

ОБ УКРЕПЛЕНИИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПИЛ НА УЧАСТКЕ «ЕНИСЕЙСКИЙ» (КРАСНОЯРСКИЙ КРАЙ)

С. А. Дерябин¹, Е. В. Кузьмин¹, Е. В. Шевцова¹, В. А. Еременко²,
К. С. Казаков³, М. Ю. Бамборин¹, В. А. Минаев⁴

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

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва

³Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

⁴Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 23 октября 2024 г.

В составе первоочередных объектов подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) на участке «Енисейский» предусматриваются два вертикальных ствола и комплекс горизонтальных технологических и исследовательских горных выработок, пройденных на глубине 525 м от дневной поверхности (отметка – 70 м, Балтийская система высот), которыми будут вскрыты участки пород с различающимися прочностными характеристиками, что подтверждается результатами геологоразведочных работ. С учетом назначения горных выработок при их сооружении должен применяться дифференцированный подход к выбору крепи, в т. ч. с применением на наиболее осложненных участках массива решений по его упрочнению. Это определяет необходимость проведения в комплексе подземных сооружений ПИЛ отработки технологий упрочнения массива в приконтурной зоне горных выработок.

Ключевые слова: подземная исследовательская лаборатория, участок «Енисейский», породный массив, программа исследований в ПИЛ, укрепление пород, анкерная крепь, набрызг-бетон, проходка горных выработок, параметры крепления, исследовательские выработки, нагнетание твердеющих составов, свойства горных пород, радиоактивные отходы.

Период горнопроходческих работ планируется совместить с процессом доизучения массива скальных горных пород участка «Енисейский». Для этого была разработана программа их научного сопровождения при прокладывании вертикальных стволов ПИЛ, мероприятия которой включены в состав проекта на выполнение очередного этапа геологоразведки.

Имеющиеся на сегодняшний день представления о строении массива, в том числе на глубинах расположения комплекса горизонтальных горных выработок ПИЛ, базируются на данных предшествующих этапов геологоразведочных

работ, инженерных изысканий и промежуточных результатов текущего этапа геологического изучения участка строительства. К основным типам пород, слагающих массив на глубинных отметках целевого горизонта, относятся биотит-кордиеритовые гнейсы, кристаллические сланцы с прослоями биотитовых и биотит-гиперстеновых гнейсов, а также метадолериты, ортоамфиболиты, габбро-диабазы и диабазовые порфириты (дайковые образования различных возрастов) [1]. Стволовая мощность даек долеритов, вскрытых скважинами, оценивается 0,1–27,6 м, местами развиты их пакеты с суммарной

стволовой мощностью до 60 м [2]. Кроме того, внутри блока размещения комплекса горных выработок развиты относительно мелкие тектонические нарушения, к которым приурочены зоны милонитизации, расланцевания, дробления и др., имеющие различное минеральное выполнение.

Согласно сложившейся практике создания горных выработок, для минимизации риска обрушения пород при проходке и эксплуатации, а также снижения возможных поступлений в них воды на участках неоднородностей массива требуется применение мер по укреплению выработок и приконтурной части массива. В соответствии с текущим представлением об облике ПИЛ первой очереди строительства, сформированному в ходе его эволюционной проработки [3], на горизонте – 70 м планируется проходка более 10 сопряжений-съездов из основной технологической выработки в исследовательские (рис. 1).

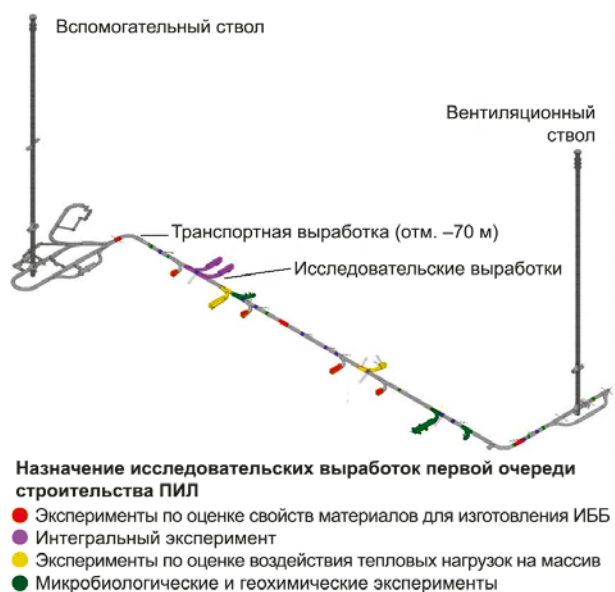


Рис. 1. Схема горных выработок ПИЛ первой очереди строительства с указанием назначения исследовательских выработок

Традиционно они имеют увеличенные площади породных обнажений, что представляет повышенный риск обрушения горных пород и нарушения целостности контура выработки. Породы над площадью сопряжений должны быть укреплены, что позволит снизить деформацию кровли и ликвидировать проникновение воды в выработки. Ниже проанализированы основные подходы к выбору параметров крепления горных выработок с учетом современных технологий, а также примеры их расчёта на основе имеющихся представлений о свойствах и

неоднородности массива скальных горных пород участка «Енисейский».

