

ПОДЗЕМНАЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ: К ПРОГРАММЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В. Н. Татаринов^{1,2}, В. Н. Морозов¹, А. И. Маневич^{1,3}, Т. А. Татарина^{1,2}

¹Геофизический центр РАН, Москва

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, Москва

³Горный институт НИТУ «МИСиС», Москва

Статья поступила в редакцию 13 марта 2019 г.

Сформулированы основные направления и задачи геомеханических исследований в подземной исследовательской лаборатории. Предложен комплекс геомеханических методов и экспериментов, которые могут быть положены в основу разработки детальной программы исследований и паспортов натурных экспериментов, направленных на оценку и прогноз длительной сохранности изоляционных свойств породного массива и обеспечение безопасности ведения горных работ при строительстве пункта глубинного захоронения высокоактивных радиоактивных отходов на участке Енисейский.

Ключевые слова: высокоактивные радиоактивные отходы, подземная исследовательская лаборатория, геомеханические процессы, напряженно-деформированное состояние.

Введение

В рамках выполнения Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016—2020 годы и на период до 2030 года» запланировано создание подземной исследовательской лаборатории в Нижнеканском массиве (ПИЛ НКМ). Ранее в [1] были рассмотрены геодинамические и сейсмо-тектонические аспекты участка Енисейский и окружающей территории. Было подчеркнуто, что кинематика современных движений земной коры (геодинамические криповые и быстрые сейсмические движения) является фундаментальным фактором, который в силу своей энергетической мощи определяет изоляционные свойства структурно-тектонического блока (дальняя зона), вмещающего пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО). Вместе с тем очевидно, что не менее важную

роль играют геомеханические процессы¹, изменяющие напряженно-деформированное состояние (НДС) породного массива и приводящие к его ослаблению или разрушению приконтурной части ПГЗРО (ближней зоны). В этой связи исследования, направленные на изучение существующего поля напряжений и динамики его перераспределения при строительстве ПГЗРО и механических процессов деформирования, а также прогноз структурной нарушенности ближней зоны, становятся актуальными уже на стадии проходки шахтных стволов ПИЛ НКМ.

При обосновании комплекса методов геомеханических исследований в ПИЛ НКМ необходимо

¹ И.В. Баклашов [2]: «Геомеханические процессы в массиве горных пород это механические процессы деформирования, перераспределения напряжений и разрушения горных пород».

основываться на задачах, поставленных в «Стратегии создания пункта...» [3], «Стратегическом мастер-плане...» [4], «Программе...» [5], а также в решениях НТС №10 «Экология и радиационная безопасность» ГК «Росатом». При этом необходимо понимать, что эти документы носят рамочный характер, в них задано генеральное направление исследований в ПИЛ. В тоже время для начала работ требуются детальные и конкретные рекомендации по программе исследований, которая должна включать обоснование эффективных методов, методик проведения наблюдений, объемов необходимых для экспериментов выработок и скважин, аппаратуру и технические средства, устанавливать взаимосвязь с другими экспериментами, алгоритмы использования результатов натуральных наблюдений в прогнозных моделях и т. д. В этой связи в данной статье рассмотрены геомеханические аспекты организации исследований в ПИЛ НКМ, которые могут быть использованы при подготовке Программы экспериментов.

Задачи исследования геомеханических процессов в ПИЛ НКМ

Основные направления исследований в ПИЛ изложены в Федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии [6, 7 и др.]. В частности, в документе [7, приложение № 3] указывается, что исследования должны быть направлены на:

- 1) подтверждение пригодности массива горных пород для безопасного захоронения РАО;
- 2) уточнение характеристик массива пород и подземных вод в зоне захоронения РАО, важных для оценки долговременной безопасности ПГЗРО, в натуральных и лабораторных условиях;
- 3) уточнение изолирующих свойств системы инженерных барьеров;
- 4) экспериментальное изучение материалов инженерных барьеров (в натуральных и лабораторных условиях);
- 5) уточнение, проверку и калибровку математических моделей для оценки долговременной безопасности системы захоронения РАО.

