

ИЗУЧЕНИЕ СОСТОЯНИЯ МАССИВА ПОРОД ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОДЗЕМНОЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ КАК ЭТАП ПОЛУЧЕНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНОК БЕЗОПАСНОСТИ ПГЗРО

В. С. Гупало¹, К. С. Казаков⁴, Д. В. Крючков⁴, А. Н. Панкратенко², М. С. Плешко²,
А. С. Вознесенский¹, Р. М. Гайсин¹, В. В. Мосейкин³

¹Кафедра физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ «Московский институт стали и сплавов», Москва

²Кафедра строительства подземных сооружений НИТУ «Московский институт стали и сплавов», Москва

³Кафедра геологии и маркшейдерского дела НИТУ «Московский институт стали и сплавов», Москва

⁴Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 26 февраля 2019 г.

На основе анализа зарубежного и отечественного опыта изучения массивов пород в подземных исследовательских лабораториях и их аналогах, а также требований задач обоснования безопасности приведены основные направления работ по научному сопровождению строительства ПИЛ. Представлен краткий обзор применяемых прямых и косвенных методов определения характеристик массива. Рассмотрены вопросы совмещения исследовательских работ, выполняемых на земной поверхности и в горных выработках, со строительным циклом проходки.

Ключевые слова: подземная исследовательская лаборатория, комплекс исследований *in situ*, состояние массива, строительство ПИЛ.

Обоснование пригодности участка недр для создания пункта захоронения радиоактивных отходов в глубоких геологических формациях представляет собой последовательный многостадийный процесс, включающий исследования в масштабах «район», «площадка», «участок». Для выполнения детализированных (расширенных) исследований и окончательного подтверждения пригодности геологических участков для размещения пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) в мировой практике создаются и функционируют подземные исследовательские лаборатории [1, 2]. Результаты выполняемых в них исследований должны обеспечить основной объем данных, необходимый для оценок безопасности объекта, и способствовать демонстрации надежности

захоронения радиоактивных отходов (РАО) в целом. При этом представительность и полнота таких натурных исследований в значительной степени будут определять доверие к формируемым оценкам безопасности.

В ближайшее время в РФ запланировано начало работ по проходке капитальных горных выработок подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) [3, 4, 5].

Горнопроходческие работы являются одним из наиболее информативных периодов для получения данных о строении и свойствах породного массива, происходящих в нем процессах и реакции горных пород на проводимые проходческие работы. На этой стадии сооружения ПИЛ появляется возможность с большой детальностью исследовать строение массива горных

пород на различных гипсометрических уровнях, фиксировать распространение и внутреннее строение зон нарушений и осуществлять отбор проб. Происходящее воздействие проходческих работ на горные породы с сопутствующим ему изменением естественных и искусственных физических полей в массиве также может служить источником информации о его строении, потенциальных путях фильтрации подземных вод. Это определяет важность использования этого периода для получения детальной информации о массиве горных пород, формирования понимания о происходящих в нем процессах.

В соответствии с этим целью настоящей статьи является краткий анализ зарубежного и отечественного опыта исследований в подземных исследовательских лабораториях и их аналогах, а также требований задач обоснования безопасности для определения основных направлений исследовательских работ на стадии строительства ПИЛ [6].

В разных странах решение вопроса исследования массива на стадии создания ПИЛ находит отражение как в особых конструктивных решениях объекта — выработках, оконтуривающих область захоронения, исследовательских камерах на промежуточных интервалах глубин и т. д., так и в применении различных методов исследований.

Так как ПИЛ в Нижнеканском массиве является первой очередью ПГЗРО, вопросу выбора измерительных технологий должно быть уделено особое внимание.

Результатом исследований на данной стадии работ должно явиться:

- устранение существующих неопределенностей в геологическом строении участка строительства;
- уточнение ранее созданных по результатам геологоразведочных работ моделей геологической среды;
- получение данных о физических процессах и начальных параметрах пород в массиве, дальнейшее определение которых, вследствие воздействия на него строительных работ, будет невозможно;
- оценка эффективности инженерно-технических приемов, применяемых при строительстве, для обеспечения безопасности ПГЗРО;
- определение и оценка изменений состояния геологической среды при выполнении строительных работ.

При этом, вне зависимости от стадии изучения предполагаемого для захоронения массива горных пород, результаты исследований могут быть сгруппированы по следующим блокам исходных данных [7]:

- параметры, характеризующие структурно-тектоническое строение массива пород: зоны разрывных нарушений, зоны трещиноватости различного порядка и генезиса, монолитные участки;
 - гидрогеологические характеристики элементов массива и параметры движения подземных вод;
 - характеристики процессов физико-химического взаимодействия подземных вод и горных пород с материалами инженерных барьеров.
- Дальнейшее рассмотрение видов работ будет выполнено в привязке к данным направлениям (рис. 1).