Определение параметров массива для выбора оптимального крепления горных выработок ПИЛ

На большинстве подземных сооружений проектирование параметров крепи выработок и камер осуществляется на основе оценки качества породного массива с использованием наиболее апробированной международной системы Бартона с вычислением характеризующих его индекса Q [4] и геологического индекса прочности GSI (Geological Strength Index) по методу Хука [5], [6]. Для определения деформационных и прочностных свойств трещиноватого массива по геологическим данным в практике горных работ широко используют критерий прочности Хука — Брауна. При учете его структуры, характера трещиноватости и перехода от свойств массива в ненарушенном образце (Intact Rock) к свойствам трещиноватого массива (Rock Mass) используется геологический индекс прочности GSI. При этом индекс Q включает шесть параметров и определяется по формуле (1) [7]:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}, \quad (1)$$

где RQD — параметр нарушенности массива, по кусковатости керна; J_n — показатель количества систем трещин; J_r — показатель шероховатости поверхности стенок трещин; J_a — показатель измененности поверхностей стенок трещин; J_w — показатель наличия воды в трещинах; SRF — фактор, учитывающий влияние горного давления, с учетом определенных механизмов потери устойчивости выработок в горно-геологических условиях.

Параметр RQD (Rock Quality Designation) отражает грубую оценку процентного содержания крупных кусков керна породного массива, поведение которого под нагрузкой можно ожидать аналогичным реакции лабораторного образца (обычно длиной 10 см). J_n определяется по результатам картирования и съемки трещин, построения диаграммы трещиноватости и выделения на ней систем трещин. J_a характеризует прочностные свойства трещин на сдвиг, если наблюдаются изменения поверхностей трещин типа гидротермальных заполнителей или выветривания. J_w учитывает поровое давление подземных вод, которое снижает прочность породы на срез из-за снижения нормальной составляющей давления. Кроме того, подземные воды могут привести к снижению прочности некоторых

типов пород, содержащих большое количество глинистых частиц. В соответствии с выражением (1) пределы изменения индекса Q находятся в логарифмическом диапазоне 10^{-3} – 10^3 (от весьма неустойчивых до весьма устойчивых). Для массивов из крепких скальных пород его типичное значение составляет 0,01–100 (табл. 1, [9]) и зависит от их нарушенности, выветрелости и обводненности. Для вычисления значений индекса Q также применимы выражения (2) и (3).

$$Q = 10^{(RMR89-44)/21}, \quad (2)$$

$$RMR89 = GSI + 5, \quad (3)$$

где $RMR89$ (Rock Mass Rating) – рейтинг массива горных пород, представляющий собой геомеханическую систему их классификации, разработанную З. Т. Бенявским [8].

Таблица 1. Категории нарушенности массива по индексу Q [9]

| Диапазон значений индекса Q | Категория | Комментарий |
|-------------------------------|-----------|---------------------------------|
| 400–1000 | I | Максимально ненарушенный массив |
| 100–400 | Ia | Крайне ненарушенный массив |
| 40–100 | Iб | Очень ненарушенный массив |
| 10–40 | IIa | Ненарушенный массив |
| 4–10 | IIб | Массив средней нарушенности |
| 1–4 | IIIa | Нарушенный массив |
| 0,1–1 | IIIб | Очень нарушенный массив |
| 0,01–0,1 | IVa | Крайне нарушенный массив |
| 0,001–0,01 | IVб | Исключительно нарушенный массив |

Таблица 2. Предварительные оценки значений индекса Q , GSI и $RMR89$ для горных пород участка «Енисейский»

| Типы горных пород | Q | | GSI | | $RMR89$ | |
|-------------------|-------|--------|-------|------|---------|------|
| | мин | макс | мин | макс | мин | макс |
| Гнейс | 10 | 331,13 | 60 | 92 | 65 | 97 |
| Долерит | 2,13 | 295,12 | 46 | 91 | 51 | 96 |
| Плагиогнейс | 89,12 | 123,02 | 80 | 83 | 85 | 88 |
| Габбро-диабаз | 8,91 | 138,03 | 59 | 84 | 64 | 89 |

В процессе ведения горнопроходческих работ, в частности, запланирован сбор данных для определения индекса Q , что позволит уточнить параметры системы крепления горных выработок. По имеющимся в настоящее время данным выполнены предварительные оценки индексов Q , GSI и рейтинга RMR горных пород участка «Енисейский» (табл. 2) – для расчетов

использовались усредненные значения параметров. Исходя из проведенного ранее анализа можно сделать вывод, что горные породы представляют собой весьма устойчивый, ненарушенный массив.

Выбор типа крепления выработок ПИЛ

Наиболее распространенный способ выбора системы крепления горных выработок на период их проходки и эксплуатации основан на применении эмпирических зависимостей, полученных в натуральных условиях, представленных в виде графика на рис. 2 (диапазоны индекса Q соответствуют показателям, представленным в табл. 1). Данная методика позволяет определить возможные виды крепления (анкер, торкретбетон, комбинированные системы и пр.) под конкретные горно-геологические условия в соответствии с значениями индекса Q . Допускаются также варианты без крепления.

Параметр ESR (Excavation Support Ratio), или коэффициент, характеризующий тип горной выработки, определяется сроком ее службы и назначением. Пример его величин из отрасли добычи полезных ископаемых представлен в табл. 3. Таким образом, для капитальных горных выработок, сооружаемых на весь период эксплуатации предприятия или значительной части этого срока [11], $ESR=1,4$ – $1,6$, для сопряжений $ESR=1,0$ – $1,2$. В качестве примера приводятся значения данного коэффициента для выработок ПАО «ГМК «Норильский никель»: для всех сопряжений – 1; для горно-капитальных и горно-подготовительных – 1,4; для нарезных и очистных – 1,6 [12].

