтение было отдано последнему варианту (рис. 2 и 13В) — комбинация вертикальных стволов и спирального съезда [14].

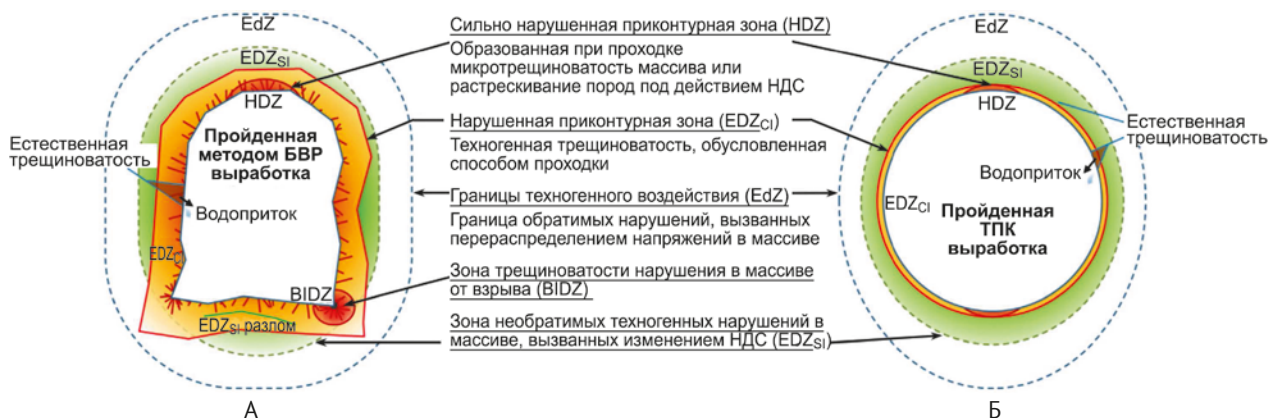


Рис. 12. Сравнение параметров техногенной нарушенности массива в приконтурной зоне горных выработок, пройденных методом БВР (А) и ТПК (Б) [27]

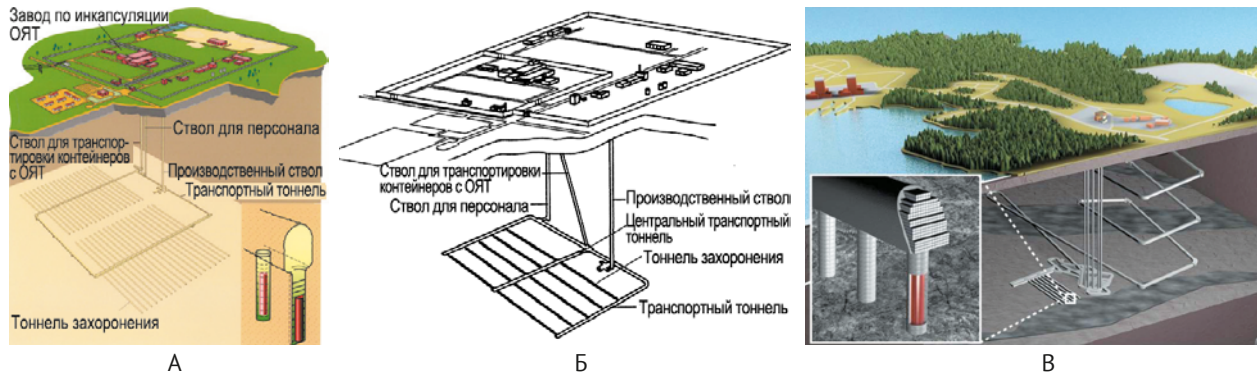


Рис. 13. Концептуальные представления об облике ПГЗРО ONKALO (Финляндия), включая окончательный [24], [30]: А – 1992 г., Б – 1996 г., В – настоящее время

Важным фактором, повлиявшим на выбор данной комбинации для ONKALO, стали наличие завершённых конструкций упаковок и технологии их захоронения, а также система природных и инженерных барьеров безопасности, позволивших определить с такими параметрами горных выработок, как сечение и угол наклона спирального съезда, в том числе исходя из массогабаритных параметров контейнеров и автомобильного транспорта (рис. 14).



Рис. 14. Прототип устройства для транспортировки по спиральному съезду контейнеров с РАО в ПГЗРО ONKALO [34]

В горно-геологических условиях участка размещения объекта ONKALO сроки строительства ПИЛ со спиральным съездом оказались сопоставимы с длительностью строительства варианта с вертикальными стволами — порядка 6—6,5 лет с учётом того, что 25 % времени отводилось на

предварительное укрепление породного массива [35].

Аналогично эволюции решений для ONKALO, ПИЛ Weishan на начальных стадиях проекта планировали создавать без спирального съезда (рис. 15А). На рис. 15Б, В представлены его ранние варианты, которые предполагалось пройти методом БВР [36]. После серии исследований горно-геологических параметров массива и подготовки технико-экономического обоснования было принято решение использовать механизированный способ проходки спирального съезда (рис. 15Г, Д), обеспечивающего доступ на глубину 560 м от поверхности (рис. 3).