Рис. 1. Задачи исследований при проходке выработок ПИЛ

Исследования в подземных условиях

Детализация структурного строения массива горных пород, параметров трещиноватости по глубине массива

Трещиноватость — один из наиболее значимых факторов, влияющих на безопасность захоронения РАО в скальных породах. Повышение трещиноватости, связанное с проведением горных работ и перераспределением напряжений вокруг горных выработок, будет приводить к увеличению проницаемости геологической среды и контакту упаковок РАО с подземными водами. Трещиноватость также влияет на прочность и устойчивость горных пород; характер и интенсивность проявления деформаций; влагоемкость и водопроницаемость; на температурный режим массива; его сейсмические характеристики и т. д.

Традиционно изучение параметров трещиноватости для уточнения модели строения скального массива осуществляется на основе исследований породных обнажений выработок, керн скважин, а также применения комплекса геофизических методов.

Исследование породных обнажений осуществляется на всей протяженности выработок и выполняется на участке временного отставания крепи от забоя [8]. В ходе исследования выполняется картографирование незакрепленных участков (подробное геологическое описание), описание состава пород, их структурно-тектонических особенностей, степени выветрелости, формы и размера отдельностей пород. Визуально выделяются основные системы трещин с описанием морфологии их поверхности, состава и строения заполнителя. В ходе описания, отдельно по каждой из выделенных систем, осуществляются массовые замеры элементов залегания трещин и характеризующие их

параметры: видимая длина, раскрытие, состав заполнителя, расстояние между трещинами.

Кроме того, на данном этапе осуществляется отбор проб образцов для получения подробных петрологических, минералогических и структурных характеристик различных элементов массива.

Вместе с тем такой объем исследований не позволит охарактеризовать распределение трещиноватости по глубине массива. Это определяет необходимость дополнения данных измерений комплексом скважинных методов исследований, применяемых также и при определении параметров нарушенной приконтурной зоны выработок.

Оценка влияния горнопроходческих работ на размеры зоны техногенных нарушений и ее параметры

В связи с тем, что проходку горных выработок в ПИЛ запланировано осуществлять буровзрывным способом, обуславливающим увеличенные размеры нарушенной приконтурной зоны, особое внимание в ходе исследований должно быть уделено изменениям трещиноватости по глубине массива. Показатели трещиноватости массива как в естественном состоянии, так и в результате воздействия проходческих работ определяются на основе бурения и последующего обследования скважин различного назначения. Для оценки трещиноватости при бурении используются такие критерии, как удельная кувшоватость и выход керна. Недостатком данного метода является невозможность разделения естественной трещиноватости и дополнительно созданной проходческими работами, а также сложность контроля развития нарушенной приконтурной зоны во времени (рис. 2).

Для разделения «природной» и «техногенной» трещиноватости отдельными исследовательскими

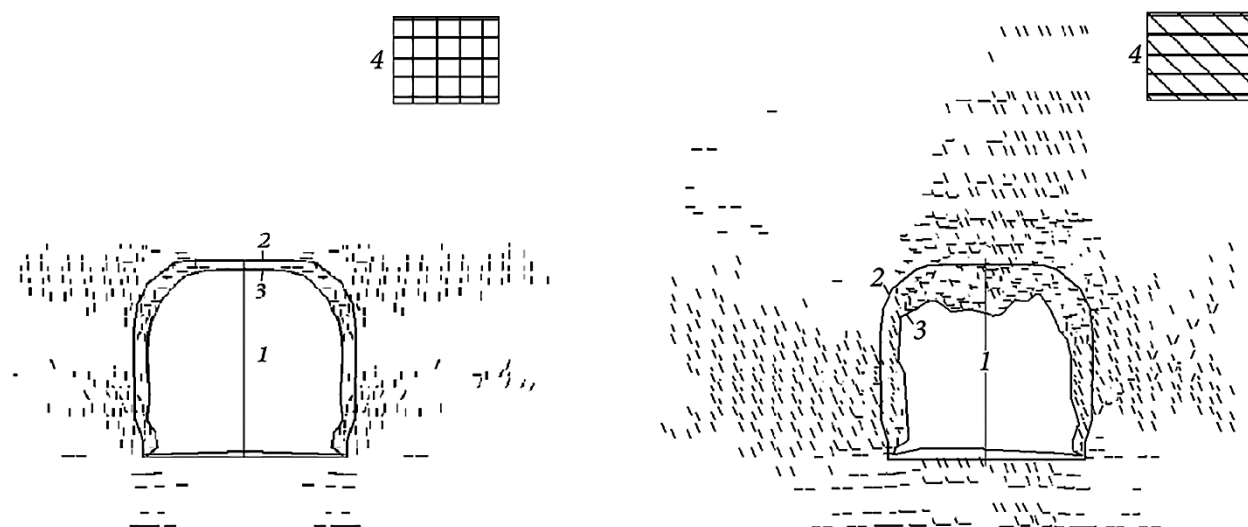


Рис. 2. Пример формы нарушенной приконтурной зоны выработки для различных начальных систем ослабления массива [9]:
1 — выработка; 2 и 3 — контур сечения выработки, начальной и деформированной, соответственно;
4 — ориентация начальной трещиноватости массива

программами ПИЛ [10] предусмотрено бурение опережающих проходку ствола крутонаклонных скважин небольшого диаметра (вдоль проектного контура) с последующим заполнением их материалом на основе эпоксидной смолы. Выбуривание данного материала после проходки выработок позволит выделить и охарактеризовать вновь образованные в результате взрывных работ трещины.

