DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-49-62 УДК: 621.039.(58:7)

# ТЕХНОЛОГИЯ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В ПРОСТРАНСТВЕ ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ

**Е. В. Кузьмин[1], А. В. Калакуцкий[1], А. А. Морозов[2]**

**[1]АО «Центральный проектно-технологический институт», Топливный дивизион Росатома «ТВЭЛ», Москва**

**[2]ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение имени Е. П. Славского», Краснокаменск, Забайкальский край**

Статья поступила в редакцию 04 марта 2021 г.

*Целью данной работы является представление основных параметров технологии захоронения радиоактивных отходов (РАО) 2 и 3 классов в пространстве отработанных камер подземных рудников ПАО «ППГХО» с дополнительной изоляцией контейнеров пастовой закладкой, инъекционным упрочнением вмещающих пород в соответствии с требованиями законодательства. Приведен краткий анализ зарубежных практик размещения РАО в искусственных подземных полостях. Сопоставлены прогнозные объемы образования РАО на предприятиях ГК «Росатом» и наличие свободного подземного пространства на рудниках ПАО «ППГХО». Представлены основные характеристики пастовой закладки на основе материалов переработки урановых руд, используемой в качестве изолирующего заполнителя камер, а также параметры упрочнения породного массива с применением инъекционного метода. Определены наиболее существенные преимущества предлагаемой технологии.*

**Ключевые слова:** *радиоактивные отходы, отработанные камеры, подземное пространство, тросоинъекционные штанги, хранилища РАО, упрочнение породного массива, пастовая закладка, урановые руды, радоновыделение, контейнеры РАО, строительство ПЗРО.*

## Введение

Актуальность проблемы захоронения радиоактивных отходов возрастает по мере увеличения их объемов. В настоящее время суммарное количество только материалов гидрометаллургической переработки урановых руд в добывающих их странах превышает 2,3 млрд т. Возможность многофункционального использования недр, включая пространство отработанных выработок и камер подземных рудников, становится исключительно востребованной [1, 2]. Комплексный подход к решению крупных междисциплинарных проблем позволяет находить наиболее эффективные и безопасные методы при выборе технологии захоронения радиоактивных отходов.

Новизна работы заключается в том, что для захоронения РАО 2 и 3 классов (по принятой классификации [3]) предлагается использовать имеющиеся камеры подземных рудников на больших глубинах с изоляцией контейнеров буферной пастовой закладкой на основе материалов переработки урановых руд (РАО 6 класса). Трещиноватые вмещающие породы предлагается переводить в состояние монолитных

конгломератов путем их инъекционного упрочнения с ликвидацией трещин подавлением гидрогазофильтрационных процессов.

В работе приводятся основные элементы технологии захоронения РАО 2 и 3 классов в горных выработках, образованных при добыче руды, которая позволит безопасно и надежно размещать РАО в выработанном пространстве урановых рудников, сокращая затраты на строительство пункта захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) более чем на 60%. Размещение контейнеров в камерах и расчеты их потенциального объема на рудниках ПАО «ППГХО» в сопоставлении с необходимым для захоронения РАО, образующихся на предприятиях ГК «Росатом», на период до 2025 г. и далее приведены на конкретных примерах.

## Краткий обзор практики подземного захоронения РАО

В странах, использующих атомную энергетику, уделяется особое внимание методам безопасного захоронения РАО. Размещение хранилищ РАО в геологических формациях — это способ хранения радиоактивных отходов в стабильной геологической среде на глубинах 100—1 000 м. Захоронение в глубинных геологических формациях изучается во многих странах в течение нескольких десятилетий, включая лабораторные испытания, геологический анализ перспективных участков, строительство и эксплуатацию подземных исследовательских лабораторий. В табл. 1 приведены некоторые из более чем 50 подземных хранилищ РАО и исследовательских лабораторий, существующих в зарубежных странах, использующих атомную энергетику [4].

Захоронение радиоактивных отходов проводят в искусственных и естественных полостях путем предварительного заполнения выработанного пространства твердеющими растворами, подачей РАО через скважины с засыпкой отходов буферным заполнителем, созданием противофильтрационных и гидроизоляционных концентрических контуров вокруг места захоронения [4, 5]. Масштаб таких хранилищ чаще всего незначительный, они сложные конструктивно, требуют больших объемов подготовительных работ, финансовых и трудовых затрат.

На базе законсервированной шахты Конрад в Германии создается могильник РАО для захоронения нетепловыделяющих отходов низкого и среднего уровня активности (рис. 1) [4, 6]. В шахте разрабатывалась железная руда. Пласт ожелезненных известняков мощностью 40 м расположен на глубине нескольких сотен метров и покрыт глинистыми породами. Имеется два вертикальных ствола диаметром 7 м, глубиной 1 000 и 1 200 м для спуска-подъема людей, вентиляции, подъема породы и транспортировки упаковок с РАО.

Сводчатые камеры, для захоронения упаковок с РАО длиной до 1 000 м, сечением до 40 м$^2$ (высота — 6 м, ширина по почве — 7 м) расположены на четырех горизонтах. Пространство вокруг сложенных в три яруса упаковок с РАО (около 40% объема выработки) заполняется сорбентом.

***Таблица 1. Подземные хранилища РАО***

| Страна | Наименование объекта | Расположение | Размещаемые РАО | Вмещающие породы | Глубина размещения ПЗРО, м | Статус |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Канада | NWMO DGR | Онтарио | Отработанное топливо | Гранитный массив | 680 | Размещение |
| Финляндия | Онкало | Олкилуото | Отработанное топливо | Гранитный массив | 400 | Сооружение |
| Франция | CIGEO | Бюр | Высокоактивные и среднеактивные долгоживущие отходы | Глинистая толща | ~500 | Размещение |
| Германия | Morsleben | Саксония-Анхальт | Отходы низкого и среднего уровня активности | Соляной массив | 630 | Закрыто в 1998 году |
| Германия | Schacht Konrad | Нижняя Саксония | Отходы низкого и среднего уровня активности | Массив осадочных пород | 800 | В разработке |
| Венгрия | Батаапати | Батаапати | Отходы низкого и среднего уровня активности | Гранитный массив | 250 | В эксплуатации |
| Южная Корея | Кенджу | Кенджу | Отходы низкого и среднего уровня активности | Кристаллический массив | 80 | В стадии строительства |
| США | Установка по изоляции отходов | Нью Мексико | Трансурановые отходы | Соляной массив | 655 | В действии с 1999 года |
| США | Проект Юкка Маунтин | Невада | Отходы высокого уровня активности | Массив вулканических пород | 200—300 | В стадии строительства, 2010 — обсуждения |

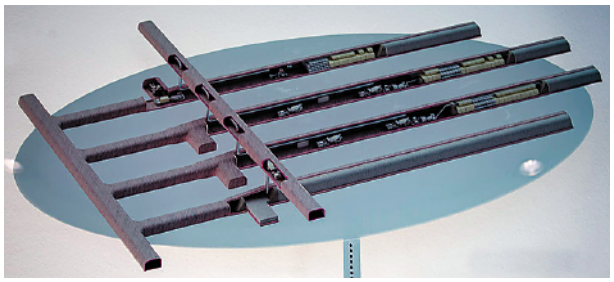

*Рис. 1. Проект подземного хранилища РАО на шахте Конрад*

Имеющиеся подготовительные выработки позволяют соорудить новые камеры емкостью около 1 млн м$^3$, что обеспечит пространство для захоронения РАО в течение 40 лет с резервом в 50 %.

Пункт захоронения РАО Батаапати (Венгрия) предназначен для низко- и среднеактивных РАО общим объемом 20 тыс. м$^3$. В данном ПЗРО имеется кольцевая схема откатки и тупиковые камеры-заходки для размещения контейнеров с РАО. Камеры арочной формы имеют сечение около 40 м$^2$ и общую длину 1 000 м (рис. 2) [4].