Основные аргументы, которые легли в основу решения задействовать в комплексе сооружений ONKALO и Weishan именно спиральный съезд были следующими:

- для стадии ПИЛ он будет служить дополнительным источником более полных данных о вмещающем массиве горных пород и смежных участках [15], [37], [38]. Также существенно проще производить их характеризацию на стадии строительства, т. к. доизучение массива в ходе сооружения вертикальных стволов сопряжено с прерыванием горнопроходческих циклов [39], что, в свою очередь, приводит к вынужденному сокращению времени на проведение исследований;
- спиральный съезд или наклонный ствол предоставляют более широкие, чем вертикальная горная выработка, возможности варьировать

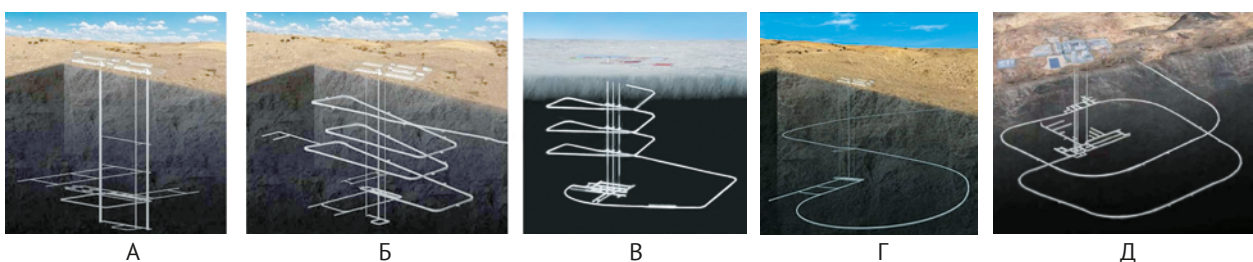


Рис. 15. Варианты конфигурации подземных объектов ПИЛ Weishan (КНР), включая итоговый [36]

транспортные решения по доставке упаковок с отходами, в том числе в условиях неопределенностей по параметрам транспортного и горнопроходческого оборудования [15], [32], и позволяют реализовать дистанционное автоматизированное управление процессами доставки РАО;

- пройденная для ПИЛ основная транспортная выработка может быть использована в комплексе подземных сооружений на этапе ПГЗРО.

При принятии решений о реализации проходки наклонного ствола или спирального съезда необходимо также учитывать и возможные отрицательные аспекты, влияющие на технико-экономические показатели строительства и отдельные элементы эксплуатационной безопасности ПГЗРО, такие как:

- большие по сравнению с вертикальным стволом объемы горнопроходческих работ и, как следствие, повышенная техногенная нарушенность массива горных пород;
- вскрытие водоносных участков протяженными выработками (рис. 16) потребует больших объемов работ по ликвидации водопритоков [32];

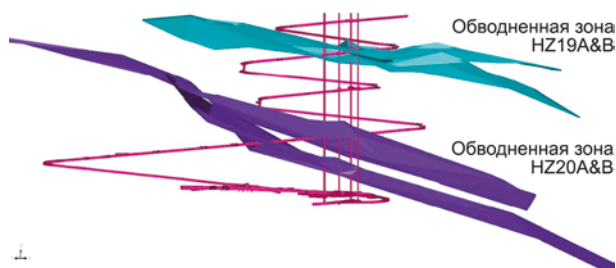


Рис. 16. Водоносные зоны, вскрытые комплексом горных выработок ПИЛ ONKALO [35]

- риск возможных аварийных ситуаций при транспортировке РАО, связанных с возгоранием элементов автомобильного транспорта (шины) и горюче-смазочных материалов, поломкой автомобиля при спуске по наклонной выработке (отказ тормозов и т. п.) [40];
- стоимость проходки спирального съезда выше, чем стоимость вертикального ствола.

В качестве комментариев и контраргументов к перечисленным выше отрицательным аспектам можно привести следующие соображения:

- повышение техногенной нарушенности массива в процессе горнопроходческих работ способно оказать влияние на долговременную безопасность ПГЗРО, что актуально для всех применяемых методов, включая ТПК, и должно быть компенсировано технологическими решениями при разработке наклонного ствола или спирального съезда системой ИББ, а также

подбором наиболее эффективных материалов для закладки горных выработок на стадии закрытия ПГЗРО;

- наличие подземных вод не является препятствием для строительства ПГЗРО, что также подтверждается финским и шведским проектами. Трещины, в т. ч. водопродводящие каналы, ликвидируются с помощью инъекционного упрочнения горных пород [35], [41], [42];
- использование наклонных выработок и, в частности, спиральных съездов позволяет реализовать дистанционное автоматизированное управление процессами доставки РАО, а также упрощает технические решения при ликвидации возможных чрезвычайных ситуаций. Риски возникновения аварий и инцидентов при транспортировке контейнеров с РАО по наклонному съезду и вертикальному стволу (например, его возгорание, зависание клетки и/или обрыв ее каната, повреждение упаковки от падения на глубину порядка 500 м) должны быть оценены как с точки зрения их отнесения к проектным и запроектным, так и в аспекте последствий, включая возможность их ликвидации [43];
- стоимость проходки наклонного ствола или спирального съезда может превышать расходы на вертикальную горную выработку тем же методом (например, буровзрывным), как уже говорилось ранее, за счет его большей протяженности. Однако сопоставление затрат на проходку спирального съезда и первичные выводы об экономической эффективности применения способов БВР либо ТПК могут быть сформированы по итогам выполнения сравнительного технико-экономического исследования. При этом к совокупной оценке затрат для проекта ПГЗРО в целом должны быть также отнесены расходы, связанные с риском возникновения аварийных ситуаций и инцидентов при транспортировке упаковок с РАО, включая стоимость ликвидации последствий.

В качестве промежуточного итога стоит подчеркнуть, что, несмотря на сформировавшиеся тенденции в части создания основных горных выработок ПИЛ различных типов и ПГЗРО, со стороны международных экспертных организаций пока не было конкретных рекомендаций по применению наклонных стволов или спиральных съездов. Тем не менее транспортировка упаковок с РАО по наклонным горным выработкам видится более предпочтительным вариантом с точки зрения подхода Best Available Technique (англ.: лучшие доступные технологии) [47], [48].