Исходя из этих направлений, основные задачи геомеханических исследований в ПИЛ НКМ могут быть сформулированы в следующем виде:

1. Обеспечение безопасности ведения горных работ при проходке стволов и горизонтальных выработок ПИЛ и ПГЗРО, включая оценку возможности разрушения пород в динамической форме.

2. Изучение физико-механических свойств горных пород, тектонического строения, структурной нарушенности и напряженно-деформированного

состояния породного массива в приконтурной зоне ПГЗРО.

3. Изучение влияния горных выработок на сохранность изоляционных свойств массива в зависимости от развития процессов сдвижения, деформаций, разуплотнения и разрушения породного массива в радиусе до 50 м от контура выработок.

4. Проведение специальных экспериментов по изучению техногенного воздействия, включая тепловыделение, на состояние природного массива и системы инженерных барьеров, корректировка объемно-планировочного решения (геометрических размеров выработок и скважин, целиков) подземной части ПГЗРО, получение информации о состоянии массива для целей планирования и проведения других экспериментов, направленных на оценку долговременной безопасности системы захоронения РАО.

Безусловно, эти задачи должны решаться в связке с результатами численного моделирования и корректироваться после обсуждения в научном сообществе и получения новой информации о геологической среде, в т. ч. при горнопроходческих работах в ПИЛ НКМ.

Примеры геомеханических исследований в зарубежных ПИЛ и на подземных объектах-аналогах

При организации геомеханических исследований в ПИЛ НКМ весьма полезным может быть опыт исследований в зарубежных ПИЛ и на отечественных подземных объектах различного назначения, в первую очередь на объекте-аналоге — подземном комплексе ФГУП «ГХК». Рассмотрим несколько примеров подобных исследований.

В горной практике для оценки разрушения пород в динамической форме широко используется метод дискования керна, основанный на исследовании взаимосвязи разрушения керна при бурении скважин и соотношения величин и ориентации главных компонент поля напряжений. Дискообразование происходит с наибольшей интенсивностью, если скважины ориентированы перпендикулярно действию максимальных напряжений. Деление керна на диски в прочных породах начинается при соотношении напряжений и предела прочности пород $\sigma_{\perp}/\sigma_{\text{сж}} = 0,1 \div 0,3$, а при соотношении $\sigma_{\perp}/\sigma_{\text{сж}} = 1 \div 2$ керна просто превращается в буровую мелочь.

Метод широко используется при оценке удароопасности горных пород на глубоких рудниках. Так, нами для этих целей использовались следующие характеристики бурения: скорость

вращения 350–450 об/мин, усилие подачи 1 МПа, скорость бурения 1–2 см/мин, керновые полусферические коронки диаметром 59 мм.

В ПИЛ ASPE (Швеция) в эксперименте «Core diskling» проводилось изучение дискования керна в 4 вертикальных скважинах [8]. Дискование не носило систематического характера, и по результатам замеров были сделаны выводы о низком уровне напряжений. Верхняя граница максимальных значений тангенциального напряжения в горизонтальном направлении до бурения скважин составила 40–55 МПа. Была установлена связь между процессами дискования керна и возникновением субвертикальных трещин, пересекающих скважины. Был сделан вывод, что причиной дискования могли стать повышенные напряжения в окрестностях трещины в сочетании с наличием менее прочных пород [8].

В приложении к задачам ПИЛ НКМ представляется целесообразным использование этого метода начиная с глубин 300 м, особенно в местах, где визуально будут отмечаться признаки удароопасности, а также при необходимости определения направления действия главных напряжений. Методика подробно изложена в работе [9]. Отобранный керн может впоследствии использоваться для определения физико-механических свойств пород.