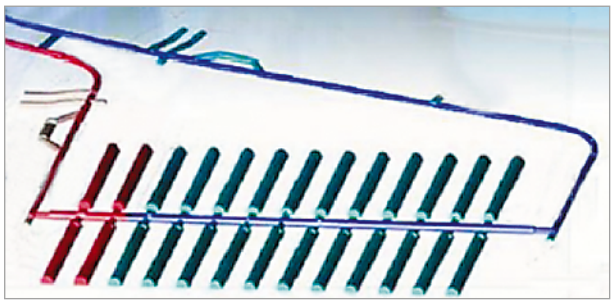

*Рис. 2. Пункт захоронения РАО Батаапати*

Планируемое к сооружению в США хранилище высокоактивных отходов Юкка Маунтин проектной емкостью 77 000 т расположено в горной местности, средняя глубина от поверхности — 340 м (рис. 3а, б) [7]. Строительство хранилища начато в 1994 г. Основной штрек: длина — 7 900 м, диаметр — 7,6 м, глубина под поверхностью горного хребта — 300 м, высота над уровнем грунтовых вод — 200 м. В 2002 г. завершены все исследования (геологические, гидрологические, геохимические, геотермальные и т. д.) и подана заявка в Комиссию по ядерному регулированию США для получения лицензии на эксплуатацию хранилища. Оно расположено у разлома, есть опасность просачивания воды, поэтому строительство приостановлено.

В нашей стране первый пункт финальной изоляции твердых РАО 3 и 4 классов находится в районе г. Новоуральска, это — приповерхностный пункт захоронения РАО (ППЗРО). Его эксплуатация ведется с 2016 года. Готовятся еще 2 ППЗРО: около г. Озерска, емкостью до 200 тыс. м$^3$, и г. Северска, емкостью до 150 тыс. м$^3$. В настоящее время в Российской Федерации реализуется проект создания пункта глубинного захоронения РАО (ПГЗРО) в Нижнеканском массиве (Красноярский край) в монолитном блоке архей-протерозойских гранито-гнейсов. В этом объекте предполагается захоранивать РАО 1 и 2 классов. В рамках утвержденной Стратегии [8] создания ПГЗРО готовится подземная исследовательская лаборатория (ПИЛ) [9, 10]. По итогам исследований в ПИЛ будет принято решение о строительстве ПГЗРО. Выполнение исследований в ПИЛ начнется уже в процессе проходки горных выработок [11].

Из приведенного обзора видно: как правило, при выборе места размещения пункта захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) ведется поиск крупной соляной или глиняной структуры, обладающей пластичностью, свойством самозалечивания трещин, либо крупного монолитного блока кристаллических пород. Граниты, базальты, диориты, перидотиты и т. п. характерны долгосрочной геохимической стабильностью, высокой прочностью, относительно высокой теплопроводностью и малой пористостью.

В настоящей работе представлен иной подход, состоящий в том, что для захоронения

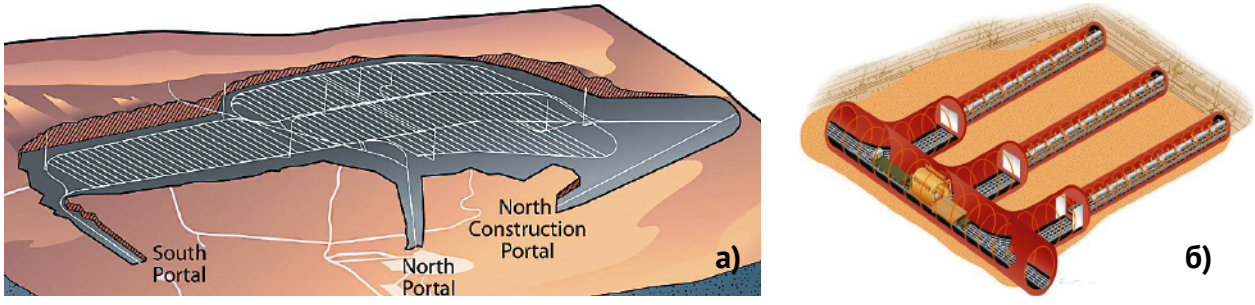


*Рис. 3. Хранилище РАО Юкка Маунтин: а) общая схема хранилища, б) тоннели для размещения контейнеров с РАО*

РАО 2 и 3 классов предлагается использовать имеющиеся камеры подземных рудников на больших глубинах, с изоляцией контейнеров оболочкой из пастовой закладки на основе материалов переработки урановых руд с высокой радиационной стойкостью, переводом трещиноватых вмещающих пород в монолитные конгломераты путем их инъекционного упрочнения.

## Соответствие условий ПАО «ППГХО» нормативным требованиям к размещению ПЗРО

Выбор способа захоронения РАО, конструкции сооружений, состав и свойства барьеров безопасности определяются в зависимости от характеристик РАО, планируемых для захоронения в данном объекте, их объема, природных условий в районе расположения ПЗРО и результатов оценки его безопасности. В соответствии с требованиями отечественного законодательства (НП-055-14):

- РАО 1 и 2 классов подлежат захоронению в глубинных ПЗРО;
- РАО 3 и 4 классов подлежат захоронению в приповерхностных ПЗРО, т. е. сооружениях, размещаемых выше, на одном уровне с поверхностью земли или ниже поверхности земли, на глубине до 100 м.

Не допускается размещать ПЗРО на площадках, расположенных непосредственно на активных разломах или в активных геодинамических зонах. На территории рудников № 1 и «Глубокий» расположены разломы: Стрельцовский, Восточная зона, Центральная зона, Мало-Тулукуевская зона, образованные в палеозойский, мезозойский и меловой периоды, около 100 млн лет назад и ранее. В списке активных разломов Геологического института РАН перечисленные разломы отсутствуют [12]. На руднике «Глубокий» при выборе подземных камер — хранилищ РАО необходимо предварительное изучение и анализ параметров локального породного массива, характерного неоднородностью напряженно-деформированного состояния (НДС) [13—16].

Не допускается размещать ПЗРО на площадках, сейсмичность которых характеризуется интенсивностью максимального расчетного землетрясения, превышающей 8 баллов по шкале МСК-64. На карте ОСР-2016-D (Общее сейсмическое районирование территории РФ) рудники № 1 и «Глубокий» расположены в зоне с максимальной интенсивностью землетрясений в 7 баллов. Период их повторяемости — 1 000 лет. Вероятность превышения расчетной интенсивности в течение 50 лет — 0,5 %.

Предложение по захоронению РАО 2 и 3 классов в подземных выработках и камерах урановых рудников состоит в образовании системы из четырех изолирующих барьеров:

1) **контейнеры** — основные изолирующие барьеры, выполненные из металла или железобетона;

2) **пастовая закладка** для пустот между стенками камер и контейнерами на основе материалов переработки урановых руд (РАО 6 класса), обладающая радиационной стойкостью благодаря наличию радиоактивных элементов;

3) **инъекционное упрочнение пород** стенок и кровли камер твердеющими составами;

4) **глубинное расположение РАО, до 1 000 м и более:** мощный массив налегающих пород, сложенный гранитами, фельзитами, конгломератами, гравелитами, трахидацитами, базальтами.

В работе последовательно рассматриваются характеристики данных изолирующих барьеров (кроме 4-го).

В условиях подземных рудников для захоронения РАО в отработанных камерах рассматривается, как вариант, использование фибробетонных контейнеров НЗК-150-1,5П размером 1,65×1,65×1,375 м и полезным объемом 0,8 м$^3$ [17]. Предпочтительными они являются по показателям изоляции РАО. Скорость разрушения поверхности бетонных конструкций может составлять 10 см за 1 000 лет. На основании моделирования деградации слоя бетона скорость разрушения составит 6 мм через 300 лет (рис. 4) [19].