Заключение

Горные выработки ПИЛ, создаваемой на участке «Енисейский», планируется использовать в составе ПГЗРО. В проекте первой очереди ее строительства доступ к целевым глубинам предусматривается с помощью вертикальных стволов. В базовом варианте технологических решений для ПГЗРО предусмотрена транспортировка упаковок с РАО на целевые глубины (абсолютные отметки +5 и –70 м) в клетки по вертикальному технологическому стволу, оснащенной шахтной подъемной машиной. В настоящее время его проходка отложена на последующие этапы реализации проекта. Данное решение принято, в частности, из-за имеющихся неопределенностей по схемам захоронения РАО на участке «Енисейский» [44], [45], конструкциям контейнеров, параметрам системы ИББ [46]. Данные неопределенности оказывают непосредственное влияние на выбор технологических решений по доставке РАО на целевые интервалы глубин, а также формируют параметры и требования к оснащенности основной транспортной выработки. При этом, с учетом международного опыта сооружения подобного рода объектов, остается актуальным вопрос о проработке на текущей стадии проекта альтернатив технологическому стволу, обеспечивающих большую вариативность как для массогабаритных параметров транспортируемого в подземные горные выработки оборудования, так и для повышения геологической изученности выбранного массива.

По результатам анализа мировых практик строительства ПИЛ, представленного в настоящей статье, к альтернативным вариантам вертикального технологического ствола в составе ПГЗРО на участке «Енисейский» можно отнести:

- 1) спиральный съезд с расположением порталной части на площадке строительства ПИЛ/ПГЗРО;
- 2) наклонный ствол, порталная часть которого будет располагаться за пределами площадки строительства ПИЛ/ПГЗРО.

Вариант 1 дает возможность расположения порталной части и самого спирального съезда в пределах имеющегося лицензионного участка недр, а также сохранения имеющихся проектных решений по обустройству наземного комплекса сооружений и инфраструктуры на площадке строительства. По предварительным оценкам проходка спирального съезда, как и наклонных стволов, может быть проведена методом БВР либо механизированным способом с применением ТПК. Спиральный съезд, выполняя также роль источника данных

о параметрах массива, видится перспективным типом наклонной горной проходки, в том числе и в случае, если его трасса будет проложена спиралью вокруг перспективного блока для захоронения РАО.

Для реализации варианта 2 потребуются изучение существенно большего объема организационных вопросов, включая: расширение размеров лицензионного участка недр из-за необходимости выноса порталной части ствола за пределы имеющихся границ стройплощадки. Наклонный ствол с точки зрения потенциального вклада в повышение изученности блока горных пород видится менее привлекательным, т. к. не позволит детально изучить сопряженные с потенциальным блоком захоронения РАО участки недр.

Наиболее перспективным, в силу вышеперечисленных причин, является вариант 1 — проходка спирального съезда в соответствии с мировыми трендами в части строительства ПИЛ и ПГЗРО в скальных массивах. Для этих целей возможно применить метод БВР и механизированный способ с использованием ТПК. Предварительная оценка возможности проходки спирального съезда и затрат, включая применение ТПК для проходки наклонной горной выработки, могут быть сформированы по итогам соответствующего технико-экономического исследования.

Протяженность спирального съезда будет определяться:

- способом проходки выработки (БВР или ТПК);
- допустимым уклоном;
- положением порталной части съезда на площадке строительства и участках его сбойки с горизонтальными выработками;
- типом применяемого транспортного оборудования в период строительства и эксплуатации комплекса подземных сооружений;
- параметрами поперечного сечения горной выработки;
- задействованием данной выработки в вентиляционной схеме комплекса подземных сооружений.

В качестве выводов еще раз кратко перечислим основные предпосылки и преимущества создания наклонного (спирального) съезда для ПИЛ/ПГЗРО на участке «Енисейский»:

- большие по сравнению с вертикальным стволом возможности для варьирования решений по доставке упаковок с РАО на целевые интервалы глубин, в т. ч. параметров транспортного и технологического оборудования, которые будут уточняться в процессе эксплуатации ПИЛ;
- меньшие ограничения по габаритам и весу контейнеров, упаковок, пеналов, что может

- оказать помощь в принятии окончательного решения по их конструкции и технологическим схемам захоронения различных РАО;
- независимость от ограничений вертикального подъема (уборка породы, доставка материалов и оборудования), что предоставит большую автономность различным подразделениям в составе ПИЛ и ПГЗРО на стадии строительства, развития и эксплуатации;
- возможность использования наклонной горной выработки на стадии ПИЛ в качестве дополнительного источника горно-геологических данных о вмещающем массиве горных пород и сопряженных территориях [37] в силу того, что она позволяет проще и доступней производить их характеризацию, а также отрабатывать технологические решения для создания ПГЗРО [15];
- реализуемость автоматизированной координации процессами доставки РАО, включая применение дистанционно управляемой техники.