В ПИЛ ASPE (Швеция) был также выполнен эксперимент, связанный с оценкой сохранности изоляционных свойств пород в окрестностях скважин при тепловом воздействии контейнеров с РАО. Эксперимент «Aspo Pillar Stability Experiment» проводился на глубине 450 м в целике между двумя скважинами диаметром 1,75 м, имитирующими ячейки для размещения контейнеров с РАО. Скважины глубиной 6,75 м были пробурены на расстоянии 1 метра друг от друга (рис. 1).

Эксперимент проводился в 2002–2006 гг. Использовался метод измерения линейных перемещений контура скважин на базе дифференциального трансформатора (*Linear Variable Differential Transformer*). Для изучения стенок скважин также применялся лазерный метод, регистрировались температура и акустическая эмиссия. При проведении экспериментов выполнялось численное моделирование распределения полей напряжений.

Вблизи скважин большого диаметра для размещения датчиков были дополнительно пробурены 11 скважин диаметром 76 мм с отбором керна (рис. 1). Изучение напряжений *in situ* проводилось на соседнем участке методом гидро-разрыва. Там были получены напряжения σ_1 , σ_2 , σ_3 – 35, 15 и 10 МПа. Нагрев целика между

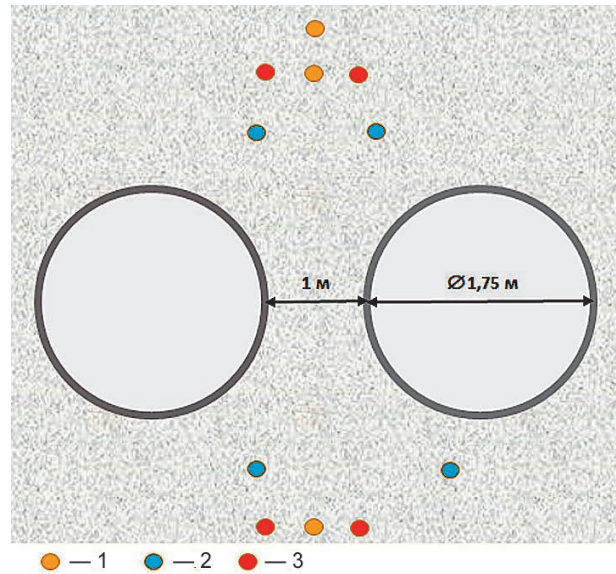


Рис. 1. Схема расположения скважин в эксперименте «Pillar Stability Experiment» в ПИЛ ASPE: 1 – скважины для измерения температуры, 2 – скважины для измерения акустической эмиссии, 3 – нагревательные скважины

скважинами осуществлялся четырьмя электрическими нагревателями, расположенными в четырех скважинах на расстоянии около 2 м от него [8] (см. рис. 1). Контроль состояния целика проводился путем лазерного сканирования стенок скважин и регистрации сейсмоакустической эмиссии (рис. 2а, б).

Эти работы уникальны по детальности планирования и документированию результатов.

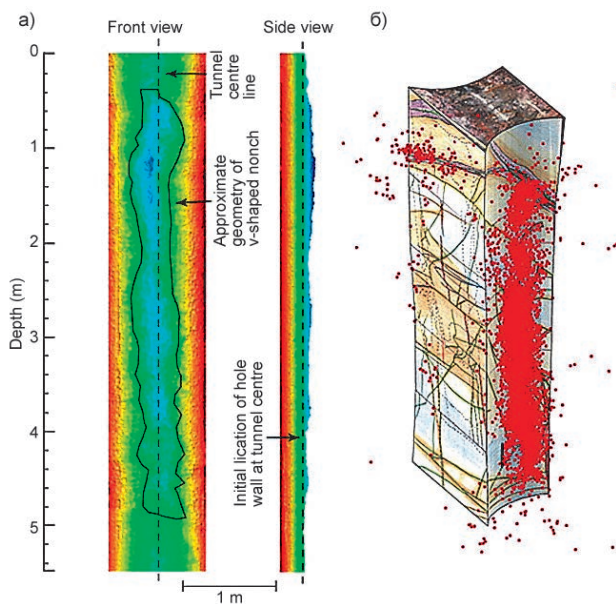


Рис. 2. Результат лазерного сканирования скважины (а) (слева показана форма разрушения скважины, справа – глубина разрушения) и интегральные за весь период эксперимента результаты наблюдений за сейсмоакустической эмиссией (б) в эксперименте «Pillar Stability Experiment» в ПИЛ ASPE [10]