*Рис. 4. Фибробетонный контейнер НЗК-150-1,5П для изоляции РАО: а) общий вид, б) внутреннее пространство с 4 упаковками РАО общим объемом 0,8 м$^3$*

## Объемы образования РАО предприятиями ГК «Росатом»

Объем ранее накопленных РАО 3 класса — около 900 тыс. м$^3$ (с учетом габаритов контейнеров). Прогноз будущего образования РАО 1—6 классов предприятиями ГК «Росатом» в ближайшие 15 лет приведен в табл. 2 [18].

***Таблица 2. Прогнозные объемы образования РАО предприятиями ГК «Росатом»***

| Класс РАО | До 2025 г., м³ | До 2035 г., м³ |
|---|---|---|
| 1 | 3 050 | 5 450 |
| 2 | 48 154 | 80 154 |
| 3 | 230 508 | 304 111 |
| 4 | 535 942 | 1 208 282 |
| 5 | 13 039 387 | 21 531 007 |
| 6* | 18 815 500 | 30 175 500 |

*от добычи и переработки урановых руд, минерального и органического сырья с повышенным содержанием природных радионуклидов.

## Наличие подземного пространства на рудниках ПАО «ППГХО»

Отработка рудных тел на рудниках ПАО «ППГХО» ведется в основном с использованием камерных систем разработки, слоевых систем с нисходящей и восходящей выемкой. Объем отработанных камер, не заполненных закладкой, на действующих и законсервированных рудниках на сентябрь 2018 года представлен в табл. 3 [19].

Объем отработанных камер рудников № 1 и «Глубокий» составляет более 1,5 млн м³, что может вполне удовлетворить потребности (около 280 тыс. м³) ГК «Росатом» в захоронении прогнозных РАО 2 и 3 классов с учетом имеющихся ограничений.

Кроме этого, на строящемся руднике № 6 ежегодно будут образовываться камеры общим объемом до 250—300 тыс. м³. По данным геологической разведки Аргунского месторождения большая часть запасов представлена рудными телами, залегающими с крутым падением, от 55 ° до 85 °, мощностью до 45 м [20]. Отработанные камеры также могут рассматриваться для захоронения РАО при предварительном анализе влияющих факторов и подготовке.

## Пастовая закладка на основе материалов переработки урановых руд

В подземных камерах пространство между штабелем с контейнерами РАО и стенками предлагается заполнять пастовой закладкой, приготовленной из материалов переработки урановых руд с добавлением флокулянтов, вяжущих и инертных добавок (цемент, зола уноса, песчано-гравийная смесь, дробленая порода).

Исследования свойств пастовой закладки на основе материалов переработки урановых руд были выполнены в АО «ВНИПИпромтехнологии» и ПАО «ППГХО» [21, 22]. Пастовая закладка — гелеобразная минеральная масса плотностью до 1,2–1,8 т/м³, не вступает в химические реакции с металлическими и бетонными контейнерами, не является пожароопасной, т. к. состоит из измельченных материалов переработки урановых руд, воды и минеральных добавок (рис. 5).

***Таблица 3. Объемы пустот на действующих и законсервированных рудниках ПАО «ППГХО»***

| Наименование систем разработки | Законсервированные рудники, тыс. м³ | | Работающие рудники, тыс. м³ | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Рудник № 2 | Рудник № 4 | Рудник № 1 | Рудник № 8 | Рудник «Глубокий» |
| Горизонтальные слои с закладкой | 460,16 | 117,12 | 1 374,91 | 286,4 | 560,19 |
| Камерные системы разработки | 206,51 | 37,07 | 326,55 | 2,79 | 1 486,58 |
| Общий объем пустот | 666,67 | 364,22 | 1 701,46 | 613,94 | 2 326,34 |

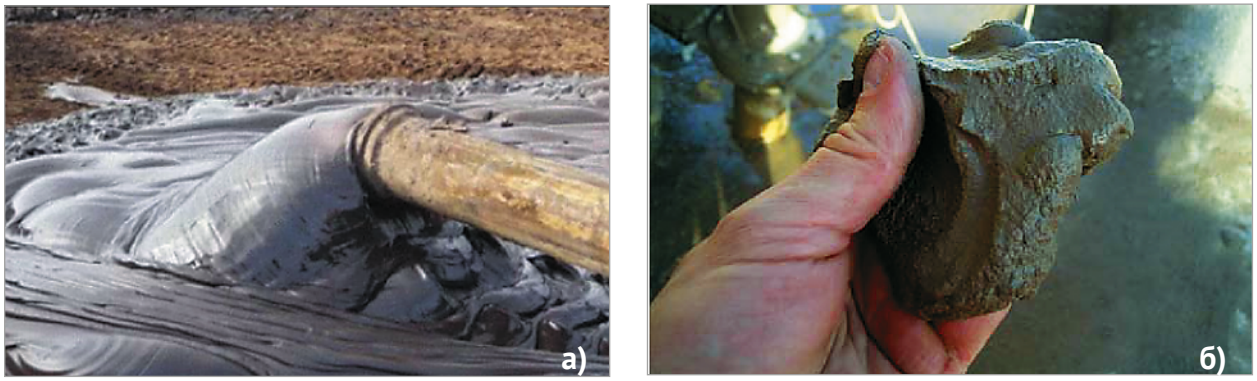


*Рис. 5. Пастовая закладка на основе материалов переработки урановых руд: а) транспортировка по трубопроводу, б) паста глубокого сгущения*

В течение 30—60 дней пастовая закладка набирает прочность на сжатие 1,0—2,0 МПа и более в зависимости от добавок и наполнителей.

### Упрочнение трещиноватых вмещающих пород

Из нескольких видов упрочнения трещиноватых породных массивов вариант с укреплением пород тросоинъекционными штангами является наиболее эффективным по следующим признакам: крепление может устанавливаться из узких выработок, при том что длина штанги может составлять 6—15 м благодаря поперечному изгибу троса; трос выдерживает нагрузки на растяжение более высокие, чем другие виды анкерной крепи; используемые упрочняющие составы — микроцементы, геоцементы, полимерные смолы — общедоступные материалы.

Исследования по инъекционному упрочнению горных пород были выполнены в Московском государственном горном университете [23]. С помощью высоконапорных насосов, через шпуры или скважины, упрочняющие составы подаются в трещиноватый массив горных пород под высоким давлением (до 15—20 МПа) и заполняют имеющиеся открытые трещины (рис. 6, 7). С учетом неоднородности НДС, различной нарушенности пород рудника «Глубокий» на разных горизонтах и разного выполнения трещинных систем, может использоваться двойная проработка массива с перекрестными шпурами или скважинами для нагнетания состава, которая позволяет заполнить практически все имеющиеся трещины.