Литература

1. Mayer S. J., Van Marcke P., Jung H. et al. Important roles of underground research laboratories for the geological disposal of radioactive wastes: an international perspective // *Geological Disposal of Radioactive Waste in Deep Clay Formations: 40 Years of RD&D in the Belgian URL HADES* / Eds. X. L. Li et al. — London, Geological Society of London, 2023. Pp. 297–309. DOI: 10.1144/SP536-2022-97.
2. Blechschmidt I., Vomvoris S. Relevance of underground rock laboratories for deep geological repository programs // *Geological repository systems for safe disposal of spent nuclear fuels and radioactive waste* / Eds. M. Apted, J. Ahn. — Duxford, Woodhead Publishing, 2017. Pp. 113–142.
3. Underground research laboratories (URL): Radioactive Waste Management: NEA/RWM/R(2013)2. — Paris, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, 2013. 52 p.
4. Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Пронь И. А., Коновалов В. Ю. Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть III. Зарубежный опыт создания и эксплуатации подземных исследовательских лабораторий : Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2017-12. — М. : ИБРАЭ РАН, 2017. 34 с.
5. НП-100-17. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Утв. приказом Ростехнадзора № 218 от 23.06.2017. — М. : ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», 2017.
6. РБ-003-21. Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Утв. приказом Ростехнадзора № 101 от 19.03.2021. — М. : ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», 2021.
7. Крюков О. В. Стратегия создания пункта глубинного захоронения РАО // *Радиоактивные отходы*. 2018. № 2 (3). С. 114–120.
8. Захоронение РАО на участке Енисейский в Красноярском крае: история выбора площадки и современное состояние исследований / Под ред. Б. Т. Кочкина, И. И. Линге. — М. : Наука, 2024. 368 с.
9. Цебаковская Н. С., Линге И. И., Уткин С. С., Пронь И. А. Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть I. Актуальное состояние проектов создания пунктов глубинного геологического захоронения в европейских странах : Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2017-03. — М. : ИБРАЭ РАН, 2017. 35 с.
10. Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Коновалов В. Ю. Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть II. Актуальное состояние проектов создания пунктов глубинного геологического захоронения в США, Канаде и странах Азиатского региона : Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2017-04. — М. : ИБРАЭ РАН, 2017. 41 с.
11. Wang J., Chen L., Su R., Zhao X. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2018. Vol. 10. No. 3. Pp. 411–435. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.03.002.
12. СТО СРО-П 60542948 00034-2019. Нормы технологического проектирования горнодобывающих предприятий с подземным способом разработки. Утв. протоколом № 16/09-2019 05.09.2019. — М. : Союзатомпроект, 2019.
13. Äspö Hard Rock Laboratory: Annual Report 2018: SKBTR-19-10. — Solna, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2019. 88 p.
14. Design basis (DB): POSIVA 2021-08. Safety case for the operating licence application. — Eurajoki, Posiva Oy, 2021.
15. Wang J., Chen L., Su R., Zhao X. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2018. Vol. 10. No. 3. Pp. 411–435. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.03.002.
16. Yucca Mountain: The most studied real estate on the planet: Report to the Chairman Senator James M. Inhofe. — Washington, U.S. Senate Committee on Environment and Public Works, Majority staff, 2006. 25 p.

17. Deák F., Kovács L., Vászárhelyi B. Geotechnical rock mass documentation in the Bábaapáti radioactive waste repository // Central European Geology. 2014. Vol. 57. No. 2. Pp. 197—211. DOI: 10.1556/CEuGeol.57.2014.2.5.
18. Post-closure safety for SFR, the final repository for short-lived radioactive waste at Forsmark. Handling of future human actions, PSAR version: SKB TR-23-08. — Solna, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2023. 84 p.
19. Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 3 Vorschläge zur Konkretisierung der Oberflächeninfrastruktur der geologischen Tiefenlager: Teil 1. Einführung und GrundlagenArbeitsbericht: NAB 19-08. — Wettingen, Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 2019. 35 p.
20. Lee J., Cho D., Choi H., Choi J. Concept of a Korean reference disposal system for spent fuels // Journal of Nuclear Science and Technology. 2007. Vol. 44. No. 12. Pp. 1565—1573. DOI: 10.1080/18811248.2007.9711407.
21. Zghondi J., Armand G., Kerner L. et al. Compressible linings solutions: A multi-scale mechanical and technical demonstration up to a full 6m diameter surface loading “accelerator” device // Expanding Underground — Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World: World Tunnel Congress 2023 (Athens, Greece, 12—18 May, 2023). — London, CRC Press, 2023.
22. Gaudry C., Ouffroukh H., Moscone L., Taherzadeh R. Constrains, design and construction methods of the Cigéo five deep shafts // Tunnels and Underground Cities. Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art: World Tunnel Congress 2019 (Naples, Italy, 3—9 May 2019). — London, CRC Press, 2020.
23. Holt E., Jalonen T. Recent Advances from Finland’s R&D, Supporting Final Operation of the Deep Geological Repository // WM2024 Conference (March 10—14, 2024). — Phoenix, 2024. P. 24356.
24. Autio J., Saanio T., Tolppanen P. et al. Assessment of alternative disposal concepts: POSIVA-96-12. — Helsinki, Posiva Oy, 1996. 93 p.
25. Ma H., Wang J., Man K. et al. Excavation of underground research laboratory ramp in granite using tunnel boring machine: Feasibility study // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2020. Vol. 12. No. 6. Pp. 1201—1213. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.09.002.
26. Гаврилова А. Ю., Михайлов К. Д. Обзор конструкций проходческих щитовых комплексов // Теория и практика приоритетных научных исследований: сборник научных трудов по материалам VII международной научно-практической конференции (Смоленск, 27.05.2019). — Смоленск, 2019. С. 79—83.
27. Siren T. Excavation damage zones, fracture mechanics simulation and in situ strength of migmatitic gneiss and pegmatitic granite at the nuclear waste disposal site in Olkiluoto, Western Finland: Doctoral dissertations 187/2015. — Aalto, Aalto University, Department of Civil and Environmental Engineering, 2015. 41 p.
28. Voegele M. D. The Yucca Mountain license application // Geological repository systems for safe disposal of spent nuclear fuels and radioactive waste / Eds. M. Apter, J. Ahn. — Duxford, Woodhead Publishing, 2017. Pp. 163—193.
29. Wang J., Chen L., Su R. et al. Lab and field experimental infrastructures // Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical (THMC) Processes in Bentonite Barrier Systems / Eds. H. Shao et al. — Cham, Switzerland: Springer Nature, 2024. Pp. 5—39. DOI: 10.1007/978-3-031-53204-7_2.
30. Vehmas J., Rentto A., Luukkanen J. et al. The Finnish solution to final disposal of spent nuclear fuel // The Future of Radioactive Waste Governance: Lessons from Europe / Eds. M. Arentsen, R. van Est. — Wiesbaden, Springer, 2023. Pp. 287—317. DOI: 10.1007/978-3-658-40496-3_11.
31. Ryhänen V. Posiva’s Site Investigations Programme // MRS Online Proceedings Library (OPL): Vol. 807: Scientific basis for nuclear waste management XXVII (15—19.06.2003, Kalmar, Sweden). — Cambridge University Press, 2003. DOI: 10.1557/PROC-807-3.
32. Dikds T., Ikonen A., Niiranen S., Hansen J. Going underground in Finland: design of Onkalo in progress // WM’03 Conference (February 23—27, 2003). — Tucson, 2003.
33. Bäckblom G., Christiansson R., Hedin A. et al. Utredning rörande tillträdesvägar till djupförvarets deponeringsområden: Schakt eller ramp?: R-03-11 — Stockholm, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2003. 96 p.
34. Wendelin T., Suikki M. Preliminary design for spent fuel canister handling systems in a canister transfer and installation vehicle: Working Report 2008-38. — Eurajoki, Posiva Oy, 2008. 64 p.
35. Hatakka L., Salminen N., Tirinen J. Developing of shaft grouting methods during the construction of ONKALO Research facility at Olkiluoto: Working Report 2018-03. — Eurajoki, Posiva Oy, 2018. 104 p.
36. Feng R. URL design & BIM application-Construction of URL for geological disposal of HLW in China // IAEA Workshop on Planning and Implementing Construction of Underground Research Facilities and Deep Geological Repositories (08—12.07.2024, Beishan, China).
37. ONKALO Underground Characterisation and Research Programme (UCRP): POSIVA 2003-03. — Olkiluoto, Posiva Oy, 2003. 142 p.