Достаточно сказать, что только отчет по изучению акустической эмиссии содержит 111 страниц. Эксперимент подобного типа при небольшой корректировке может быть воспроизведен в ПИЛ НКМ, т. к. позволяет изучить процесс разрушения межскважинных целиков *in situ* в зависимости от нагрева, тем более что в материалах по обоснованию безопасности ПГЗРО [13] не приводятся сведения о том, как обосновывались геометрические параметры целиков между скважинами и выработками для размещения контейнеров с РАО.

Результаты эксперимента, приведенные в [10, 11, 12], могут служить эталоном того, как при минимуме затрат (всего две скважины и целик между ними) можно получить максимум информации *in situ* (геологическое изучение скважин, инструментальные геомеханические и геофизические методы, специальный эксперимент по нагреву, численное моделирование и др.) при правильной формулировке задачи и наличии современной аппаратурной базы.

Предложения по данному эксперименту для ПИЛ НКМ приведены в следующем разделе.

Другой эксперимент в ПИЛ ASPE «*Zone of excavation disturbance experiment*» (ZEDEX) связан с изучением степени нарушения массива, обусловленного видом ведения горнопроходческих работ. При проходке вокруг выработок образуются две зоны: а) зона разрушения, находящаяся в непосредственной близости от выработки, где изменения свойств горных пород носят необратимый характер; б) зона нарушения, где изменяется напряженное состояние пород и величина гидравлического напора. Проводилось сравнение нарушенности в двух горизонтальных выработках диаметром 5 м и протяженностью 35 м (рис. 3), пройденных: а) традиционным буровзрывным способом; б) способом с

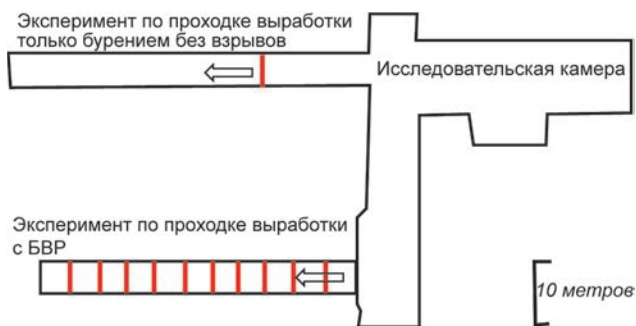


Рис. 3. Схема тоннелей в ПИЛ ASPE на глубине 420 м для эксперимента ZEDEX. Циклы проходки горизонтальной выработки 1–4 включали использование БВР с низким ударным воздействием, а циклы 5–10 – традиционных методов БВР

низким ударным воздействием; в) способом без применения БВР.

Подробное описание самого проекта и полученных результатов представлено в [12]. Основными методами наблюдений были: визуальный осмотр стенок выработок и скважин, микросейсмический метод, метод регистрации акустической эмиссии, геофизические методы неразрушающего контроля, гидравлический метод.

По итогам исследований был сделан вывод, что интервал нарушенных пород за счет ведения горнопроходческих работ для механического способа проходки не превышает 3 мм, а для буровзрывного способа – 0,1–1,0 м. Последний может быть уменьшен на 50% за счет подбора щадящих параметров взрывных работ [14].

Подземные выработки Горно-химического комбината интересны тем, что по ним накоплен обширный экспериментальный материал о пространственно-временном изменении состояния приконтурной части породного массива в условиях длительного воздействия высоких температур и горного давления. Анализ этих данных позволяет: а) получить знания о геомеханических процессах в условиях длительного воздействия горного давления и температуры без дополнительных затрат; б) использовать накопленный опыт организации геомеханических исследований для подготовки программы натурных экспериментов в ПИЛ НКМ [15, 16, 20].