Оценка эволюции нарушенной приконтурной зоны во времени, в т. ч. в результате влияния работ по созданию соседних выработок, сопряжена с организацией долговременных наблюдений с использованием комплекса измерительных процедур [12]. При этом важным этапом таких работ является установление начального состояния массива.

Широкое применение в составе таких комплексов получили методы видео- и ультразвукового каротажа. Системы акустического или оптического видеокаротажа позволяют производить запись развернутого 3D изображения стенки скважины по всей окружности и решать связанную с анализом керна проблему восстановления его ориентации. Оценка параметров раскрытия трещин массива осуществляется акустическими методами, используя изменения скоростей распространения продольных, поперечных и поверхностных волн, коэффициентов затухания, а также частотные и фазовые спектры упругих импульсов.

Изменение проницаемости массива горных пород, происходящее в результате образования нарушенной приконтурной зоны, оценивается методом поинтервального нагнетания воды в скважинах, пробуренных из выработок. Для возможности комплексной оценки нарушенности массива бурение таких скважин целесообразно осуществлять вблизи геофизических скважин.

Установление интенсивности процессов развития техногенной трещиноватости во времени требует организации режимных замеров деформаций контура выработки — на стадии проходки, с расширением точек контроля вглубь массива — в эксплуатационный период.

Выявление локальных участков с активным трещинообразованием (и определение динамики напряженно-деформированного состояния) осуществляется на основе исследований с использованием метода акустической эмиссии [10, 11]. В основе метода лежит регистрация упругих волн, возникающих при образовании дефектов под влиянием различных внешних и внутренних факторов. В качестве источников акустической эмиссии в горных породах выступают рост или закрытие микро- и макротрещин, схлопывание пор — процессы, связанные с изменением структуры твердых тел под влиянием различных внешних и внутренних факторов. Под действием нагрузок происходит активация дефектов, которые

получают возможность излучать акустико-эмиссионные сигналы задолго до наступления макроразрушения.

Измерение величин и ориентировок действующих напряжений

Величины напряжений, их ориентировка являются факторами, определяющими возникновение систем водопроводящих трещин в массиве горных пород и формирующими таким образом его проницаемость [15].

При проходке вертикальных выработок, для определения природного поля напряжений и изменения его компонент с глубиной, измерения осуществляются на нескольких горизонтах в скважинах, пробуренных вдоль простирания, вкрест простирания и под углом 45° к простиранию крупных тектонических разломов.

В зависимости от места проведения измерений и стадии исследования возможно применение методов гидроразрыва, щелевой и торцевой разгрузки, а также их комбинаций с другими методами [11, 13].

Выполнение приведенного комплекса исследований, таким образом, даст информацию о характере распределения трещиноватости от контура выработки вглубь массива, его напряженному состоянию, упругим и прочностным свойствам, анизотропии и неоднородности пород.

Гидрогеологические исследования

Другим значимым направлением работ, определяющим безопасность изоляции отходов в подземной среде, является установление параметров движения подземных вод.

Изучение гидрогеологических условий вскрываемых пород на стадии проходки выработок также должно осуществляться в процессе поинтервального продвижения забоя выработки, обнажения породного массива и изучения параметров его водообильности на исследуемом интервале. Комплекс измерений включает в себя визуальную характеристику водопроницаемости массива горных пород, оценку масштабов фильтрации по различным зонам разрывных нарушений, установление динамики водопритоков по ним [15].

Дополнительными методами, широко применяемыми при решении гидрогеологических задач, являются геофизические, основным из которых является электрометрия, как наиболее чувствительная к изменению водонасыщенности пород. Выделение блоков массива с различным водонасыщением возможно осуществлять на основе разности их удельного электрического сопротивления.

Для определения направлений перемещения подземных вод по мере проходки и развития

горных работ, в дополнение к вышеприведенным методам, в зарубежной практике [16] получила применение томография потока жидкости. Данное исследование основано на измерении потенциала потока подземных вод, возникающего в результате взаимодействия между движущейся водой и искусственным потенциалом, создаваемым электродами, размещенными на поверхности земли.