38. *Saksa P., Anttila P., Riekkola R., Hautojärvi A.* Strategy for construction and investigation planning: Working Report 2003—28. — Olkiluoto, Posiva Oy, 2003. 126 p.
39. *Гупало В. С., Казаков К. С., Коновалов В. Ю., Демин А. В.* О синхронизации мероприятий программы исследований массива с проходческими работами при создании подземной исследовательской лаборатории в Нижнеканском массиве // Горный журнал. 2020. № 3 (2272). С. 72—78.
40. *Peiffer F., Fass T., Weber S.* Analyse betrieblicher Erfahrungen und ihrer Bedeutung für das Anlagenkonzept und den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle: Abschlussbericht zum Vorhaben 3608R02612: GRS-A-3613. — Braunschweig, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit GRS, 2011. 280 p.
41. *Заславский Ю. З., Лопухин Б. А., Дружко Е. Б., Качан И. В.* Инъекционное упрочнение горных пород. — М.: Недра, 1984. 175 с.
42. *Кузьмин Е. В.* Упрочнение горных пород при подземной добыче руд. — М.: Недра, 1991. 253 с.
43. *Машиностроение ядерной техники, кн. 1: Машиностроение: Т. 4—25 / ред. Е. О. Адамов, В. И. Солонин, К. С. Колесников.* — М.: Машиностроение, 2005. 959 с.
44. *Богатов С. А.* Захоронение остеклованных ВАО в вертикальных скважинах с цементной закладкой — плюсы и минусы с точки зрения обеспечения долговременной безопасности ПГЗРО // Радиоактивные отходы. 2018. № 1 (2). С. 21—33.
45. *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.
46. *Богатов С. А., Дробышевский Н. И., Крупская В. В. и др.* Предварительные оценки параметров инженерных барьеров в концепции ПГЗРО с горизонтальным размещением упаковки с РАО в контейнерах с медным покрытием // Радиоактивные отходы. 2023. № 3 (24). С. 77—91. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-3-77-91.
47. *Costing methods and funding schemes for radioactive waste disposal programmes: IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.25.* — Vienna, International Atomic Energy Agency, 2020.
48. *Optimisation of geological disposal of radioactive waste: national and international guidance and questions for further discussion: Radioactive Waste Management: NEA No. 6836.* — Paris, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, 2010. 28 p.

Информация об авторах

Дерябин Сергей Александрович, и. о. генерального директора, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, Пятницкая ул., д. 49А, к. 2), e-mail: SADerjabin@noraoo.ru.

Уткин Сергей Сергеевич, доктор технических наук, заместитель директора по информационно-аналитическому обеспечению комплексных проблем ядерной и радиационной безопасности, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: uss@ibrae.ac.ru.

Шевцова Елена Владимировна, кандидат технических наук, начальник управления лицензирования и разрешительной деятельности, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, Пятницкая ул., д. 49А, к. 2), e-mail: EVShevtsova@noraoo.ru.

Казаков Константин Сергеевич, кандидат технических наук, заместитель заведующего лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: kks@ibrae.ac.ru.

Кузьмин Евгений Викторович, профессор, доктор технических наук, эксперт Департамента технической политики и науки, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, Пятницкая ул., д. 49А, к. 2), e-mail: EVKuzmin@noraoo.ru.

Баринов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: barinov@ibrae.ac.ru.

Демин Анатолий Викторович, главный эксперт, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: demin@ibrae.ac.ru.

Свительман Валентина Семёновна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: svitelman@ibrae.ac.ru.

Озерский Дмитрий Андреевич, кандидат технических наук, директор Красноярского филиала ИБРАЭ РАН, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: oda@ibrae.ac.ru.

Бамборин Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, начальник отдела технической политики и НИОКР, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (119017, Москва, Пятницкая ул., д. 49А, к. 2), e-mail: MYBamborin@noraо.ru.

Библиографическое описание статьи

Дерябин С. А., Уткин С. С., Шевцова Е. В., Казаков К. С., Кузьмин Е. В., Баринов А. С., Дёмин А. В., Свительман В. С., Озёрский Д. А., Бамборин М. Ю. Анализ международного опыта технологий строительства объектов подземной изоляции РАО // Радиоактивные отходы. 2025. № 1 (30). С. 57–72. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-1-57-72.