Система мониторинга в камерах реакторной группы – 2а/э, 1э, 2э, и камер с парогенераторами и теплообменниками – Р2, Р3, Р4, Р6, была организована в 1965 г. и включала около 800 измерительных установок и 100 скважин с датчиками различных физических величин [15]. Наблюдения выполнялись сотрудниками ВНИПИПромтехнологии и ГХК (Зверев А. Б., Зорохович В. Ю., Леонов Е. А. и др.). Камеры расположены на глубине 250–350 м и имеют средние размеры в сечении 60×25 м и длину до 100 м. В них находились мощные тепловые источники, разогревающие вмещающий массив до 60–70 °С. По физико-механическим свойствам породы близки к породам на участке Енисейский.

Объектами мониторинга были бетонная обделка камер (наблюдения за конвергенцией бортов камер по различным створам) и приконтурная часть породного массива в радиусе до 20 м от контура. Были проанализированы графики смещений глубинных реперов, установленных в скважинах глубиной до 20 м, в комплексе с данными о конвергенции (сближении) бортов камер за период времени с 1980 по 2002 гг. для различных групп горных пород, отличающихся по степени трещиноватости.

В табл. 1 приведены сведения о конвергенции выработок до 1995 года включительно.

Таблица 1. Значения конвергенции стенок выработок камер

Номера камер	Суммарная конвергенция до 1995 г., ΔL , мм	Максимальные скорости по годам, Δv , мм/год		Температура воздуха в камерах, °C
P1	15,45	0,70/1983	0,30/1990	34
P2	18,65	1,69/1983	1,15/1990	39
P3	7,80	0,70/1983	0,2/1990	29
P4	10,5	0,65/1983	0,7/1986	41
P6	5,1	0,10/1989	-	29
180	12,05	0,50/1990	-	35
181	5,00	-	-	34
182	3,45	0,30/1990	-	34
1э	5,35	0,60/1984	0,80/1985	24
2э	8,75	0,90/1984	0,80/1985	24
2а/э	7,20	0,40/1984	0,50/1989	27
3	2,25	-	-	23
257а	7,50	0,50/1990	-	25
2116	4,85	0,20/1990	-	27
Б	1,50	0,25/1984	0,60/1987	18
227а/234	17,05	0,45/1983	0,65/1990	28

В табл. 2 приведены среднегодовые изменения ширины камеры P2 по различным створам. Необходимо отметить наличие периодов аномально высоких значений скоростей смещений, когда среднегодовые смещения превышали 1,6 мм/год.

На рис. 4 показаны интегральные графики смещений глубинных реперов, находящихся в различных горно-геологических условиях [15]. Видно, что средние скорости смещений стен камер составили во временном интервале 1980–2000 гг. следующие значения:

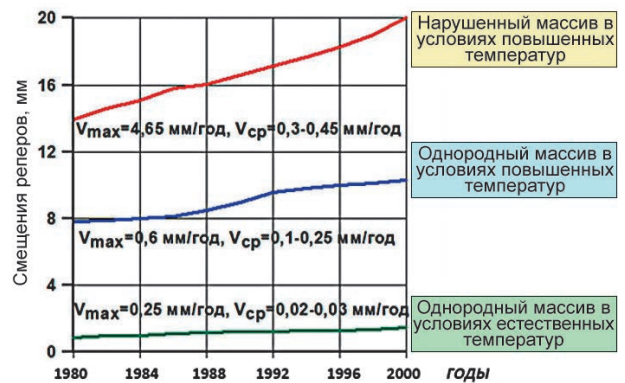


Рис. 4. Обобщенные графики смещения глубинных реперов для различных горно-геологических условий и температуры