Передача сил горного давления в трещиноватом массиве горных пород происходит через скальные контакты, по которым соприкасаются соседние блоки отдельности массива. По данным проф. К. В. Руппенейта, площадь скальных контактов (отношение площади соприкосновения к общей площади трещины) составляет $(3—4)\cdot10^{-3}$ [24]. Следовательно, основная

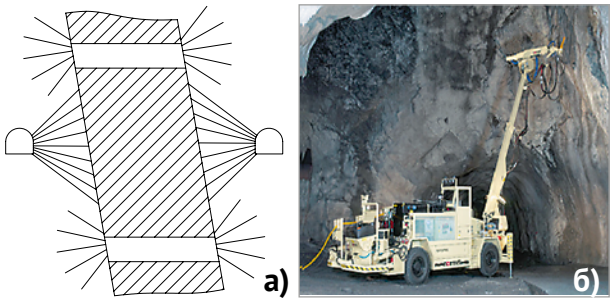


*Рис. 6. Тросоинъекционное упрочнение вмещающих пород: а) предварительное, б) последующее, после отработки камеры*

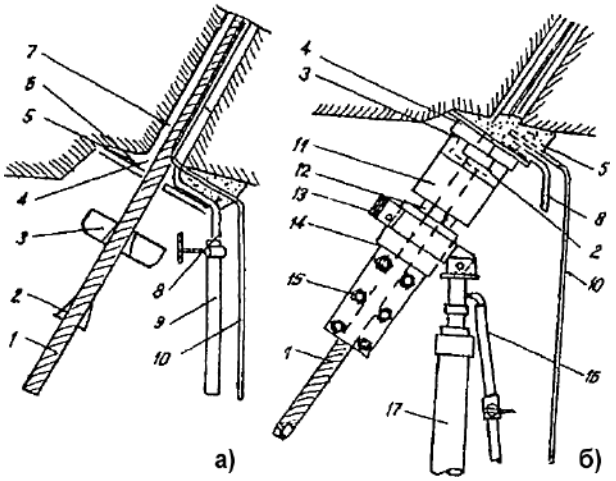


*Рис. 7. Натяжение тросов: а) конструкция инъекционной штанги, б) устройство для натяжения тросов:*
*1 — трос; 2 — конический клин; 3 — распорная плита; 4 — несущая плита; 5 — цементный раствор; 6 — мешковина; 7 — бумага; 8 — трубка для подачи раствора; 9 — шланг к цементному насосу; 10 — трубка для выпуска воздуха; 11 — гидродомкрат; 12 — плунжер насоса; 13 — хомут; 14 — натяжной домкрат; 15 — зажимной болт; 16 — воздушный шланг; 17 — пневмоподдержка*

поверхность трещин открытая. В массиве рудных месторождений имеется, как правило, от 5 до 9 пересекающихся систем трещин. После твердения упрочняющего состава в трещинах массив, находясь под давлением, становится монолитным конгломератом с высоким внутренним напряжением, подобно строительным конструкциям из предварительно напряженного железобетона.

Качество упрочнения, полнота заполнения трещин, монолитность массива проверяются сейсмоакустическими методами неразрушающего контроля [23].

Породный массив месторождения Антей (рудник «Глубокий») на разных горизонтах имеет различное выполнение трещинных систем, влияющих на механическую устойчивость. Упрочняющий состав при нагнетании в породы проникает в трещины с некоторым их раскрытием и оказывает давление, перпендикулярное поверхности трещин, запрессовывает имеющиеся включения. Это обеспечивается высоким давлением нагнетания, при котором состав проникает в трещины с максимальной ламинарной скоростью, но не приводящей к гидроразрыву трещин.

Начиная с глубины 500 м, к востоку от шва 160, горные породы месторождения Антей имеют склонность к горным ударам, которые возникают при переходе массива от состояния объемного сжатия к одноосному в условиях, когда одна

из оставшихся действующих сил превосходит предел прочности на одноосное сжатие. При инъекционном упрочнении пород трещины заполняются твердеющим составом, действующим на сжатие массива во всех направлениях с давлением, сопоставимым с весом налегающих пород, что выравнивает, восстанавливает объемное напряженное состояние массива, приближая его к равнокомпонентному. Вероятность горных ударов существенно снижается [27]. Кроме этого, в отработанных камерах при добыче руды проводились массовые взрывы, что способствует снижению напряжений в массиве, выравниванию НДС, снижению опасности горных ударов, поэтому большая часть отработанных камер может рассматриваться приемлемой для захоронения РАО.

## Основные параметры технологии захоронения РАО 2 и 3 классов в пространстве подземных рудников

Предлагаемая технология предназначается для захоронения твердых, не выделяющих тепло РАО 2 и 3 классов, размещенных в металлических или железобетонных контейнерах, в отработанных камерах с изоляцией оболочкой из твердеющей пастовой закладки, приготовленной из материалов переработки урановых руд [25, 26]. Для подавления гидрогазофильтрационных процессов проводится тросоинъекционное упрочнение массива прочных вмещающих пород с ликвидацией имеющихся технологических и природных трещин. Толщина зоны упрочненных пород вокруг камеры может составлять от 5 до 20 м, в зависимости от трещиноватости массива.

Захоронение контейнеров РАО 2 и 3 классов (не выделяющих тепло) в выработках и камерах возможно в двух вариантах:

1) использование фонда отработанных свободных выемочных камер на действующих и законсервированных рудниках;

2) использование протяженных выработок небольшого сечения.

### *Захоронение контейнеров с РАО в отработанных камерах*

Выбирается камера, не препятствующая подземному транспорту, удаленная от мест ведения буровзрывных работ. Проводится зачистка, укрепление стенок и кровли инъекционными штангами с металлической сеткой набрызг-бетоном. По почве камеры и в прилегающих выработках создается дренажная система, предотвращающая проникновение вод к камере, обеспечивается система вентиляции. На почве камеры укладывается слой железобетона толщиной 0,5 м, изолирующий бентонитовый слой толщиной 0,5 м. На созданное основание устанавливаются контейнеры РАО [25, 26].

По длине камеры контейнеры размещаются в том количестве, которое она позволяет. В камере длиной 50 м устанавливается 25 контейнеров с габаритами в плане 1,7×1,7 м и с зазорами до стен 1,0—2,0 м. В камере шириной 11 м устанавливается 4 контейнера (рис. 8). При высоте камеры 15—17 м контейнеры устанавливаются в 8 ярусов. В камере-хранилище размером 50×11×17 м устанавливается 800 контейнеров объемом 640 м$^3$ РАО. При сохранении зазора в 1 м в камере размещается 1 080 контейнеров с 864 м$^3$ РАО.

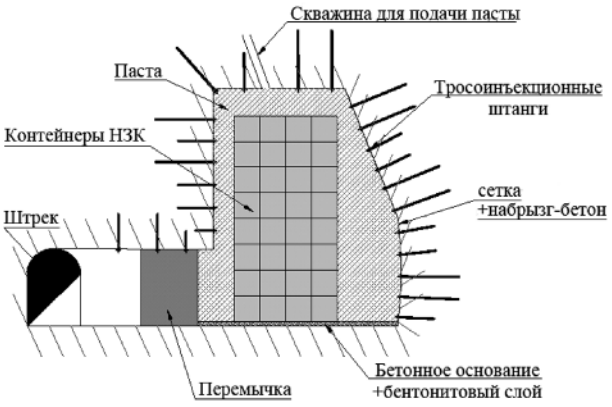


*Рис. 8. Захоронение контейнеров НЗК-150-1,5П с РАО 2 и 3 классов в камере с заполнением пустот пастовой закладкой*

После укладки контейнеров в штабель оборудование и машины удаляются, орты-заезды и все подготовительные выработки перекрываются бетонными перемычками повышенной прочности протяженностью 8 м и более. Через скважину в кровле камера полностью заполняется пастовой закладкой строго определенными этапами. Наблюдение за процессом заполнения камеры, состоянием контейнеров и пастовой закладки ведется с помощью телекамер на разных уровнях, датчиков, предварительно установленных на контейнерах, затем оно переходит в долгосрочный мониторинг параметров состояния хранилища (плотность потока радона, активность, влажность, температура и т. п.).

Для захоронения РАО 2 и 3 классов, которые будут накоплены в РФ предприятиями ГК «Росатом» к 2025 году (280 тыс. м$^3$) потребуется 438 камер-хранилищ с указанными выше размерами.

В отработанной камере большей ширины (длина 45—50 м, ширина 17 м, высота 16—18 м)

устанавливается по длине 25 контейнеров, по ширине — 8 контейнеров и по высоте — 8 ярусов (рис. 9). Технология создания дренажной, вентиляционной систем, бетонирования почвы камеры, установки контейнеров ярусами, заполнения пастовой закладкой пустот, изоляции перемычек, системы наблюдения и мониторинга — та же. Общее число контейнеров в камере размерами 50×17×16 м составит 1 600 шт., в них разместится 1 280 м³ РАО. Для захоронения РАО 2 и 3 классов, которые будут накоплены в РФ предприятиями ГК «Росатом» к 2025 году, потребуется 219 камер-хранилищ с такими размерами. При выборе преимущество следует отдавать широким камерам.