Гидрогеохимические исследования

Параллельно с гидрогеологическими измерениями осуществляется отбор проб подземных вод для проведения химического анализа и гидрогеохимических исследований. Такие исследования являются «прямыми» (и самыми надежными) методами установления связи поверхностных и подземных вод и основаны на прослеживании и сопоставлении химического состава вод в области питания и разгрузки.

Химический состав вод в подземных условиях определяется по пробам, полученным в исследовательских скважинах, пробуренных на различных глубинах; водосборных колодцах; точках просачивания на открытой поверхности породы.

Таким образом, анализ проб воды из областей питания и разгрузки позволит оценить время и скорость ее движения, определить связь поверхностных и подземных вод, провести оценку влияния на гидравлические свойства среды и химический состав подземных вод зон разрывных нарушений, способствующих быстрой фильтрации на значительные глубины.

Последующее изучение гидрогеохимического режима подземных вод в интервале глубин расположения выработок подземной лаборатории должно осуществляться на основе стационарных гидродинамических пунктов. Для этого на стадии проходки выработок в подошве, стенах и кровле выработок бурятся исследовательские и наблюдательные скважины.

Гидродинамические посты организуются в местах наиболее крупных нарушений и в узлах пересечения тектонических зон.

Результатом таких исследований является установление интервалов водоносности горных пород, их водообильности, фильтрационных свойств различных элементов массива, а также характера межинтервальной взаимосвязи и химического состава подземных вод и другой гидрогеологической информации.

Исследования с земной поверхности

Комплекс исследований с земной поверхности на стадии проходки выработок направлен на получение данных, необходимых для интерпретации результатов подземных измерений, а также выявление информативных изменений

физических полей в массиве, вызванных воздействием проходческих работ на горные породы.

Детализация структурно-тектонических и геомеханических условий массива горных пород на участке размещения ПИЛ

Для выделения высокопроницаемых дизъюнктивных нарушений выполняются высокоточные планово-высотные измерения местоположения элементов структурно-тектонической нарушенности, включающие [17, 18]:

- высокоточную нивелировку первого класса от ближних разломов;
- планово-высотные измерения местоположения элементов структурно-тектонической нарушенности;
- линейно-угловые измерения и нивелирование первого класса в геодезических треугольниках.

На основе данных измерений осуществляется выделение проницаемых зон, выполняются количественные оценки взаимосвязи дезинтеграции породного массива от техногенных и природных факторов с гидрогеологическими и гидрогеологическими процессами, проводится реконструкция и делается прогноз напряженно-состояния породного массива с учетом взаимосвязи с проницаемостью.

Другим методом пространственной детализации структурно-тектонических и геомеханических условий горных пород вокруг выработок во время проходки, получившим распространение в практике зарубежных ПИЛ, является обратное вертикальное сейсмическое профилирование с использованием различных источников вибрации, происходящих из подземных выработок [19, 20]. Для этого в ходе исследования на строительной площадке и вокруг нее размещаются геофоны.

Гидрогеологические и гидрогеохимические исследования на земной поверхности

Для оценки условий формирования подземных вод на участке строительства, необходимо продолжение метеорологических наблюдений, контроля уровня грунтовых вод и влажности почвы на поверхности — установления показателей, лежащих в основе водобалансовых исследований. Контрольные наблюдения, выполняемые в регулярной сети скважин и выявляющие деформирование зеркала подземных вод при строительстве, являются хорошим источником информации в подтверждении положения зон проницаемых нарушений.

Отбор проб подземных вод в существующей сети скважин и в поверхностных водотоках для лабораторного химического анализа с выделением элементов-маркеров (выявляемых в остальных точках геохимического контроля)

является необходимым шагом в определении областей питания и разгрузки подземных вод.

Существенным дополнением к геолого-геофизическим работам по оценке разрывной тектоники массива является эманационная и гелиевая съемки. Данные исследования, являясь одними из основных методов обнаружения и картирования проницаемых глубинных разломов, выполняются для выявления таких зон, оценки их активности, оценки генезиса, динамики и глубины циркуляции подземных вод (включая определение продолжительности (времени) водообмена) и определение зон их разгрузки [21]. Комплекс исследований включает полевое количественное определение содержания гелия и радона в подземных водах, придонных иловых и почвенных газах и их геолого-геохимическую интерпретацию.

Организация и взаимная увязка измерительных и строительных работ

Приведенный обзор методов измерений, являющийся базовым для большинства исследовательских программ ПИЛ на этапе строительства, показал, что комплекс работ (рис. 3) должен включать применение как прямых, так и косвенных методов исследований и будет характеризоваться значительными временными затратами.

Так, по результатам анализа международного опыта выполнения подобных работ [22], длительность операций по обследованию породных обнажений, картированию трещиноватости, отбору проб пород и подземных вод, в зависимости от сложности геологических условий, может составлять 0,5–2 часа. Работы по оценке степени нарушенности породного массива в результате горнопроходческих работ (с целью оценки соответствия параметров буровзрывных работ требованиям безопасности ПГЗРО и, при необходимости, их корректировки) оцениваются в

2–4 часа на одну скважину. Измерение компонент поля напряжений требует до 4–6 часов на каждое измерение.