Таблица 2. Среднегодовые изменения ширины камеры P2 по створовым измерениям, мм

Годы	$T_{I, II}^{\circ C}$	I отм., +2,0 м	II отм., +17,2 м	$T_{I'}^{\circ C}$	I' отм., +8,0 м	$T_{III}^{\circ C}$	III отм., +2,0 м	$T_{V, VI, VII}^{\circ C}$	V отм., +8 м	VI отм., +16,5 м	VII отм., +25,0 м
1980	26,6	-12,75	-10,70	-	-	28,4	-10,50	35,3	-10,90	-7,70	-7,20
1981	27,5	-12,85	-10,15	-	-	26,0	-	34,3	-10,50	-9,25	-8,20
1982	28,8	-12,85	-10,90	-	-	26,7	-	35,0	-10,50	-9,25	-8,20
1983	29,8	-13,80	-12,15	-	-	26,2	-	35,8	-12,15	-	-
1984	29,7	-14,10	-12,40	-	-	24,2	-	36,3	-12,60	-	-9,70
1985	29,2	-15,20	-12,85	-	-	23,8	-13,35	33,4	-13,80	-11,35	-11,00
1986	31,9	-15,75	-12,75	-	-	-	-	35,1	-13,25	-10,75	-10,75
1987	33,7	-16,25	-13,20	36,2	-0,45	-	-	36,2	-13,25	-10,75	-11,20
1988	34,3	-16,75	-13,90	39,1	-0,55	28,9	-14,00	36,8	-13,80	-11,20	-11,40
1989	34,9	-17,10	-14,05	39,0	-0,70	27,2	-14,45	35,7	-14,30	-11,40	-
1990	33,0	-17,80	-15,20	37,0	-1,50	24,1	-15,55	35,6	-14,95	-11,60	-
1991	33,7	-18,10	-15,25	37,8	-1,50	-	-	36,3	-15,25	-11,30	-
1992	32,6	-18,35	-15,35	37,0	-1,75	24,0	-	35,4	-15,45	-11,40	-
1993	31,9	-18,40	-15,70	36,9	-1,75	22,7	-	35,6	-15,40	-11,25	-
1994	31,1	-18,65	-16,20	36,0	-2,15	21,6	-	33,6	-15,65	-11,80	-
1995	31,2	-19,30	-16,30	33,7	-2,75	21,8	-17,25	32,6	-15,70	-12,30	-
1996	33,2	-19,70	-16,80	37,4	-3,25	23,7	-17,45	35,0	-15,55	-12,55	-
1997	35,0	-20,25	-16,45	37,8	-4,20	24,1	-18,65	35,7	-16,20	-12,50	-

* серым цветом выделены аномально высокие среднегодовые скорости смещений.

- а) для сильно нарушенного массива, подверженного тепловому воздействию — 0,3–0,45 мм/год;
- б) для ненарушенного, подверженного тепловому воздействию — 0,1–0,2 мм/год;
- в) для слабо нарушенного массива без влияния температуры — 0,02–0,04 мм/год.

Результаты наблюдений позволили построить модель процессов деформирования и разрушения породного массива [13]. Приведенный пример указывает на целесообразность аналитического обобщения сохранившихся экспериментальных данных исследований в выработках ГХК при разработке Программы исследований, а также на проведение аналогичного эксперимента в ПИЛ НКМ, в том числе для проверки моделирования устойчивости пород в зависимости от конструктивных особенностей выработок и мощности тепловыделения РАО [39].

Первоочередные методы изучения геомеханических процессов в ПИЛ НКМ

Проходка горных выработок при строительстве ПИЛ приводит к перераспределению первоначального напряженно-деформированного состояния массива и формированию нового равновесного состояния. Вокруг выработок и в окрестностях крупных разрывов образуются локальные зоны концентрации напряжений, размеры которых определяются региональными тектоническими напряжениями и гравитационным воздействием налегающей толщи, свойствами пород, геометрией горных выработок и тепловыделением. Над верхним горизонтом также развиваются процессы сдвигения, которые потенциально могут вызвать появление новых каналов фильтрации подземных вод. Эти процессы известны в геомеханике и детально изучены при разработке месторождений

полезных ископаемых. ПЗГРО является уникальным объектом, для которого требуется экстраполяция результатов исследований на гораздо более длительный период, поэтому появляются неопределенности, для преодоления которых необходим новый подход. Это особенно важно при интерпретации данных и построении численных прогнозных моделей напряженно-деформированного состояния массива и прогноза его разрушения.