CONSTRUCTION METHODS FOR UNDERGROUND RW DISPOSAL FACILITIES: ANALYSIS OF INTERNATIONAL EXPERIENCE

Deryabin S. A.¹, Utkin S. S.², Shevtsova E. V.¹, Kazakov K. S.², Kuzmin E. V.¹,
Barinov A. S.², Demin A. V.², Svitelman V. S.², Ozersky D. A.², Bamborin M. Yu.¹

¹National Operator for Radioactive Waste management FSUE, Moscow, Russia

²Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on November 28, 2024

Deep geological repositories for radioactive waste (DGR) and underground research laboratories (URL) preceding them are being developed and constructed in most countries with developed nuclear power sector. International practices show that DGR and URL designs involve various types of excavations widely used to provide access to the target depths: vertical and inclined shafts, their combinations, as well as spiral ramps. In world practice, inclined workings, which include inclined shafts and spiral ramps, became widely used in the second half of the XX century at mining enterprises along with the development of mechanized mining methods for various types of rocks. The inclined workings can be 6–8 times longer compared to vertical shafts, which inherently increases the cost of their excavation. However, in certain cases, a longer inclined working and transportation along it by road transport provides such considerable advantages that its construction turns out to be a much more feasible option compared to vertical shaft designs with a cage hoist. The decision to excavate a spiral ramp or an inclined shaft can be made both at the DGR construction and operational stage. In the decision-making, a fairly wide range of factors is commonly taken into account, including economic efficiency, mining and geological conditions and the need to enhance the safety of individual production processes. In particular, with regard to radioactive waste disposal facilities, an inclined working facilitates the system of package delivery to the disposal depths reducing the risks and possible consequences of emergency situations and incidents associated with equipment failures. At the URL stage, an inclined working facilitates and provides more detailed rock mass characterization.

Keywords: radioactive waste, deep disposal facility, vertical shaft, spiral ramp, inclined shaft, underground research laboratory, transportation of radioactive waste, URL excavations, radioactive waste disposal.

References

1. Mayer S. J., Van Marcke P., Jung H. et al. Important roles of underground research laboratories for the geological disposal of radioactive wastes: an international perspective / Geological Disposal of Radioactive Waste in Deep Clay Formations: 40 Years of RD&D in the Belgian URL HADES / Eds. X. L. Li et al. — London, Geological Society of London Publ., 2023. Pp. 297–309. DOI: 10.1144/SP536-2022-97.
2. Blechschmidt I., Vomvoris S. Relevance of underground rock laboratories for deep geological repository programs / Geological repository systems for

safe disposal of spent nuclear fuels and radioactive waste. Eds. M. Apted, J. Ahn. Duxford, Woodhead Publishing Publ., 2017. Pp. 113–142.

3. Underground research laboratories (URL): Radioactive Waste Management: NEA/RWM/R(2013)2. Paris, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development Publ., 2013. 52 p.

4. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Pron I. A., Konovalov V. Yu. Zarubezhnyye proyekty zakhroneniya OYAT i RAO. Chast' III. Zarubezhnyy opyt sozdaniya i ekspluatatsii podzemnykh issledovatel'skikh laboratoriy [International SNF and RW disposal projects.

Part III. International experience in the development and operation of underground research laboratories]. Preprint No. IBRAE-2017-12. Moscow, Nuclear Safety Institute of RAS Publ., 2017. 34 p.

5. NP-100-17. *Trebovaniya k sostavu i sodержaniyu otcheta po obosnovaniyu bezopasnosti punktov zakhroneniya radioaktivnykh otkhodov. Federal'nyye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii* [Requirements for the composition and content of safety analysis reports for radioactive waste disposal facilities: Federal Norms and Rules in the Field of Atomic Energy Use]. Approved by Rostechnadzor's Order No. 218 of June 23, 2017. Moscow, FBU "Nauchno-tehnicheskiiy tsentr po yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti" Publ., 2017.

6. RB-003-21. *Otsenka dolgovremennoy bezopasnosti punktov glubinnogo zakhroneniya radioaktivnykh otkhodov. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoy energii* [Long-Term Safety Assessment of Deep Disposal Facilities for Radioactive Waste: Safety Guide for Atomic Energy Use]. Approved by Rostechnadzor's Order No. 101 of March 19, 2021. Moscow, FBU "Nauchno-tehnicheskiiy tsentr po yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti" Publ., 2021.

7. Kryukov O. V. *Strategiya sozdaniya punkta glubinnogo zakhroneniya RAO* [Strategy for the development of RW deep disposal facility]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 3 (4), pp. 114—120.

8. *Zakhroneniye RAO na uchastke Yeniseyskiy v Krasnoyarskom krae: istoriya vybora ploshchadki i sovremennoye sostoyaniye issledovaniy* [Radioactive waste disposal at the Yeniseyskiy site in Krasnoyarsk Krai: site selection milestones and current research]. Edited by B. T. Kochkin, I. I. Linge. Moscow, Nauka Publ., 2024. 368 p.

9. Tsebakovskaya N. S., Linge I. I., Utkin S. S., Pron I. A. *Zarubezhnyye proyekty zakhroneniya OYAT i RAO. Chast' I. Aktual'noye sostoyaniye projektov sozdaniya punktov glubinnogo geologicheskogo zakhroneniya v yevropeyskikh stranakh* [International SNF and RW disposal projects. Part I. State-of-art in the development of deep geological disposal facilities in European countries]. Preprint No. IBRAE-2017-03. Moscow, Nuclear Safety Institute of RAS Publ., 2017. 35 p.

10. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Konovalov V. Yu. *Zarubezhnyye proyekty zakhroneniya OYAT i RAO. Chast' II. Aktual'noye sostoyaniye projektov sozdaniya punktov glubinnogo geologicheskogo zakhroneniya v SSHA, Kanade i stranakh Aziatskogo regiona* [International SNF and RW disposal projects. Part II. State-of-art in the development of deep geological disposal facilities in the U.S., Canada and Asian countries]. Preprint No. IBRAE-2017-04. Moscow: Nuclear Safety Institute of RAS Publ., 2017. 41 p.

11. Wang J., Chen L., Su R., Zhao X. The Beishan underground research laboratory for geological

disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 411—435. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.03.002.