При этом, согласно проектной документации, проходка ствола будет производиться по совмещенной схеме, которая характеризуется последовательностью операций по уборке породы и возведению постоянной крепи непосредственно в призабойном пространстве вслед за продвижением забоя. Объем и продолжительность операций по проходке приведены в табл. 1.

Таблица 1. Последовательность выполнения технологических операций по проходке ствола

Наименование операций	Объем за цикл		Время по графику	
	ед. изм.	кол-во	час	мин
Спуск-подъем смены	—	—	4	20
Бурение шпуров	м	288	5	20
Спуск-выгрузка ВВ	—	—	0	20
Заряжание шпуров	шт	72	1	10
Подъем оборудования	—	—	0	20
Взрывание и проветривание	—	—	0	40
Спуск оборудования, приведение забоя в безопасное состояние	—	—	0	50
Уборка породы (фаза 1)	м ³	205,5	12	15
Установка опалубки	шт	1	1	0
Бетонирование заходки	м ³	23,8	4	0
Уборка оставшейся породы (фаза 2)	м ³	68,5	4	5
Нарращивание труб вентиляции, подачи бетона, сжатого воздуха	м	4×4	4	0

Приведенные значения показывают, что только часть операций проходческого цикла по продолжительности и условиям выполнения будет допускать их совмещение с исследовательскими работами. Суммарная продолжительность

Исследования, выполняемые в подземных условиях		Направления исследований	Исследования, выполняемые с земной поверхности	
Прямые методы	Косвенные методы		Прямые методы	Косвенные методы
Картирование трещиноватости. Анализ керна	Скважинные геофизические методы	Структурное строение массива	Дешифрирование космоснимков, рекогносцировочное пешеходное геологическое обследование	Поверхностные и скважинные геофизические методы, гелиевая и радоновая съемки
Измерение компонент поля напряжений. Контроль деформаций контура выработок и массива, специальные методы исследований	Скважинные каротажи. Контроль эмиссионных сигналов массива		Геомеханические процессы	Геодезические методы (планово-высотные, линейно-угловые измерения)
ОФР. Замер объемов водопритоков по различным нарушениям	Электрометрия (ЭП, ВЭЗ метод) заряженного тела. Георадарные исследования	Гидрогеологические характеристики элементов массива	Контроль отметок зеркала подземных вод в поверхностной сети скважин	Выявление температурных аномалий
Отбор проб пород и подземных вод для химического анализа	—	Физико-химические условия массива пород	Отбор проб поверхностных вод для химического анализа	—

Рис. 3. Применяемые методы исследований процессов в массиве пород на стадии строительства ПИЛ

этих операций будет достаточна для выполнения только небольшой части из приведенного объема исследовательских работ. Это определяет необходимость осуществления временной, технологической и организационной увязки этапов проходки с измерительными процедурами на основе оценки требований к пространственным и временным условиям выполнения исследований.

Одним из вариантов такой организации исследовательских работ, с целью снижения нагрузки на призабойное пространство, будет являться их разделение на следующие группы:

- штатное обследование в забое, повторяющееся с каждым циклом проходки стволов;
- измерения, допускающие проведение работ с небольшим отставанием от забоя;
- углубленное обследование, выполняемое на отдельных высотных отметках стволов, или при прохождении забоя через характеризующие участки массива;
- долгосрочные измерения (мониторинг), включающие установку оборудования.

Окончательный же выбор методов, приборной базы выполнения измерений должен быть осуществлен на основе их сравнительной оценки по показателям: стабильность измеряемого параметра, трудоемкость, необходимые временные затраты на проведение измерений, доступность технологий. Это определяет необходимость разработки программы научного сопровождения горнопроходческих работ, одним из требований к которой будет являться неувеличение общей продолжительности строительства.

Выводы

1. Изучение состояния массива пород при горнопроходческих работах является важным этапом исследований для количественных оценок безопасности захоронения ВАО. В ходе этих работ происходит последовательное обнажение породного массива на различных гипсометрических уровнях, появляется возможность фиксировать внутреннее строение массива и зон нарушений, осуществлять отбор проб, оценивать влияние проходческих работ на параметры нарушенных зон.

2. Предложенный в работе комплекс исследований направлен на получение минимально необходимого числа параметров массива горных пород, определение которых в последующие стадии строительства и эксплуатации объектов ПИЛ будет невозможно.

3. Пространственная детализация нарушений при строительстве выработок открывает возможность обоснованного размещения пунктов мониторинга и проведения специальных исследований в массиве пород на последующих стадиях создания и эксплуатации подземного объекта.