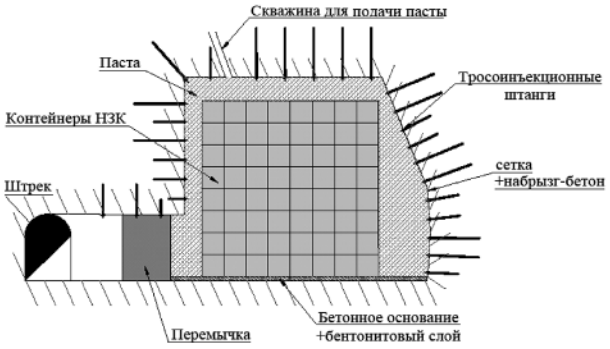


*Рис. 9. Захоронение контейнеров НЗК- 150-1,5П с РАО 2 и 3 классов в широкой камере*

### *Использование протяженных выработок небольшого сечения*

Протяженные выработки сечением 13—20 м² имеются на рудниках в большом количестве. При слоевой выемке объем подготовки по пустым породам превышает 40 % от всего объема извлекаемой горной массы. На выбранном участке проводится тросоинъекционное упрочнение пород кровли и стенок сеткой и набрызг-бетоном или напылением полимерного состава с высокими изолирующими свойствами (например, геомембраны TSL 865 компании BASF толщиной 5—8 мм, рис. 10) [28]. На почву выработки наносится бентонитовый слой толщиной 0,5 м. После установки контейнеров с РАО выработка изолируется бетонными перемычками и заполняется пастовой закладкой через специальную скважину. За процессом заполнения выработки и последующим состоянием РАО устанавливается мониторинг (приведен выше).

С учетом особой ответственности подготовки и эксплуатации камер-хранилищ РАО и необходимости долговременной сохранности, оценка безопасности для конкретных камер с

*Рис. 10. Нанесение полимерной геомембраны на поверхность выработки после тросоинъекционного упрочнения пород боков и кровли, установки сетки, перед укладкой контейнеров РАО и заполнением пастовой закладкой*

обоснованием параметров системы инженерных барьеров может быть представлена после проведения испытаний пастовой закладки, определения оптимальных геологических свойств, требуемой прочности, получаемой с добавками и нейтральными наполнителями. Также необходимы исследования параметров инъекционного упрочнения трещиноватых вмещающих пород при наличии систем трещин различного происхождения. Для освоения технологии захоронения РАО 2 и 3 классов в подземном пространстве урановых рудников ПАО «ППГХО» необходимо проведение стадий лабораторных и опытно-промышленных испытаний.

Для составления целевой бизнес-модели, графиков верхнего уровня и финансово-экономических моделей проекта в табл. 4 приведен перечень основных работ, необходимых для подготовки камер к захоронению РАО 2 и 3 классов.

В табл. 5 приведены показатели затрат на возведение приповерхностного ПЗРО и хранилища РАО в отработанных подземных камерах на большой глубине.

Доходная часть проекта представляется весьма привлекательной, с учетом тарифов (на 2020 г.) на захоронение РАО 2 класса — 729 256,92 руб./м³, РАО 3 класса — 168 070,83 руб./м³ (без НДС).

## Заключение

В настоящей работе предложена технология захоронения контейнеров РАО 2 и 3 классов в отработанных камерах подземных рудников ПАО «ППГХО» с созданием изолирующих

***Таблица 4. Перечень основных работ для подготовки камеры к захоронению РАО***

| № | Наименование работ |
|---|---|
| 1 | Подготовка камер: укрепление стенок и кровли тросоинъекционными штангами, сеткой с набрызг-бетоном, бурение скважин подачи пасты, возведение ж/б фундамента, устройство гидроизолирующего бентонитового слоя |
| 2 | Размещение контейнеров во временном складе, доставка контейнеров к стволу рудника |
| 3 | Загрузка, спуск контейнеров в клети на горизонт захоронения РАО, разгрузка, электровозная откатка на вагонетках-платформах |
| 4 | Разгрузка, установка контейнеров в ярусы в камере-хранилище, датчиков мониторинга состояния контейнеров РАО, пастовой закладки |
| 5 | Возведение бетонных перемычек в доставочных и подэтажных выработках |
| 6 | Заполнение камеры пастовой закладкой строго этапами, во избежание выдавливания перемычек, контроль полноты заполнения |
| 7 | Радиационный контроль, контроль радоновыделения, влажности, мониторинг температуры контейнеров, сейсмоакустический неразрушающий контроль монолитности вмещающих пород и т. д. |

***Таблица 5. Сравнение стоимости захоронения РАО 2 и 3 классов в приповерхностных ПЗРО и в отработанных камерах рудников [18]***

| Наименование статей затрат | Структура себестоимости захоронения РАО 2 и 3 классов, млн руб. | |
|---|---|---|
| | в приповерхностных ПЗРО (ППЗРО) | в отработанных камерах на больших глубинах |
| Загрузка и закрытие модулей ПЗРО | 1853,27 | – |
| Эксплуатация основных систем | 5001,79 | – |
| Предпроектные стадии | 12,96 | 13,00 |
| Изыскания | 102,32 | 102,32 |
| Проектирование | 214,32 | 214,32 |
| Наземная инфраструктура | 1 081,26 | 1 050,00 |
| Подготовка площади | 447,03 | – |
| Подготовка приемной площадки | – | 100,00 |
| Создание модулей ПЗРО | 2 880,18 | – |
| Комплекс приготовления пастовой закладки | – | 1 000,0 |
| Подготовка и заполнение камер пастовой закладкой | – | 1 400,00 |
| Мониторинг и контроль | – | 600,00 |
| Итого | 11 593,13 | 4 479,64 |

барьеров, включающих пастовую закладку на основе материалов переработки урановых руд в виде оболочки вокруг штабеля с контейнерами и инъекционное упрочнение пород стенок и кровли камер-хранилищ твердеющими составами с переводом трещиноватых вмещающих пород в монолитные.

Технология захоронения РАО 2 и 3 классов в отработанных камерах подземных рудников имеет следующие преимущества:

- не требуется строить новый ПЗРО, имеется готовое подземное пространство камер объемом до 1,5 млн м$^3$;
- в 2,6 раза (на 7,04 млрд рублей) меньше стоимость сооружения глубинного хранилища РАО по сравнению со строительством приповерхностного ППЗРО;
- диверсификация бизнеса — создается крупное высокодоходное направление производственной деятельности ПАО «ППГХО» по захоронению РАО 2 и 3 классов в подземном пространстве рудников, а также новые рабочие места;
- при многоступенчатой изоляции достигается надежное и безопасное захоронение РАО трех классов — 2, 3 и 6;
- контейнеры со среднеактивными РАО изолируются пастой — низкоактивными РАО, которые, в свою очередь, изолируются путем инъекционного упрочнения вмещающих пород;
- снижаются выплаты ПАО «ППГХО» (160—220 млн руб./год) за поверхностное хранение материалов переработки урановых руд;
- повышается безопасность долгосрочного хранения РАО 2 и 3 классов на глубоких горизонтах

с ликвидацией доступа к РАО и исключением возможности террористических актов.

Кроме отработанных камер на рудниках ПАО «ППГХО» имеется готовая поверхностная и подземная инфраструктура, необходимая для приема, транспортировки и размещения контейнеров РАО:

- подъездные дороги, ж/д связь, поверхностные промежуточные площадки, склады;
- подвод линий электропередачи, трансформаторные подстанции;
- вертикальные стволы на глубину более 1 000 м с клетьевыми подъемами для спуска-подъема людей, спуска контейнеров РАО;
- оборудованные околоствольные дворы, транспортные выработки по горизонтам, пути электровозной откатки, вагонетки-платформы;
- система водоотлива, принудительная центральная и местная системы вентиляции и др.