Таблица 3. Значения параметра ESR [13]

| Тип горной выработки | Значения ESR |
|--|----------------|
| Подготовительные | 3,0 – 5,0 |
| Вертикальные: | |
| а) круглого сечения; | 2,5 |
| б) прямоугольного/квадратного сечения. | 2,0 |
| Капитальные горные выработки, дренажные горные | 1,6 |
| Подходные | 1,3 |
| Подземные склады, водоочистные сооружения, порталы, сопряжения и т. д. | 1,0 |

При применении консервативного подхода (нижние значения параметров) в отношении выработок ПИЛ для предварительных расчетов по выбору системы крепления (табл. 4) принимается значение $ESR=0,8$. Тип крепи, или системы крепления выработок ПИЛ, которые будут пройдены в породах, слагающих массив участка

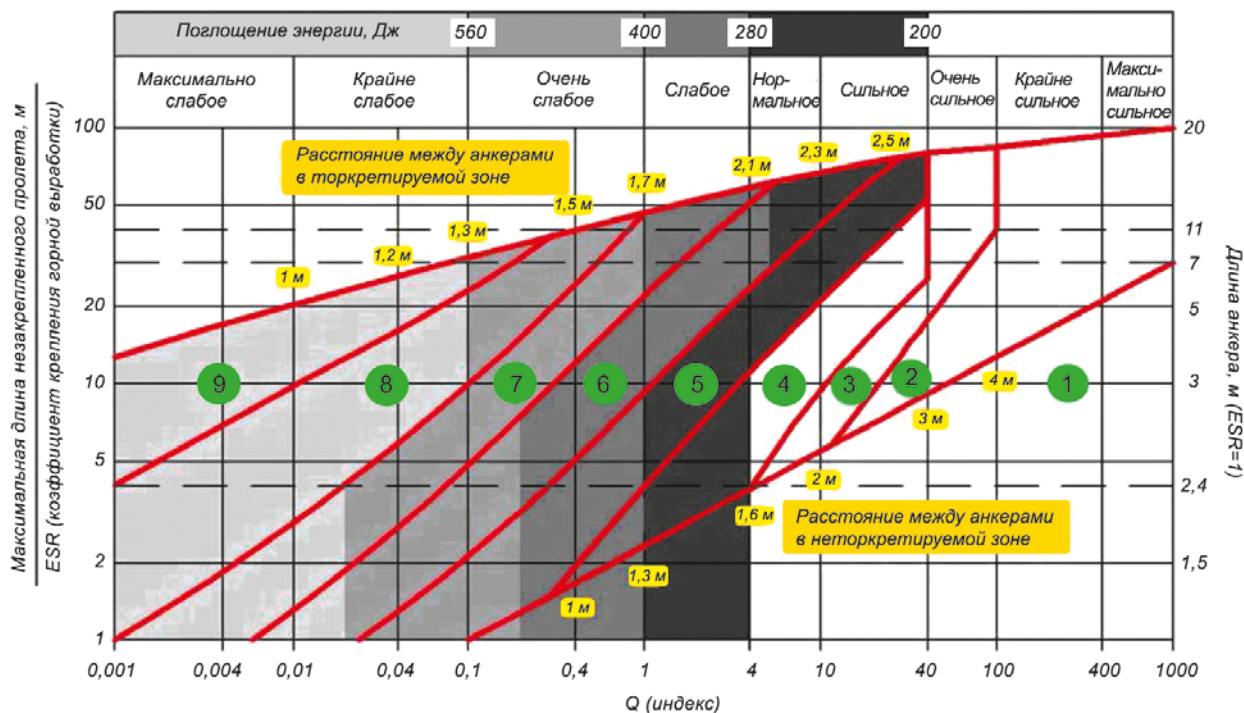


Рис. 2. Номограмма для определения качества массива и типа крепления, согласно значениям индекса Q [10]:
 1 – крепление отсутствует; 2 – локальное крепление анкерами; 3 – крепление анкерами; 4 – крепление анкерами и торкретбетоном (40–100 мм); 5 – фибробетон (50–90 мм) и анкера; 6 – фибробетон (90–120 мм) и анкера; 7 – фибробетон (120–150 мм) и анкера; 8 – фибробетон или торкретбетон, металлическая арочная крепь и анкера; 9 – бетонная (железобетонная) крепь

Таблица 4. Возможные варианты крепления горных выработок ПИЛ, пройденных в различных типах горных пород на отм. – 70 м

| Наименование выработки | Пролет выработки (В), м | B/ESR | индекс Q min max | Тип крепления выработки |
|------------------------|-------------------------|---------|--------------------------|--------------------------------------|
| Транспортная | 4,66 | 5,75 | 10–20 | анкер |
| | | | 20–331,13 | без крепления |
| Исследовательская | 6,01 | 7,51 | 10–35 | крепление анкерами и набрызг-бетоном |
| | | | 35–331,13 | без крепления |
| Сопряжение | 5,66 | 7,07 | 10–35 | крепление анкерами и набрызг-бетоном |
| | | | 35–331,13 | без крепления |

«Енисейский», определены на основе значений индекса Q (см. табл. 1).