4. Большое разнообразие методов измерений, а также совмещение исследовательского и строительного процессов накладывают временные ограничения на проведение экспериментов и определяют необходимость увязки этих работ. Это требует разработки программы научного сопровождения горнопроходческих работ с соответствующей корректировкой параметров проходческого цикла, не нарушающей общей продолжительности строительства.

Литература

1. Underground Research Laboratories (URL), 2013 OECD/NEA No. 78122 Nuclear Energy Agency.
2. Blechschmidt I., Vomvoris S. Underground research facilities and rock laboratories for the development of geological disposal concepts and repository systems. Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste. 2010, pp. 82–118.
3. Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов. ГК «Росатом», Москва. 2018.
4. Крюков О. В. Краткий комментарий к утверждению «Стратегии создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов» // Радиоактивные отходы. № 2 (3). 2018. С. 16–17.
5. Абрамов А. А., Бейгул В. П. Создание подземной исследовательской лаборатории на участке «Енисейский» Нижнеканского массива. URL <http://www.atomic-energy.ru/articles/2017/08/22/78690>.
6. Линге И. И., Уткин С. С., Хамаза А. А., Шарфутдинов Р. Б. Опыт применения международных требований по обоснованию долговременной безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов: проблемы и уроки // Атомная энергия. 2016. Вып. 120. С. 201–208.
7. Гупало Т. А., Бейгул В. П., Миловидов В. Л., Даченко В. М., Лунд Э. Н. и др. Разработка обобщенного плана проведения научно-исследовательских и проектно-изыскательских работ по созданию объекта подземной изоляции РАО на Нижнеканском массиве. Проект МНТЦ #2377Р, 2002–2005 гг. Итоговый отчет, 2005.
8. Magnor B. 2004. Äspö Pillar Stability Experiment. Geological mapping of tunnel TASQ. SKB IPR-04-03, Svensk Kärnbränslehantering AB. 2004.
9. Оловянный А. Г. Механика горных пород. Моделирование разрушений. СПб.: Коста. 2012.
10. Raven K., Sterling S., Avis J. Geoscientific site characterization plan for the deep geologic repository at the Bruce site, Kincardine, Ontario. Avis Intera Engineering Ltd. [Available at https://www.opg.com/generating-power/nuclear/nuclear-waste-management/Deep-Geologic-Repository/Documents/HPD/4.3.55_geoscientificsitecharacter.pdf]
11. Курленя М. В., Леонтьев А. В., Попов С. Н. Развитие метода гидроразрыва для исследования

- напряженного состояния массива горных пород // ФТПРПИ. 1994. № 1, С. 3—20.
12. Гупало В. С. Оценка параметров техногенной трещиноватости подземного объекта захоронения высокоактивных отходов для прогноза его изоляционных свойств // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 11. С. 92—100. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-92-100
13. Шкуратник В. Л., Николенко П. В. Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород. М.: МГТУ. 2012. 212 с.
14. Грешиников В. А., Дробот Ю. Б. Акустическая эмиссия. М.: Изд-во стандартов, 1976. 187 с.
15. Tsang C-F, Neretnieks I, Tsang Y. Hydrologic issues associated with nuclear waste repositories // Water Resources Research. 2015. 51. 6923–6972.
16. Telford W. M., Geldart L. P., Sheriff L. E. «Applied Geophysics». Cambridge University Press. 2004.
17. Современные движения земной коры: Исследования на геодинамических полигонах. М.: Наука, 1978. 236 с.
18. Татаринов В. Н., Морозов В. В., Колесников И. Ю., Каган А. И., Татаринова Т. А. Устойчивость геологической среды как основа безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива // Надежность и безопасность энергетики. 2014. № 1 (24). С. 25—29.
19. Brojerdi F. S., Zhang F., Juhlin C., Malehmir A., Lehtimäki T., Mattsson H., Curtis P. High resolution seismic imaging at the planned tunnel entrance to the Forsmark repository for spent nuclear fuel, central Sweden // Near Surface Geophysics. 2014. 12. 709—719.
20. Juhlin C., Bergman B., Palm H. Reflection seismic studies in the Forsmark area – stage 1. SKB R-02-43, SvenskKärnbränslehantering AB. 2002.
21. Яницкий И. Н. Гелиевая съемка. М.: Недра, 1979. 251 с.
22. ONKALO — Underground Characterisation and Research Programme (UCRP). Posiva Oy Report POSIVA 2003-03, September 2003. 148 p.