12. STO SRO-P 60542948 00034-2019. *Normy tekhnologicheskogo proyektirovaniya gornodobyvayushchikh predpriyatiy s podzemnym sposobom razrabotki* [Standards for the design development of mining enterprises with underground mining]. Approved by protocol No. 16/09-2019 on September 5, 2019. Moscow, Soyuzatomproekt Publ., 2019.

13. Äspö Hard Rock Laboratory: Annual Report 2018: SKB TR-19-10. Solna, Svensk Kärnbränslehantering AB Publ., 2019. 88 p.

14. Design basis (DB): POSIVA 2021-08. Safety case for the operating licence application. Eurajoki, Posiva Oy, 2021.

15. Wang J., Chen L., Su R., Zhao X. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 411—435. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.03.002.

16. Yucca Mountain: The most studied real estate on the planet: Report to the Chairman Senator James M. Inhofe. Washington, U.S. Senate Committee on Environment and Public Works, Majority staff Publ., 2006. 25 p.

17. Deák F., Kovács L., Vásárhelyi B. Geotechnical rock mass documentation in the Bataapáti radioactive waste repository. *Central European Geology*, 2014, vol. 57, no. 2, pp. 197—211. DOI: 10.1556/CEuGeol.57.2014.2.5.

18. Post-closure safety for SFR, the final repository for short-lived radioactive waste at Forsmark. Handling of future human actions, PSAR version: SKB TR-23-08. Solna, Svensk Kärnbränslehantering AB Publ., 2023. 84 p.

19. Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 3 Vorschläge zur Konkretisierung der Oberflächeninfrastruktur der geologischen Tiefenlager: Teil 1. Einführung und GrundlagenArbeitsbericht: NAB 19-08. Wettingen, Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle Publ., 2019. 35 p.

20. Lee J., Cho D., Choi H., Choi J. Concept of a Korean reference disposal system for spent fuels. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2007, vol. 44, no. 12, pp. 1565—1573. DOI: 10.1080/18811248.2007.9711407.

21. Zghondi J., Armand G., Kerner L. et al. Compressible linings solutions: A multi-scale mechanical and technical demonstration up to a full 6m diameter surface loading "accelerator" device. Expanding Underground — Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World: World Tunnel

- Congress 2023 (Athens, Greece, 12–18 May, 2023). London, CRC Press Publ., 2023.
22. Gaudry C., Ouffroukh H., Moscone L., Taherzadeh R. Constrains, design and construction methods of the Cigéo five deep shafts. *Tunnels and Underground Cities. Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art: World Tunnel Congress 2019* (Naples, Italy, 3–9 May 2019). London, CRC Press Publ., 2020.
23. Holt E., Jalonen T. Recent Advances from Finland's R&D, Supporting Final Operation of the Deep Geological Repository. *WM2024 Conference* (March 10–14, 2024). Phoenix, 2024. P. 24356.
24. Autio J., Saanio T., Tolppanen P. et al. Assessment of alternative disposal concepts: POSIVA-96-12. Helsinki, Posiva Oy Publ., 1996. 93 p.
25. Ma H., Wang J., Man K. et al. Excavation of underground research laboratory ramp in granite using tunnel boring machine: Feasibility study. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020, vol. 12, no. 6, pp. 1201–1213. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.09.002.
26. Gavrilova A. Yu., Mikhailov K. D. *Obzor konstruktivnykh prokhodcheskikh shchitovykh kompleksov* [Overview of tunneling shield complexes and their designs]. *Teoriya i praktika prioritnykh nauchnykh issledovaniy: sbornik nauchnykh trudov po materialam VII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Theory and practice of priority scientific research: collection of scientific papers based on the proceedings of the VII international scientific and practical conference] (Smolensk, May 27, 2019). 2019. Pp. 79–83.
27. Siren T. Excavation damage zones, fracture mechanics simulation and in situ strength of migmatitic gneiss and pegmatitic granite at the nuclear waste disposal site in Olkiluoto, Western Finland: Doctoral dissertations 187/2015. Aalto, Aalto University, Department of Civil and Environmental Engineering Publ., 2015. 41 p.
28. Voegelé M. D. The Yucca Mountain license application / Geological repository systems for safe disposal of spent nuclear fuels and radioactive waste. Eds. M. Apted, J. Ahn. Duxford, Woodhead Publishing Publ., 2017. Pp. 163–193.
29. Wang J., Chen L., Su R. et al. Lab and field experimental infrastructures / Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical (THMC) Processes in Bentonite Barrier Systems. Eds. H. Shao et al. Cham, Switzerland: Springer Nature Publ., 2024. Pp. 5–39. DOI: 10.1007/978-3-031-53204-7_2.
30. Vehmas J., Rentto A., Luukkanen J. et al. The Finnish solution to final disposal of spent nuclear fuel / The Future of Radioactive Waste Governance: Lessons from Europe. Eds. M. Arentsen, R. van Est. Wiesbaden, Springer Publ., 2023. Pp. 287–317. DOI: 10.1007/978-3-658-40496-3_11.
31. Ryhänen V. Posiva's Site Investigations Programme / MRS Online Proceedings Library (OPL): Vol. 807: Scientific basis for nuclear waste management XXVII (15–19.06.2003, Kalmar, Sweden). Cambridge University Press Publ., 2003. DOI: 10.1557/PROC-807-3.
32. Dikds T., Ikonen A., Niiranen S., Hansen J. Going underground in Finland: design of Onkalo in progress / WM'03 Conference (February 23–27, 2003). Tucson, 2003.
33. Bäckblom G., Christiansson R., Hedin A. et al. Utredning rörande tillträdesvägar till djupförrårets deponeringsområden: Schakt eller ramp?: R-03-11. Stockholm, Svensk Kärnbränslehantering AB Publ., 2003. 96 p.
34. Wendelin T., Suikki M. Preliminary design for spent fuel canister handling systems in a canister transfer and installation vehicle: Working Report 2008-38. Eurajoki, Posiva Oy Publ., 2008. 64 p.
35. Hatakka L., Salminen N., Tirinen J. Developing of shaft grouting methods during the construction of ONKALO Research facility at Olkiluoto: Working Report 2018-03. Eurajoki, Posiva Oy Publ., 2018. 104 p.
36. Feng R. URL design & BIM application-Construction of URL for geological disposal of HLW in China / IAEA Workshop on Planning and Implementing Construction of Underground Research Facilities and Deep Geological Repositories (08–12.07.2024, Beishan, China).
37. ONKALO Underground Characterisation and Research Programme (UCRP): POSIVA 2003–03. Olkiluoto, Posiva Oy Publ., 2003. 142 p.
38. Saksa P., Anttila P., Riekkola R., Hautojärvi A. Strategy for construction and investigation planning: Working Report 2003–28. Olkiluoto, Posiva Oy Publ., 2003. 126 p.
39. Gupalo V. S., Kazakov K. S., Konovalov V. Yu., Demin A. V. O sinkhronizatsii meropriyatiy programmy issledovaniy massiva s prokhodcheskimi rabotami pri sozdanii podzemnoy issledovatel'skoy laboratorii v Nizhnekanskom massive [Synchronization of Rock Mass Exploration Program and Heading Operations in Creation of Underground Research Laboratory in the Nizhnekansk Massif]. *Gornyy zhurnal — Mining Journal*, 2020, no. 3 (2272), pp. 72–78.
40. Peiffer F., Fass T., Weber S. Analyse betrieblicher Erfahrungen und ihrer Bedeutung für das Anlagenkonzept und den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle: Abschlussbericht zum Vorhaben 3608R02612: GRS-A-3613. Braunschweig, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit GRS Publ., 2011. 280 p.
41. Zaslavsky Yu. Z., Lopukhin B. A., Druzhko E. B., Kachan I. V. *In'yektsionnoye uprochneniye gornyykh porod* [Injection strengthening of rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 175 p.