По состоянию на текущую дату для проходки горных выработок ПИЛ планируется применить буровзрывной метод, который формирует повышенную техногенную трещиноватость в приконтактной зоне в сравнении с механизированными способами проходки. С учетом глубины зоны наведенной трещиноватости в гнейсах, которая формируется при взрывании шпуровых зарядов, длина анкера при максимальной прочностной характеристике массива должна быть

не менее 1 м, при минимальной — 2 м. К этому значению добавляется величина его заглубления в массив за область активных деформаций (длина замковой части), составляющая не менее 0,35 м, и часть анкера, выступающая в выработку (принимается от 0,05 до 0,1 м) [11]. В табл. 5 представлен предварительный вариант подбора анкеров для транспортной выработки, которая будет пройдена в горных породах, имеющих диапазон значений индекса Q 10–35.

Набрызг-бетонная крепь применяется в качестве изоляционного слоя, предотвращающего негативное воздействие рудничной атмосферы на массив, как самостоятельная, так и в составе с другими видами крепления. Безусловно, его толщина также может варьироваться в зависимости от типа горных пород, в которых пройдена выработка. Соответствующий пример расчета параметров данного слоя для транспортной проходки в горных породах, имеющих диапазон значений индекса Q 10–35, представлен в табл. 6.

Представленные выше предварительные расчеты подтверждают необходимость сбора исходных данных для проведения оценки качества породного массива (индекса Q), а также наглядно демонстрируют вариативность потенциальных типов крепления горных выработок

Таблица 5. Уточненные параметры анкерной крепи для транспортной выработки

| Значение индекса Q | Пролет выработки (В), м | Параметры анкерной крепи | | |
|--------------------|-------------------------|--------------------------|--|---------------------------|
| | | Длина, м | Расстояние между анкерами в ряду × расстояние между рядами анкеров (м × м) | |
| | | | в неторкретируемой зоне | в торкретируемой зоне |
| 10 | 4,66 | 2,8 | СПА, СЗА, ЖБШ – 2,0 × 2,0 | СПА, СЗА, ЖБШ – 2,3 × 2,3 |
| 35 | 4,66 | 2,8 | СПА, СЗА, ЖБШ – 2,3 × 2,3 | СПА, СЗА, ЖБШ – 2,4 × 2,4 |

СПА – сталеполимерная анкерная крепь; ЖБШ – железобетонная штанговая крепь; СЗА – самозакрепляющаяся анкерная крепь.

Таблица 6. Уточненные параметры слоя набрызг-бетонной крепи для транспортной выработки

| Значение индекса Q | Пролёт выработки (В), м | Толщина слоя набрызг-бетонной крепи, мм |
|--------------------|-------------------------|---|
| 10 | 4,66 | 40 |
| 35 | 4,66 | 40 |

в зависимости от участков, в которых они будут пройдены. Соответствующие исследования включены в состав планируемых горнопроходческих работ на участке «Енисейский». По их результатам должны быть определены оптимальные методы крепления горных выработок, в т. ч. исследовательских (рис. 1).

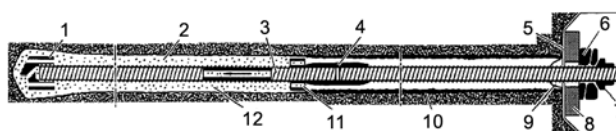
Выбор и обоснование способа крепления выработок крайне важны для стадий строительства и эксплуатации ПИЛ с точки зрения как сроков строительства, наработки технологических подходов для строительства пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО), так и требований к проведению исследований и экспериментов, для которых необходимы открытые участки горных пород, без набрызг-бетонной крепи.

Упрочнение и герметизация массива в приконтурных зонах подземных сооружений ПИЛ

В целях минимизации рисков избыточных водопритоков на участках выработок, пересекающих потенциально водопроводящие зоны, и обеспечения безопасности комплекса подземных сооружений на различных этапах его жизненного цикла предусматривается отработка мер по укреплению и герметизации приконтурной части массива.

Для снижения потенциальных водопритоков необходимо освоить технологию инъекционно-анкерного укрепления массива, с формированием водонепроницаемой зоны в приконтурной части сооружений ПИЛ. Данный метод [14], [15] является одним из наиболее эффективных для упрочнения и герметизации пород путем

нагнетания в трещиноватый массив через шпунты твердеющих составов — цементов и полимерных смол, с получением монолитного смоло-породного конгломерата. При этом давление нагнетания должно быть минимум в 2 раза выше давления воды, заполняющей трещины, для ее вытеснения, в скальных породах — до 15 МПа и выше. Параметры укрепления (состав, темп, давление, режимы нагнетания) определяются при установке экспериментальных инъекционных анкеров с учетом их совместимости с материалами инженерных барьеров безопасности ПГЗРО и отрабатываются в процессе этой процедуры. Имеется широкий выбор инъекционного оборудования для разных типов горных пород, а также применяемых упрочняющих составов. Один из вариантов такой конструкции показан на рис. 3 [16].