Информация об авторах

Гупало Владимир Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Физические процессы горного производства и геоконтроль», МГИ НИТУ «МИСиС» (119049, Москва, Ленинский проспект, 4), e-mail: vs_gupalo@misis.ru

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

Крючков Дмитрий Вячеславович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д.52), e-mail: dvk@ibrae.ac.ru

Панкратенко Александр Никитович, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Строительство подземных сооружений», МГИ НИТУ «МИСиС» (119049, Москва, Ленинский проспект, 4), e-mail: pankrat54@bk.ru

Плешко Михаил Степанович, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительство подземных сооружений», МГИ НИТУ «МИСиС» (119049, Москва, Ленинский проспект, 4), e-mail: mixailstepan@mail.ru

Вознесенский Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Физические процессы горного производства и геоконтроль», МГИ НИТУ «МИСиС» (119049, Москва, Ленинский проспект, 4), e-mail: al48@mail.ru

Гайсин Роберт Мударисович, кандидат технических наук, профессор кафедры «Физические процессы горного производства и геоконтроль», МГИ НИТУ «МИСиС» (119049, Москва, Ленинский проспект, 4), e-mail: rmgaisin@mail.ru

Мосейкин Владимир Васильевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Геология и маркшейдерское дело», МГИ НИТУ «МИСиС» (119049, Москва, Ленинский проспект, 4), e-mail: moseykin@inbox.ru

Библиографическое описание статьи

Гупало В. С., Казаков К. С., Крючков Д. В., Панкратенко А. Н., Плешко М. С., Вознесенский А. С., Гайсин Р. М., Мосейкин В. В. Изучение состояния массива пород при строительстве подземной исследовательской лаборатории как этап получения исходных данных для оценок безопасности ПГЗРО // Радиоактивные отходы. 2019. № 1 (6). С. 90—99.

THE STUDY OF THE STATE OF ROCK MASS DURING CONSTRUCTION OF UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY AS A STAGE OF OBTAINING INITIAL DATA FOR THE SAFETY ASSESSMENTS OF DEEP GEOLOGICAL DISPOSAL

Gupalo V. S.¹, Kazakov K. S.⁴, Kryuchkov D. V.⁴, Pankratenko A. N.², Pleshko M. S.²,
Voznesensky A. S.¹, Gaisin R. M.¹, Moseykin V. V.³

¹Department of "Physical processes of mining and geocontrol", Mining Institute NUST "MISIS", Moscow, Russia

²Department "Construction of underground facilities", Mining Institute NUST MISIS, Moscow, Russia

³Department "Geology and mine surveying", Mining Institute NUST "MISIS", Moscow, Russia

⁴Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received 26 February 2019

Based on the analysis of foreign and local research experience in underground research laboratories and their analogues, as well as the requirements of safety justification tasks, the main directions of research work at the stage of URL construction are given. A brief review of the applied research methods is presented. The questions of combining research work performed from the earth's surface and from workings with the construction cycle of mining are considered.

Key words: underground research laboratory, complex of in situ studies of the state of the rock mass, construction of URL.

References

1. Underground Research Laboratories (URL) (2013) OECD/NEA No. 78122 Nuclear Energy Agency.
2. Blechschmidt I., Vomvoris S. Underground research facilities and rock laboratories for the development of geological disposal concepts and repository systems. Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste. 2010, pp. 82–118.
3. Strategy for the establishment of a deep disposal site for radioactive waste. GK "Rosatom", Moscow. 2018. (In Russian).
4. Kryukov O. V. Brief comment to the approval of the "Strategy for the establishment of a deep disposal site for radioactive waste". *Radioactive waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 16–17. (In Russian).
5. Abramov A. A., Bagul V. P. *Creation of an underground research laboratory on the site "Yeniseiskiy" of Nizhnekanskiy massif*. Available at <http://www.atomic-energy.ru/articles/2017/08/22/78690>. (In Russian).
6. Linge I. I., Utkin S. S., Khamaza A. A., Sharafutdinov R. S. Experience of the international requirements for the long-term safety of radioactive waste disposal sites: problems and lessons. *Atomic energy*, 2016, vol. 120, no. 4, pp. 201–208. (In Russian).
7. Gupalo T. A., Bagul V. P., Milovidov V. L., Dotsenko V. M., Lind E. N. and others. Creation of a generalized plan of scientific-research and design-prospecting works on creation of a facility for underground isolation of radioactive waste at Nizhnekanskiy massif. The ISTC project #2377P, 2002–2005, Final report, 2005. (In Russian).
8. Magnor B, 2004. Äspö Pillar Stability Experiment. Geological mapping of tunnel TASQ. SKB IPR-04-03, SvenskKärnbränslehantering AB.
9. Olovyannyj A. G. *Rock mechanics. Damage modeling*. Sankt-Peterburg, Kosna Publ., 2012. (In Russian).
10. Raven K., Sterling S., Avis J. Geoscientific site characterization plan for the deep geologic repository at the Bruce site, Kincardine, Ontario. Avis Intera Engineering Ltd. [Available at https://www.opg.com/generating-power/nuclear/nuclear-waste-management/Deep-Geologic-Repository/Documents/HPD/4.3.55_geoscientificsitecharacter.pdf]
11. Kurlenya M. V., Leont'ev A. V., Popov S. N. Development of a method of hydraulic fracturing to study the stress state of rock masses. Moscow, *FTPRPI*. 1994, no. 1, pp. 3–20. (In Russian).
12. Gupalo V. S. Estimation of parameters of technogenic fracture underground facility for the disposal of high level waste to forecast its insulating properties. *Mining informational and analytical bulletin*, 2017, no. 11. doi: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-92-100 (In Russian).
13. Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V. *Methods for determining the stress-strain state of rock mass*. Moscow, Moscow Mining University Publ., 2012. 212 p. (In Russian).
14. Grechishnikov V. A., Drobot Yu. B. *Acoustic emission*. Moscow, Publishing house of standards. 1976. 187 p. (In Russian).
15. Tsang C.-F., Neretnieks I., Tsang Y., 2015. Hydrologic issues associated with nuclear waste repositories. *Water Resources Research*, 51, 6923–6972.
16. Telford W. M., Geldart L. P., Sheriff L. E. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press. 2004.
17. *Modern movements of the earth's crust: researches on geodynamic polygons*. Moscow, Science Publ., 1978. 236 p. (In Russian).
18. Tatarinov V. N., Morozov V. V., Kolesnikov I. Yu., Kagan A. I., Tatarinova T. A. Stability of geological medium as a fundamental factor for underground