Показано возможное размещение контейнеров: в камере-хранилище размером 50×10×15 м устанавливается 800 контейнеров объемом 640 м$^3$ РАО. Для размещения РАО 2 и 3 классов предприятий ГК «Росатом» к 2025 г. потребуется 438 камер-хранилищ с данными размерами. Число контейнеров в камере размером 50×17×16 м составит 1 600 шт., в них разместится 1 280 м$^3$ РАО. Для РАО 2 и 3 классов предприятий ГК «Росатом» к 2025 г. потребуется 219 таких камер-хранилищ.

Объем отработанных камер рудников ПАО «ППГХО» составляет более 1,5 млн м$^3$, что может в значительной мере удовлетворить потребности ГК «Росатом» в хранилищах РАО 2 и 3 классов, без последующего извлечения РАО.

Для развития направления по захоронению РАО 2 и 3 классов в подземном пространстве рудников ПАО «ППГХО» необходимо создание специализированного подразделения (специальной подземной лаборатории инновационных технологий [29, 30]) по мониторингу НДС среды на рудниках, отработке технологии захоронения РАО, контролю выполнения требований безопасности, параметров состояния хранилищ, геодинамических, гидродинамических параметров массива на участках захоронения РАО.

## Литература


1. *Каплунов Д. Р., Радченко Д. Н.* Выработанные пространства недр: принципы многофункционального использования в полном цикле комплексного освоения месторождений твердых полезных ископаемых // Горный журнал. 2016. № 5. С. 28—33. DOI: 10.17580/gzh.2016.05.02.

2. *Зотеев О. В., Калмыков В. Н., Гоготин А. А., Проданов А. Н.* Основные положения методики выбора технологии складирования отходов обогащения руд в подработанных подземными рудниками карьерах и зонах обрушения // Горный журнал. 2015. № 11. С. 57—61. DOI: 10.17580/gzh.2015.11.11.

3. Постановление Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения РАО к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых РАО».

4. *Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Капырин И. В. и др.* Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО. М. : Комтехпринт, 2015. 208 с.

5. World nuclear news org: CNSC completes review of disposal facility draft EIS. URL: http://www world-nuclear-news org/WR-CNSC-completesreview-of-disposal-facility-draft-EIS-0.

6. Costs and cost distribution of the Konrad repository project. URL: http://www bfs de/Konrad/EN/themen/umbau/costen/kosten_node html;jsessionid =A4600F7D300BF663824F2A7 00BDC9AC3 1_cid365.

7. International low level waste disposal Practices and facilities. Report of US Department of Energy, 2011.

8. Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 114—120.

9. *Абрамов А. А., Большов Л. А., Дорофеев А. Н., Игин И. М., Казаков К. С., Красильников В. Я., Линге И. И., Трохов 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.

10. *Дорофеев А. Н., Большов Л. А., Линге И. И., Уткин С. С., Савельева Е. А.* Стратегический мастерплан исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 34—43.

11. *Гупало В. С., Казаков К. С., Коновалов В. Ю., Демин А. В.* О синхронизации мероприятий программы исследования массива с проходческими работами при создании подземной исследовательской лаборатории в нижнекамском массиве // Горный журнал. 2020. № 3. С. 72—78. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.14.

12. База данных активных разломов. Список разломов. 2015—2021 / Геологический институт РАН. Лаборатория неотектоники и современной геодинамики.

13. *Лаверов Н. П., Петров В. А., Полуэктов В. В., Насимов Р. М., Хаммер Й., Бурмистров А. А., Щукин С. И.*

Урановое месторождение Антей — природный аналог хранилища ОЯТ и подземная геодинамическая лаборатория в гранитах // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 5. С. 387—413.
14. *Петров В. А., Полуэктов В. В., Насимов Р. М., Щукин С. И., Хаммер Й.* Природные и техногенные изменения напряженно-деформированного состояния пород на урановом месторождении в гранитах // Физика Земли. 2009. № 11. С. 86—95.
15. *Петров В. А., Ребецкий Ю. Л., Полуэктов В. В., Бурмистров А. А.* Тектонофизика гидротермального рудообразования: пример молибден-уранового месторождения Антей, Забайкалье // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. №4. С. 327—350. DOI: 10.7868/S0016777015040036.
16. *Щукин С. И., Петров В. А., Полуэктов В. В., Устинов С. А.* Геологическая база данных для моделирования и прогноза деформаций пород месторождения Антей Стрельцовского рудного узла // Горный журнал. 2015. № 2. С. 21—26. DOI: 10.17580/gzh.2015.02.04.
17. Сертификат на контейнер НЗК-150-1,5П АТ-9-00.00.000 / АО «345 Механический завод».
18. *Калакуцкий А. В.* Концепция размещения РАО 2 и 3 классов в отработанных горных выработках с использованием контейнеров НЗК и изоляцией пастовой закладкой // Труды Международной конференции Tech Mining Russia, Москва, 2019.
19. Календарный план погашения и наличие выработанного пространства по действующим рудникам ПАО «ППГХО» на 2018 г.
20. *Карманов Р. Г., Ищукова Л. П., Брель А. И., Губкин Г. Н., Сиротенко Е. П., Овсов В. К.* Аргунское и Жерловое месторождения (Юго-Восточное Забайкалье). Отчет о результатах разведочных работ на месторождениях с подсчетом запасов урана и молибдена по состоянию на 1 января 1993 г. Том 1. Текст отчета. Пос. Октябрьский — Иркутск, 1993.
21. Исследования параметров твердеющей и пастовой закладки на основе материалов переработки урановых руд, разработка мер по снижению радоновыделения : Заключительный отчет по НИР, договор № 100-10-05/24027». М. : АО «ВНИПИпромтехнологии», 2016.
22. Разработка технологий глубокого сгущения радиоактивных отходов (РАО) переработки урановых руд для поверхностного и подземного размещения : Заключительный отчет о НИОКР. М. : АО «ВНИПИпромтехнологии» (исследовательская часть), 2019. 406 с.
23. *Кузьмин Е. В.* Упрочнение горных пород при подземной добыче руд. М. : Недра, 1991. 252 с.
24. *Руппенейт К. В., Либерман Ю. М.* Введение в механику горных пород. М. : Госгортехиздат, 1960. 356 с.
25. *Кузьмин Е. В., Калакуцкий А. В., Тарасов М. А., Морозов А. А.* Обоснование возможности размещения радиоактивных отходов 2 и 3 классов в подземном пространстве урановых рудников // Горная промышленность. 2020. № 5. С. 32—37.
26. *Кузьмин Е. В., Калакуцкий А. В., Тарасов М. А., Морозов А. А.* Концепция размещения РАО 2 и 3 классов в подземных выработках с изоляцией пастовой закладкой на основе материалов переработки урановых руд // Горная промышленность. 2020. № 6. С. 31—37.
27. *Кузьмин Е. В., Ляшевич С. И.* Предотвращение удароопасности массива методом инъекционного упрочнения горных пород // Горный журнал. 1989. № 11.
28. Результаты испытаний геомембран в ПАО «ППГХО» : Информационные материалы компании BASF. 2017.
29. *Рассказов И. Ю., Петров В. А., Гладырь А. В., Тюрин Д. В.* Геодинамический полигон Стрельцовского рудного поля: практика и перспективы // Горный журнал. 2018. № 7. С. 17—21.
30. *Петров В. А., Рассказов И. Ю., Верчеба А. А.* О научно-учебном центре «Специальная подземная лаборатория инновационных технологий (НУЦ «СПЛИТ»). Материалы международной научно-технической конференции «Решение экологических и технологических проблем горного производства на территории России, ближнего и дальнего зарубежья». Москва, 21—22.03.2019. АО «ВНИПИПромтехнологии». С. 30—33.
31. *Кузьмин Е. В., Калакуцкий А. В., Тарасов М. А.* Способ подземного захоронения радиоактивных отходов. Решение о выдаче патента на изобретение. Заявка № 2020107782 от 20.02.2020 г.