1 – буровая коронка, 2 – твердеющий состав, 3 – арматура, 4 – гайка, 5 – шпунтовая стенка, 6 – шайбы, 7 – гайка, 8 – пластина, 9 – пакер, 10 – корж, 11 – распорка, 12 – цементный наполнитель

Рис. 3. Вариант конструкции инъекционного анкера

Долговременная устойчивость инъекционных анкеров определяется устойчивостью к выщелачиванию солями подземных вод высокопрочного бетона, получаемого из мелкодисперсного микроцемента (геоцемента, помол частиц до 0,02 мм), используемого для нагнетания в трещины породного массива, на отрезке 10 см и составляет 300 лет [17]. Металлический анкер с полимерным покрытием в местах контакта с водой корродирует до 300 лет [18].

Укрепление горных выработок, в том числе для подавления фильтрации подземных вод, активно применяется на объекте Forsmark (Швеция) [19], подземные сооружения которого расположены вблизи береговой линии, в скальных породах [20]. Данный подход позволяет существенно повысить безопасность в процессе

проходки выработок и их эксплуатации. Согласно опыту шведской компании SKB, эксплуатирующей с 1988 г. объект для изоляции средне- и низкоактивных радиоактивных отходов (САО и НАО) Forsmark, а также ПИЛ Aspö [21], рекомендуется применять метод укрепления пород горизонтальных выработок в зонах разрывных нарушений полным веером шпуров или скважин (рис. 4 и 5) [22]. Аналогичные технологические решения планируется использовать и при строительстве комплекса подземных сооружений ПИЛ и ПГЗРО участка «Енисейский» — в местах вскрытия горными выработками нарушенных или ослабленных зон массива.

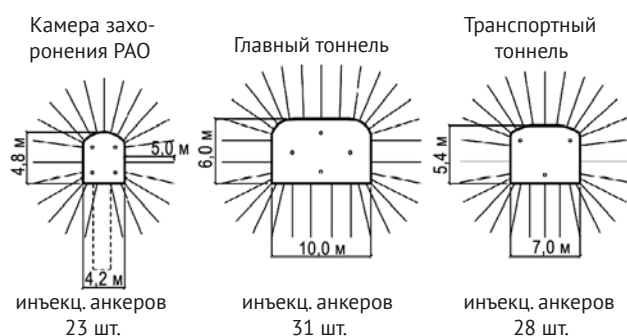


Рис. 4. Укрепление выработок и подавление фильтрации подземных вод в зонах разрывных нарушений полным веером инъекционно-анкерной крепи [22]



Рис. 5. Нагнетание упрочняющего состава в трещиноватые породы с помощью скважин для формирования в приконтурной части массива уплотненной зоны [22]

С этой целью планируется предварительное бурение на нескольких участках контрольных скважин с получением кернов для проверки степени заполнения трещин в массиве и оценки изоляции выработок от подземных вод. При проходке вертикальных стволов предусмотрена система предварительного укрепления участков

разрывных нарушений массива полным веером шпуров или скважин (рис. 6). Аналогичные испытания данной технологии для горизонтальных и наклонных горных выработок, вскрывающих трещинные зоны, запланированы в сооружаемой в гранитном массиве ПИЛ Beishan (КНР) [23].

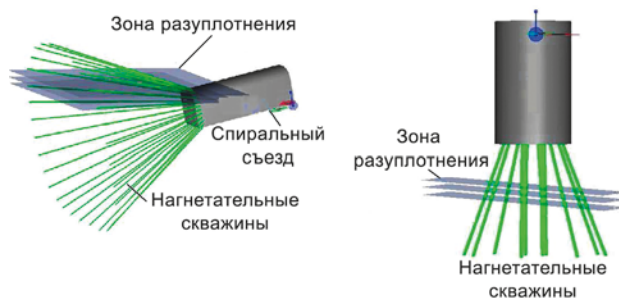


Рис. 6. Предварительное (опережающее) инъекционное укрепление разрывных нарушений породного массива полным веером шпуров при проходке вертикальных и горизонтальных выработок на глубинах более 200 м [22]

Пройденные веера скважин и/или шпуров, предназначенные для укрепления массива горных пород, могут быть задействованы для исследований по его характеристике — уточнения геологических и гидрогеологических параметров. Получение данных о приконтурной зоне породного массива, в т. ч. на участках нарушений, а также прочих неоднородностей геологической среды, будет являться существенным вкладом в развитие работ по расчетному обоснованию долговременной безопасности захоронения радиоактивных отходов (РАО). Подход, который подразумевает комплексное использование скважин, пройденных из горных выработок ПИЛ, применяется и в зарубежной практике [24]. Выбор пилотного участка для тестирования технологии укрепления горизонтальных выработок должен выполняться исходя из:

- детальных представлений о геолого-гидрогеологическом строении массива (по итогам исследований при проходке горных выработок ПИЛ);
- возможности унификации скважин и/или шпуров для выбора технологических решений по укреплению массива, методик и оборудования для его геологической и гидрогеологической характеристики.

Предварительные работы и реализация технологий должны проводиться силами профильных организаций, имеющих опыт и соответствующее горное оборудование. При этом на данной стадии нужна подготовка комплекта необходимой документации, включая методики испытаний, технические решения, проведение оценки ресурсного и аналитического обеспечения, с

учетом выполнения сопутствующих видов исследований, в частности уточнения строения массива и его гидрогеологических параметров.

Заключение

Для оптимизации сроков строительства и обеспечения условий дальнейшего безопасного функционирования ПИЛ, согласно назначению [26], в процессе ее создания и эксплуатации планируется освоить методику определения параметров крепи или систем крепления выработок на основе оценки качества породного массива. С этой целью в программе исследований предусмотрены: количественная и качественная оценки состояния массива, а также определение глубины зон наведенной трещиноватости от детонации взрывчатых веществ.