- isolation of radioactive waste and spent nuclear fuel. *Nadezhnost' i bezopasnost' ehnergetiki*, 2014, no. 1 (24), pp. 25–29. (In Russian)
19. Brojerdi F. S., Zhang F., Juhlin C., Malehmir A., Lehtimäki T., Mattsson H., Curtis P. High resolution seismic imaging at the planned tunnel entrance to the Forsmark repository for spent nuclear fuel, central Sweden. *Near Surface Geophysics*, 2014, no. 12, pp. 709–719.
20. Juhlin C, Bergman B, Palm H, 2002. Reflection seismic studies in the Forsmark area — stage 1. SKB R-02-43, SvenskKärnbränslehantering AB.
21. Yanitsky I. N. Helium survey. Moscow, Nedra Publ., 1979. 251p. (In Russian).
22. ONKALO — Underground Characterisation and Research Programme (UCRP). PosivaOy Report POSIVA 2003-03, September 2003. 148 p.

Information about the authors

Gupalo Vladimir Sergeevich, Doctor of technical sciences, Professor of Department of "Physical processes of mining and geocontrol", Mining Institute NUST "MISIS" (4, Leninsky prospect, Moscow, 119049, Russia), e-mail: vs_gupalo@misis.ru

Kazakov Konstantin Sergeevich, Deputy head of laboratory, Institute of problems of safe development of atomic energy of RAS (52, B. Tulsкая str., Moscow, 115191, Russia), e-mail: kks@ibrae.ac.ru

Kryuchkov Dmitry Vyacheslavovich, Candidate of technical Sciences, Chief of Laboratory, The Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, B. Tulsкая str., Moscow, 115191, Russia), e-mail: dvk@ibrae.ac.ru

Pankratenko Alexander Nikitovich, Doctor of technical sciences, Head of the Department "Construction of underground facilities", Mining Institute NUST MISIS (4, Leninsky prospect, Moscow, 119049, Russia), e-mail: pankrat54@bk.ru

Pleshko Mikhail Stepanovich, Doctor of technical sciences, Professor of the Department "Construction of underground facilities", Mining Institute NUST MISIS (4, Leninsky prospect, Moscow, 119049, Russia), e-mail: mixail-stepan@mail.ru

Voznesensky, Aleksandr Sergeevich, Doctor of technical sciences, Professor of Department of "Physical processes of mining and geocontrol", Mining Institute NUST "MISIS" (4, Leninsky prospect, Moscow, 119049), e-mail: al48@mail.ru

Gaisin Robert Mudarisovich, Candidate of technical Sciences, Professor of Department of "Physical processes of mining and geocontrol", Mining Institute NUST "MISIS" (4, Leninsky prospect, Moscow, 119049, Russia), e-mail: rmgaisin@mail.ru

Moseykin Vladimir Vasilyevich, Doctor of technical sciences, Head of the Department "Geology and mine surveying", Mining Institute NUST "MISIS" (4, Leninsky prospect, Moscow, 119049, Russia), e-mail: moseykin@inbox.ru

Bibliographic description

Gupalo V. S., Kazakov K. S., Kryuchkov D. V., Pankratenko A. N., Pleshko M. S., Voznesensky A. S., Gaisin R. M., Moseykin V. V. The Study of the State of Rock Mass During Construction of Underground Research Laboratory as a Stage of Obtaining Initial Data for the Safety Assessments of Deep Geological Disposal. *Radioactive Waste*, 2019, no. 1 (6), pp. 90–99. (In Russian).