## Информация об авторах

*Кузьмин Евгений Викторович,* доктор технических наук, профессор, главный специалист, АО «Центральный проектно-технологический институт», Топливный дивизион Росатома «ТВЭЛ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 49, стр. 74), e-mail: Eugen.kuzmin2017@yandex.ru.

*Калакуцкий Алексей Васильевич,* кандидат технических наук, руководитель направления по научной и инновационной деятельности, АО «Центральный проектно-технологический институт», Топливный дивизион Росатома «ТВЭЛ» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 49, стр. 74), e-mail: alvkalakutsky@rosatom.ru.

*Морозов Александр Анатольевич,* кандидат технических наук, директор по науке и инновационному развитию, ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение имени Е. П. Славского» (674673, Краснокаменск, Забайкальский край, пр-т Строителей, д. 11), e-mail: morozovaa@ppgho.ru.

**Библиографическое описание статьи**

*Кузьмин Е. В., Калакуцкий А. В., Морозов А. А.* Технология захоронения радиоактивных отходов в пространстве подземных рудников // Радиоактивные отходы. 2021. №2 (15). С. 49—62. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-49-62.

# METHOD FOR RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL IN UNDERGROUND MINES

**Kuzmin E. V.[1], Kalakutsky A. V.[1], Morozov A. A.[2]**

**[1]JSC "Central Project and Technological Institut", Fuel Division of Rosatom "TVEL", Moscow, Russia**

**[2]PJSC "Priargunskoye Industrial Mining and Chemical Association named after E. P. Slavsky", Krasnokamensk, Zabaikalsky krai, Russia**

Article received on March 04, 2021

*This paper presents the key parameters associated with the disposal method used to dispose of radioactive waste (RW) of Class 2 and 3 in abandoned underground mines of PIMCU site assuming additional isolation of RW containers, adjustment of bedrock geomechanical properties and compliance with regulatory requirements. The paper briefly analyzes international practices focused on RW disposal in natural and artificial underground cavities. It provides a comparison between the forecasted volumes of RW generation at the enterprises of the State Corporation Rosatom and the available underground disposal capacity at PIMCU site. It presents the main characteristics of a paste filling manufactured based on materials from uranium ore processing and used as an insulating filler inside the vaults. The paper summarizes the results of operations on rock mass reinforcement based on an injection method. It indicates the key advantages of the proposed method.*

**Keywords:** *radioactive waste, abandoned vaults, underground space, cable-injection rods, RW storage facility, bedrock reinforcement, paste filling, uranium ores, radon release, RW containers, RWDF construction.*

## References

1. Kaplunov D. R., Radchenko D. N. Vyrabotannyye prostranstva nedr: printsipy mnogofunktsional'nogo ispol'zovaniya v polnom tsikle kompleksnogo osvoyeniya mestorozhdeniy tverdykh poleznykh iskopayemykh [Abandoned underground spaces: principles of multifunctional use in a full cycle promoting integrated development of solid mineral deposits]. *Gorniy zhurnal — Mining Journal,* 2016, no. 5, pp. 28—33. DOI: 10.17580/gzh.2016.05.02.

2. Zoteev O. V., Kalmykov V. N., Gogotin A. A., Prodanov A. N. Osnovnyye polozheniya metodiki vybora tekhnologii skladirovaniya otkhodov obogashcheniya rud v podrabotannykh podzemnymi rudnikami kar'yerakh i zonakh obrusheniya [Main provisions of a methodology providing the selection of a storage method for refuse ore in pits and caving zones undermined by underground mines]. *Gorniy zhurnal — Mining Journal,* 2015, no. 11, pp. 57—61.

3. Postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 19.10.2012 No. 1069 "O kriteriyakh otneseniya tverdykh, zhidkikh i gazoobraznykh otkhodov k radioaktivnym otkhodam, kriteriyakh otneseniya radioaktivnykh otkhodov k osobym radioaktivnym otkhodam i k udalyayemym radioaktivnym otkhodam i kriteriyakh klassifikatsii udalyayemykh radioaktivnykh otkhodov" [Decree of the Government of the Russian Federation of October 19, 2012, No. 1069 On Criteria for Solid, Liquid and Gaseous Waste Categorization as Radioactive Waste, Criteria for Radioactive Waste Categorization as Special (Non-retrievable) Radioactive Waste and Retrievable Radioactive Waste, and criteria for Retrievable Radioactive Waste Classification].

4. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Kapyrin I. V. et al. *Obzor zarubezhnykh praktik zakhoroneniya OYAT i RAO* [Overview of international SNF and RW disposal practices]. Moscow, Komtekhprint Publ., 2015. 208 p.

5. *World nuclear news org: CNSC completes review of disposal facility draft EIS.* URL: http://www world-nuclear-news org/WR-CNSC-completesreview-of-disposal-facility-draft-EIS-0.

6. www.bfs.de: cos Costs and cost distribution of the Konrad repository project. URL: http://www.bfs.

de/Konrad/EN/themen/umbau/costen/kosten_node.html;jsessionid=A4600F7D300BF663824F2A700BDC9AC3.1_cid365.

7. *International low level waste disposal Practices and facilities.* Report of US Department of Energy, 2011.

8. Strategiya sozdaniya punkta glubinnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov [Strategy for the development of a RW deep disposal facility]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste,* 2018, no. 2 (3), pp. 114— 120.

9. Abramov A. A., Bolshov L. A., Dorofeeev 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 prorabotka 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.

10. Dorofeev A. N., Bolshov L. A., Linge I. I., Utkin S. S., Saveleva E. A. Strategicheskiy master-plan issledovaniy v obosnovaniye bezopasnosti sooruzheniya, ekspluatatsii i zakrytiya punkta glubinnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov [Strategic Master Plan for R&D Demonstrating the Safety of Construction, Operation and Closure of a Deep Geological Disposal Facility for Radioactive Waste]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste,* 2017, no. 1, pp. 34—43.

11. Gupalo V. S., Kazakov K. S., Konovalov V. Yu., Demin A. V. O sinkhronizatsii meropriyatiy programmy issledovaniya massiva s prokhodcheskimi rabotami pri sozdanii podzemnoy issledovatel'skoy laboratorii v nizhnekamskom massive [On the synchronization of the activities under the rock mass research program with tunneling operations performed to excavate an underground research laboratory in the Nizhnekansk massif]. *Gorniy Zhurnal — Mining Journal,* 2020, no. 3, pp. 72—78. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.14.

12. Geologicheskiy institut RAN. Laboratoriya neotektoniki i sovremennoy geodinamiki. *Baza dannykh aktivnykh razlomov. Spisok razlomov* [Geological Institute of RAS. Laboratory of Neotectonics and Contemporary Geodynamics. Active faults database. List of faults]. 2015—2021.

13. Laverov N. P., Petrov V. A., Poluektov V. V., Nasimov R. M., Hammer J., Burmistrov A. A., Shchukin S. I. Uranovoye mestorozhdeniye Antey — prirodnyy analog khranilishcha OYAT i podzemnaya geodinamicheskaya laboratoriya v granitakh Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [The Antey uranium deposit considered as a natural analogue of spent nuclear fuel storage facility and an underground geodynamic laboratory in granites]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy — Geology of Ore Deposits,* 2008, vol. 50, no. 5, pp. 387—413.

14. Petrov V. A., Poluektov V. V., Nasimov R. M., Shchukin S. I., Hammer J. Prirodnyye i tekhnogennyye izmeneniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya porod na uranovom mestorozhdenii v granitakh [Natural and technogenic changes in the stress-strain state of rocks at a uranium deposit in granites]. *Fizika Zemli — Physics of the Earth,* 2009, no. 11, pp. 86—95.