Применение гибкого подхода к выбору и обоснованию типа и конструкции крепи, в т. ч. отказ от набрызг-бетона, на различных участках горных выработок позволит создать необходимые условия для выполнения исследований и экспериментов в ПИЛ.

На участках вскрытия горизонтальными выработками зон неоднородностей в массиве, для которых характерны малые значения индекса Q , рекомендуется применять усиленную комбинированную крепь, состоящую из инъекционных анкеров, металлической сетки (армокаркасов) и торкретбетона (набрызг-бетона).

При корректировке проектных решений в части применяемых систем крепления горных выработок рекомендуется использовать уточненные параметры крепи по результатам численного моделирования.

При подготовке решений по созданию ПИЛ должны быть предусмотрены условия для выполнения исследований, направленных на отработку технологий повышения устойчивости горных выработок и предотвращения поступления в них подземных вод.

Выбор участков для этих целей на стадии эксплуатации ПИЛ целесообразно проводить по итогам комплексного доизучения массива горных пород при их проходке. Уже в настоящее время необходимо начать рассмотрение предпочтительных вариантов технологий и планирование состава работ в комплексе подземных сооружений. В подготовительный период рекомендуется создать регламент количественной оценки состояния массива и инструкцию по креплению горных выработок, которая будет включать методики аналитических и численных расчетов параметров крепления.

Также в рамках периодической актуализации состава исследований в ПИЛ необходимо оценить потребности для их проведения в наземных условиях и подземном комплексе горных выработок, определить перечень исследовательского и технологического оборудования, выбрать методики проведения экспериментов.

Литература

1. Кочкин Б. Т., Мальковский В. И., Юдинцев С. В. Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект). — М. : ИГЕМ РАН, 2017. 384 с.
2. Морозов О. А. Разведочное бурение с отбором ориентированного керна на участке «Енисейский»: первые результаты // Радиоактивные отходы. 2024. № 2 (27). С. 69–79. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-2-69-79.
3. 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.
4. Barton N. R., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support // Rock Mechanics and Rock Engineering. 1974. Vol. 6. No. 4. Pp. 189–236. DOI: 10.1007/bf01239496.
5. Marinos V., Marinos P., Hoek E. The geological strength index: applications and limitations // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2005. Vol. 64. No. 1. Pp. 55–65. DOI: 10.1007/s10064-004-0270-5.
6. Hoek E., Carter T. G., Diederichs M. S. Quantification of the geological strength index chart // Proceedings of 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. San Francisco, CA, USA, June 23–26, 2013.
7. Grimstad E., Barton N. Updating of the Q -system for NMT. Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete // Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support. 1993. No. 22–26. Pp. 46–66.
8. Bieniawski Z. T. Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering. New York, A Wiley-Interscience Publication, 1989. 272 p. ISBN 0-471-60172-1.
9. Еременко В. А., Айнбиндер И. И., Марысюк В. П., Наговицин Ю. Н. Разработка инструкции по выбору типа и параметров крепи выработок рудников Талнаха на основе количественной оценки

- состояния массива // Горный журнал. 2018. № 10. С. 101–106. DOI: 10.17580/gzh.2018.10.18.
10. Using the Q-system: Rock mass classification and support design. Oslo, Norwegian Geotechnical institute (NGI), 2015. 54 p.
11. ГОСТ Р 57719-2017. Горное дело. Выработки горные. Термины и определения.
12. Онуприенко В. С., Еременко А. А., Шапошник Ю. Н., Копытов А. И. Выбор типов и параметров крепей в условиях подземной отработки апатит-нефелиновых месторождений // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 2 (156). С. 56–70. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-2-56-70.
13. Бушков В. К., Шеметов Р. С. Определение устойчивости и обоснование систем крепления горных выработок при переходе к отработке Олимпиадинского месторождения подземным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 9. С. 40–54. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-40-54.
14. Заславский Ю. З., Лопухин Е. А. Инъекционное упрочнение горных пород. — М. : Недра, 1984. 177 с.
15. Кузьмин Е. В. Упрочнение горных пород при подземной добыче руд. — М. : Недра, 1991. 252 с.
16. Сайт <http://www.minova.cz/> — URL: https://is.vstecb.cz/th/qi114/2_TL_kotevni_tyce_Titan.pdf?kod=EKS;lang=en (дата обращения: 19.08.2024).
17. Гатауллин Р. М., Давиденко Н. Н., Свиридов Н. В., Сорокин В. Т. и др. Контейнеры для радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности. — М. : Логос, 2012. 255 с.
18. Игин И. М., Минин А. В., Кузьмин Е. В., Бамборин М. Ю., Зубков А. А., Трофимова Ю. В. Возможности изоляции модульных сооружений ППЗРО термопластичными полимерами // Радиоактивные отходы. 2023. № 1 (22). С. 28–37. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-28-37.
19. Site Engineering Report – SER – Projekt SFR utbyggnad. Anders Carlsson, Carlsson GeoEngineering AB Derek Martin, University of Alberta Rolf Christiansson, Svensk Kärnbränslehantering AB. October 2014. Svensk Kärnbränslehantering AB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co).
20. This is where Sweden keeps its radioactive operational waste — URL: <https://skb.com/our-operations/sfr/> (дата обращения: 19.08.2024).
21. The Äspö Hard Rock Laboratory // skb.com : [сайт]. — URL: <https://skb.com/research-and-technology/laboratories/the-aspö-hard-rock-laboratory> (дата обращения: 19.08.2024).
22. Underground Design Forsmark, Layout D2 Grouting, Martin Brantberger, Ramböll, Thomas Janson, Tyréns AB, July 2009. Svensk Kärnbränslehantering AB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co).
23. 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. Iss. 3. Pp. 411–435. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.03.002.
24. Ericsson L. O., Brinkhoff P., Gustafson G., Kvartsberg S. Hydraulic Features of the Excavation Disturbed Zone — Laboratory investigations of samples taken from the Q- and S-tunnels at Äspö HRL. R-09-45. December 2009. Svensk Kärnbränslehantering AB.
25. НП-100-17. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов.