42. Kuzmin E. V. *Uprochneniye gornyykh porod pri podzemnoy dobyche rud* [Strengthening of rocks during underground ore mining]. Moscow, Nedra Publ., 1991. 253 p.
43. *Mashinostroyeniye yadernoy tekhniki, kn. 1: Mashinostroyeniye* [Mechanical engineering of nuclear equipment, book 1: Mechanical engineering]. Vol. 4–25 / Ed. E. O. Adamov, V. I. Solonin, K. S. Kolesnikov. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2005. 959 p.
44. Bogatov S. A. Zakhoroneniye osteklovannykh VAO v vertikal'nykh skvazhinakh s tsementnoi zakladkoi — plyusy i minusy s tochki zreniya obespecheniya dolgovremennoi bezopasnosti PGZRO [HLW Disposal of in Verticale Deposition Holes with Cement Backfill — Pro and Contra with Regard to Long Term Safety of Geological Disposal Facility]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no 1 (2), pp. 21–33.
45. Bogatov S. A., Kryuchkov D. V., Pavlov D. I., Sychenko D. V. Analiz razlichnykh kontseptsii zakhoroneniya RAO klassa 1 v kristallicheskiykh porodakh [Analysis of Various Concepts for RW. Class 1 Disposal in Crystalline Rocks]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 3 (12), pp. 66–77. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-66-77.
46. Bogatov S. A., Drobyishevskiy N. I., Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Lekhov V. A. Predvaritel'nye otsenki parametrov inzhenernykh bar'erov v kontseptsii PGZRO s gorizontal'nym razmeshcheniem upakovok s RAO v konteinerakh s mednym pokrytiem [Preliminary Assessment of Engineered Barrier Parameters under DGR Concept with Horizontal Orientation of RW Packages in Copper Coated Containers]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2023, no. 3 (24), pp. 77–91. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-3-77-91.
47. Costing methods and funding schemes for radioactive waste disposal programmes: IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.25. Vienna, International Atomic Energy Agency Publ., 2020.
48. Optimisation of geological disposal of radioactive waste: national and international guidance and questions for further discussion: Radioactive Waste Management: NEA No. 6836. — Paris, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development Publ., 2010. 28 p.

Information about the authors

Deryabin Sergey Alexandrovich, Acting General Director, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, bld. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: SADERjabin@norao.ru.

Utkin Sergey Sergeevich, Doctor of Engineering Sciences, Deputy Director for Information and Analytical Support of Complex Problems of Nuclear and Radiation Safety, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsckaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: uss@ibrae.ac.ru.

Shevtsova Elena Vladimirovna, PhD, Head of Licensing and Permitting Activities Department, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, bld. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: EVShevtsova@norao.ru.

Kazakov Konstantin Sergeevich, PhD, Deputy chief of Laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsckaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: kks@ibrae.ac.ru.

Kuzmin Evgeny Viktorovich, Professor, Doctor of Engineering Sciences, Expert of technical policy and science department, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, bld. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: EVKuzmin@norao.ru.

Barinov Alexander Sergeevich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsckaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: barinov@ibrae.ac.ru.

Demin Anatoly Viktorovich, Chief expert, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsckaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: demin@ibrae.ac.ru.

Svitelman Valentina Semenovna, PhD, Research associate, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsckaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: svitelman@ibrae.ac.ru.

Ozersky Dmitry Andreevich, PhD, Head of the Krasnoyarsk branch, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsckaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: oda@ibrae.ac.ru.

Bamborin Mikhail Yurievich, PhD, Chief of the technical policy and science department, National Operator for Radioactive Waste management FSUE (49A, bld. 2, Pyatnitskaya st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: MYBamborin@norao.ru.

Bibliographic description

Deryabin S. A., Utkin S. S., Shevtsova E. V., Kazakov K. S., Kuzmin E. V., Barinov A. S., Demin A. V., Svitelman V. S., Ozersky D. A., Bamborin M. Yu. Construction methods for underground RW disposal facilities: analysis of international experience. *Radioactive Waste*, 2025, no. 1 (30), pp. 57–72. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-1-57-72. (In Russian).