15. Petrov V. A., Rebetsky Yu. L., Poluektov V. V., Burmistrov A. A. Tektonofizika gidrotermal'nogo rudoobrazovaniya: primer molibden-uranovogo mestorozhdeniya Antey, Zabaykal'ye [Tectonophysics of hydrothermal ore formation: an example of a molybdenum-uranium deposit Antey, Transbaikal]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy — Geology of ore deposits,* 2015, vol. 57, no. 4, pp. 327—350. DOI: 10.7868/S0016777015040036.

16. Shchukin S. I., Petrov V. A., Poluektov V. V., Ustinov S. A. Geologicheskaya baza dannykh dlya modelirovaniya i prognoza deformatsiy porod mestorozhdeniya Antey Strel'tsovskogo rudnogo uzla [Geological database for modeling and forecasting rock deformations: Antey deposit, Streltsovsky ore cluster]. *Gorniy Zhurnal — Mining Journal,* 2015, no. 2, pp. 21—26. DOI: 10.17580/gzh.2015.02.04.

17. JSC 345 Mechanical Plant. Certificate for container NZK-150-1.5P AT-9-00.00.000.

18. Kalakutskiy A. V. Kontseptsiya razmeshcheniya RAO 2 i 3 klassov v otrabotannykh gornykh vyrabotkakh s ispol'zovaniyem konteynerov NZK i izolyatsiyey pastovoy zakladkoy [Concept for RW Classes 2 and 3 disposal in abandoned underground excavations using NZK containers and paste filling insulation]. *Proc. of the International conference Tech Mining Russia,* Moscow, 2019.

19. Schedule of repayment and availability of abandoned space in operating PIMCU mines as for 2018.

20. Karmanov R. G., Ishukova L. P., Brel A. I., Gubkin G. N., Sirotenko E. P., Ovsov V. K. Argunskoye i Zherlovoye mestorozhdeniya (Yugo-Vostochnoye Zabaykal'ye). Otchet o rezul'tatakh razvedochnykh rabot na mestorozhdeniyakh s podschetom zapasov urana i molibdena po sostoyaniyu na 1 yanvarya 1993 goda [Argunsk and Zherlov deposits (South-Eastern Transbaikal). Report on the deposit explorations providing estimates on uranium and molybdenum reserves as of January 1, 1993]. Volume 1 Text of the report. Oktyabr'skiy — Irkutsk, 1993.

21. Zaklyuchitel'nyy otchet o NIR, contract No. 100-10-05/24027 "Issledovaniya parametrov tverdeyushchey i pastovoy zakladki na osnove materialov pererabotki uranovykh rud, razrabotka mer po snizheniyu radonovydeleniya" [Final R&D report Studying the parameters of a solidifying paste filling based on materials from uranium ore processing, development of measures to reduce radon release]. JSC VNIPIpromtechnologii, Moscow, 2016.

22. Zaklyuchitel'nyy otchet o NIOKR "Razrabotka tekhnologiy glubokogo sgushcheniya radioaktivnykh otkhodov (RAO) pererabotki uranovykh rud dlya poverkhnostnogo i podzemnogo razmeshcheniya" [Final R&D report on the Development of deep thickening methods for radioactive waste (RW) generated from the processing of uranium ores for its surface and underground disposal]. JSC VNIPIpromtechnologii (research section), Moscow, 2019. 406 p.
23. Kuzmin E. V. *Uprochneniye gornykh porod pri podzemnoy dobyche rud* [Rocks strengthening during underground mining of ores]. Moscow, Nedra Publ., 1991. 252 p.
24. Ruppeneit K. V., Lieberman Yu. M. *Vvedeniye v mekhaniku gornykh porod* [Introduction to rock mechanics]. Moscow, Gosgortekhizdat Publ., 1960. 356 p.
25. Kuzmin E. V., Kalakutskiy A. V., Tarasov M. A., Morozov A. A. Obosnovaniye vozmozhnosti razmeshcheniya radioaktivnykh otkhodov 2 i 3 klassov v podzemnom prostranstve uranovykh rudnikov [Demonstrating the possibility of RW Class 2 and 3 disposal in the underground space of uranium mines]. *Gornaya promyshlennost' — Mining industry,* 2020, no. 5, pp. 32—37.
26. Kuzmin E. V., Kalakutskiy A. V., Tarasov M. A., Morozov A. A. Kontseptsiya razmeshcheniya RAO 2 i 3 klassov v podzemnykh vyrabotkakh s izolyatsiyey pastovoy zakladkoy na osnove materialov pererabotki uranovykh rud [The concept of RW class 2 and 3 disposal in underground excavations providing the insulation with paste filling based on the materials from uranium ore processing]. *Gornaya promyshlennost' — Mining Industry,* 2020, no. 6, pp. 31—37.
27. Kuzmin E. V., Lyashevich S. I. Predotvrashcheniye udaroopasnosti massiva metodom in"yektsionnogo uprochneniya gornykh porod [Prevention of rock burst hazard by injection rock hardening]. *Gornyy zhurnal — Mining Journal,* 1989, no. 11.
28. Fact sheets of BASF company. Results of geomembrane testings at PIMCU, 2017.
29. Rasskazov I. Yu., Petrov V. A., Gladyr A. V., Tyurin D. V. Geodinamicheskiy poligon Strel'tsovskogo rudnogo polya: praktika i perspektivy [Geodynamic testing site at the Streltsovskoe ore field: practice and prospects]. *Gorniy Zhurnal — Mining Journal*, 2018, no. 7, pp. 17—21.
30. Petrov V. A., Rasskazov I. Yu., Vercheba A. A. O nauchno-uchebnom tsentre "Spetsial'naya podzemnaya laboratoriya innovatsionnykh tekhnologiy (NUTS "SPLIT") [Note about Scientific and Educational Center Purpose-build Underground Laboratory of Innovative Technologies (STC SPLIT)]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Resheniye ekologicheskikh i tekhnologicheskikh problem gornogo proizvodstva na territorii Rossii, blizhnego i dal'nego zarubezh'ya"* [Proceedings of international scientific and technical conference Addressing environmental and technological mining problems in Russia, near and far abroad]. Moscow, JSC VNIPIPromtechnologii, 21—22.03.2019. Pp. 30—33.
31. Kuz'min E. V., Kalakutskii A. V., Tarasov M. A. Sposob podzemnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov [Method of underground disposal of radioactive waste]. Decision to grant a patent for an invention no. 2020107782. application date: 20.02.2020.

## Information about the authors

*Kuzmin Evgeny Viktorovich,* Doctor of Science, professor, Chief Expert, JSC "Central Project and Technological Institut", Fuel Division of Rosatom "TVEL" (49/74, Kashirskoje Road, Moscow, 115409, Russia), e-mail: Eugen.kuzmin2017@yandex.ru.

*Kalakutsky Aleksey Vasilyevich,* PhD, Head of the Research and Innovation Department, JSC "Central Project and Technological Institut", Fuel Division of Rosatom "TVEL" (49/74, Kashirskoje Road, Moscow, 115409, Russia), e-mail: alvkalakutsky@rosatom.ru.

*Morozov Aleksandr Anatolyevich,* PhD, Director of Science and Innovation Development, PJSC "Priargunskoye Industrial Mining and Chemical Association named after E. P. Slavsky" (11, Stroiteley Ave, Zabaikalsky krai, Krasnokamensk, 674673, Russia), e-mail: morozovaa@ppgho.ru.

## Bibiliographic description

Kuzmin E. V., Kalakutsky A. V., Morozov A. A. Method for Radioactive Waste Disposal in Underground Mines. *Radioactive Waste,* 2020, no. 2 (15), pp. 49—62. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-49-62. (In Russian).