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@nora.ru.

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

Еременко Виталий Андреевич, доктор технических наук, профессор РАН, директор научно-исследовательского центра «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии», профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1), e-mail: prof.eremenko@gmail.com.

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.

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.

Минаев Василий Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геоинформатики, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: minaev2403@mail.ru.

Библиографическое описание статьи

Дерябин С. А., Кузьмин Е. В., Шевцова Е. В., Еременко В. А., Казаков К. С., Бамборин М. Ю., Минаев В. А. Об укреплении горных выработок при строительстве ПИЛ на участке «Енисейский» (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. 2025. № 1 (30). С. 98–108. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-1-98-108.

GROUTING AND LINING METHODS PROPOSED FOR URL TUNNELS AND SHAFTS AT THE YENISEYSKIY SITE (KRASNOYARSK REGION, RUSSIA)

Deryabin S. A.¹, Kuzmin E. V.¹, Shevtsova E. V.¹, Eremenko V. A.²,
Kazakov K. S.³, Bamborin M. Yu.¹, Minaev V. A.⁴

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

²National Research Technological University “MISIS”, Moscow, Russia

³Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on October 23, 2024

The designs of the underground research laboratory (URL) at the Yeniseyskiy site provide for two vertical shafts and a complex involving a few horizontal access and research tunnels to be excavated as phase one of the project. The URL tunnels will be excavated at a depth of 525 m below the daylight surface (or – 70 m below the Baltic Sea level). Rock sections with different strength levels will be penetrated by excavations, which has been confirmed by geological exploration. Taking into account the purpose of the tunnels and shafts, a differentiated approach to the selection of mining support structures is required during their construction, in particular, providing for some strengthening methods to be applied in most challenging areas of the rock mass. Therefore, at the URL construction stage, grouting and lining methods should be refined and tested in the border zone of the excavations.

Keywords: *underground research laboratory, Yeniseyskiy site, rock massif, R&D Programme, grouting, rock-bolt support, concrete lining, excavation, lining, research tunnels, properties of rocks, radioactive waste.*

References

1. Kochkin B. T., Malkovsky V. I., Yudintsev S. V. *Nauchnyye osnovy otsenki bezopasnosti geologicheskoy izolyatsii dolgozhivushchikh radioaktivnykh otkhodov (Yeniseyskiy proyekt)* [Scientific basis for the safety assessment of long-lived radioactive waste and their geological disposal (Yeniseyskiy project)]. Moscow, IGE M RAN Publ., 2017. 384 p.

2. Morozov O. A. Razvedochnoe burenie s otborom orientirovannogo kerna na uchastke “Eniseyskiy”: pervye rezul'taty [Exploratory Drilling with Oriented Core Sampling at the Yeniseyskiy Site, the First Results]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2024, no. 2 (27), pp. 69–79. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-2-69-79.

3. Abramov A. A., Bolshov L. A., Dorofeev A. N., Igin I. M., Kazakov K. S., Krasilnikov V. Y., Linge I. I.,

- Trokhov N. N., Utkin S. S. Podzemnaya issledovatel'skaya laboratoriya v Nizhnekanskom massive: ehvolyucionnaya prorabotka oblika [Underground Research Laboratory in the Nizhnekanskiy Massif: Evolutionary Design Study]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 1 (10), pp. 9–21. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-9-21.
4. Barton N. R., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1974, vol. 6, no. 4, pp. 189–236. DOI: 10.1007/bf01239496.
5. Marinos V., Marinos P., Hoek E. The geological strength index: applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2005, vol. 64, no. 1, pp. 55–65. DOI: 10.1007/s10064-004-0270-5.
6. Hoek E., Carter T. G., Diederichs M. S. Quantification of the geological strength index chart. *Proceedings of 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. San Francisco, CA, USA, June 23–26, 2013.
7. Grimstad E., Barton N. Updating of the Q-system for NMT. Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete. *Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*, 1993, no. 22–26, pp. 46–66.
8. Bieniawski Z. T. Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering. New York, A Wiley-Interscience Publication, 1989. 272 p. Pp. 40–47.
9. Eremenko V. A., Ainbinder I. I., Marysyuk V. P., Nagovitsin Yu. N. Razrabotka instruktsii po vyboru tipa i parametrov krepi vyrabotok rudnikov Talnakha na osnove kolichestvennoy otsenki sostoyaniya massiva [Guidelines for Selecting Ground Support System for the Talnakh Operations Based on the Rock Mass Quality Assessment]. *Gornyy zhurnal — Mining Journal*, 2018, no. 10, pp. 101–106. DOI: 10.17580/gzh.2018.10.18.
10. Using the Q-system: Rock mass classification and support design. Oslo, Norwegian Geotechnical institute (NGI) Publ., 2015. 54 p.
11. GOST R 57719-2017. Gornoye delo. Vyrabotki gornyye. Terminy i opredeleniya [Mine working. Terms and definitions].
12. Onupriyenko V. S., Eremenko A. A., Shaposhnik Yu. N., Kopytov A. I. Vybor tipov i parametrov krepey v usloviyakh podzemnoy otrabotki apatit-nefelinovykh mestorozhdeniy [Selection of Types and Parameters of Supports in the Conditions of Underground Mining of Apatite-Nepheline Deposits]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2023, no. 2 (156), pp. 56–70. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-2-56-70.
13. Bushkov V. K., Shemetov R. S. Opredeleniye ustoychivosti i obosnovaniye sistem krepleniya gornyykh vyrabotok pri perekhode k otrabotke Olimpiadinskogo mestorozhdeniya podzemnym sposobom [Stability Estimation and Justification of Support Systems in Transition to Underground Mining in the Olimpiada Deposit]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) — Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2020, no. 9, pp. 40–54. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-40-54.
14. Zaslavskiy Yu. Z., Lopukhin E. A. In'yektsionnoye uprochneniye gornyykh porod [Injection hardening of rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 177 p.
15. Kuz'min E. V. Uprochneniye gornyykh porod pri podzemnoy dobyche rud [Rock strengthening during underground ore mining]. Moscow, Nedra Publ., 1991. 252 p.
16. <http://www.minova.cz/>: [web-site]. — URL: https://is.vstecb.cz/th/q1114/2_TL_kotevni_tyce_Titan.pdf?kod=EKS;lang=en (accessed on: 19.08.2024).
17. Gataullin R. M., Davidenko N. N., Sviridov N. V., Sorokin V. T. et al. Konteynery dlya radioaktivnykh otkhodov nizkogo i srednego urovnya aktivnosti [Containers for low-level and intermediate-level waste]. Moscow, Logos Publ., 2012. 255 p.
18. Igin I. M., Minin A. V., Kuzmin E. V., Bamborin M. Yu., Zubkov A. A., Trofimova Iu. V. Vozmozhnosti izolyatsii modul'nykh sooruzheniy PPZRO termoplastichnymi polimerami [Opportunities for modular NSDF structure insulation by thermoplastic polymers]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2023, no. 1 (22), pp. 28–37. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-28-37.
19. Site Engineering Report – SER – Projekt SFR utbyggnad. Anders Carlsson, Carlsson GeoEngineering AB Derek Martin, University of Alberta Rolf Christiansson, Svensk Kärnbränslehantering AB. October 2014. Svensk Kärnbränslehantering AB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co).
20. This is where Sweden keeps its radioactive operational waste — URL: <https://skb.com/our-operations/sfr/> (accessed on: 19.08.2024).
21. The Äspö Hard Rock Laboratory. [skb.com](https://skb.com/research-and-technology/laboratories/the-aspö-hard-rock-laboratory). — URL: <https://skb.com/research-and-technology/laboratories/the-aspö-hard-rock-laboratory> (accessed on: 19.08.2024).
22. Underground Design Forsmark, Layout D2 Grouting, Martin Brantberger, Ramböll, Thomas Jansson, Tyréns AB, July 2009. Svensk Kärnbränslehantering AB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co).
23. 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, iss. 3, pp. 411–435. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.03.002.

24. Ericsson L. O., Brinkhoff P., Gustafson G., Kvarnberg S. Hydraulic Features of the Excavation Disturbed Zone – Laboratory investigations of samples taken from the Q- and S-tunnels at Äspö HRL. R-09-45. December 2009. Svensk Kärnbränslehantering AB.

25. NP-100-17. *Federal'nyye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii. Trebovaniya k sostavu i sodержaniyu otcheta po obosnovaniyu bezopasnosti punktov zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov* [Federal norms and rules in the field of atomic energy use Requirements for the Composition and Content of Safety Analysis Reports for Radioactive Waste Disposal Facilities].

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: SADeryabin@norao.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.

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.

Eremenko Vitaly Andreevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Director of the Research Center “Applied Geomechanics and Convergent Mining Technologies”, Professor of the Department of Physical Processes of Mining and Geocontrol, National Research Technological University “MISIS” (4, bld. 1, Leninskiy Prospekt, Moscow, 119049, Russia), e-mail: prof.emenko@gmail.com.

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

Bamborin Mikhail Yurievich, PhD, Head of 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.

Minaev Vasily Alexandrovich, PhD, Head of Geoinformatics Laboratory, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetny Lane, Moscow, 119017, Russia), e-mail: minaev2403@mail.ru.

Bibliographic description

Deryabin S. A., Kuzmin E. V., Shevtsova E. V., Eremenko V. A., Kazakov K. S., Bamborin M. Yu., Minaev V. A. Grouting and lining methods proposed for url tunnels and shafts at the Yeniseyskiy site (Krasnoyarsk region, Russia). *Radioactive Waste*, 2025, no. 1 (30), pp. 98–108. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-1-98-108. (In Russian).