Объектами геомеханических исследований являются физико-механические свойства пород, напряжения, смещения и деформации в породном массиве, его структурная нарушенность, а также геофизические поля, которые косвенно взаимосвязаны с первыми четырьмя. Поэтому рассматриваются 5 групп методов в приложении к цели и задачам, изложенным выше (рис. 5):

1. Методы изучения физико-механических свойств горных пород.
2. Методы изучения трещиноватости породного массива.
3. Методы изучения напряжений в породном массиве.
4. Методы изучения смещений и раскрытия трещин в приконтурной части.
5. Методы изучения техногенного воздействия на изоляционные свойства массива.

В табл. 3 приведен предварительный список экспериментов, направленных на изучение геомеханических процессов в ПИЛ НКМ, с ориентировочным указанием этапов работ (этап 1 — проходка шахтных стволов, этап 2 — проходка горизонтальных выработок и исследовательских камер ПИЛ, этап 3 — исследования в ПИЛ).

На различных стадиях эксплуатации ПИЛ и ПЗГРО объем (интенсивность) применения этих методов существенно различается. Например, максимальное количество замеров напряжений и

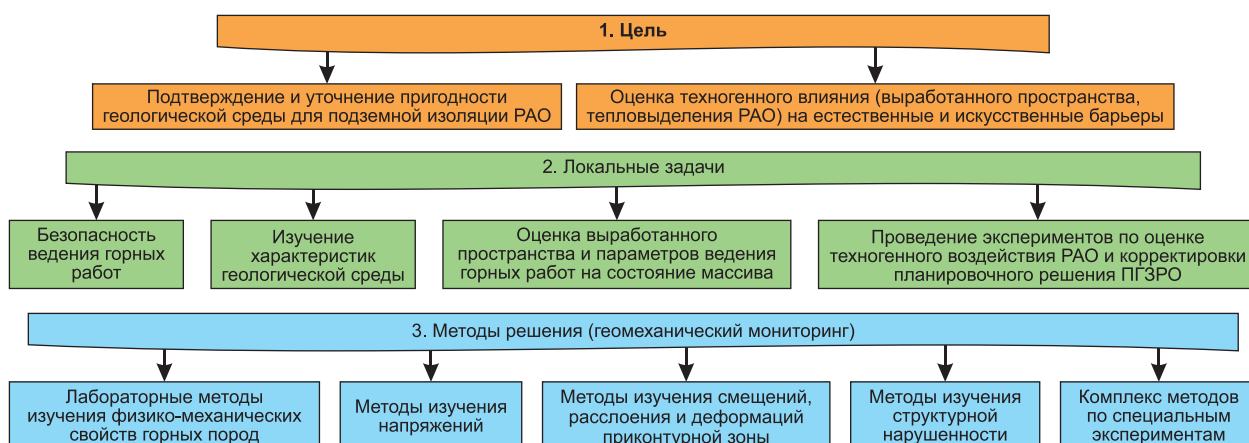


Рис. 5. Цель, задачи и методы решения при изучении геомеханических процессов в ПИЛ НКМ

Таблица 3. Список геомеханических экспериментов в ПИЛ НКМ

Обозначение эксперимента	Наименование эксперимента	Этапы* проведения работ
<i>Изучение физико-механических свойств горных пород</i>		
БЗ-1	Лабораторные определения физико-механических свойств горных пород	Этапы 1, 2
<i>Изучение напряжений в массиве</i>		
БЗ-2	Определение величин и ориентации напряжений методом разгрузки керна	Этап 2
БЗ-3	Определение величин и ориентации напряжений с использованием деформометров	Этапы 2, 3
БЗ-4	Изучение напряжений и разрушения пород методом гидроразрыва	Этап 3
БЗ-5	Определение напряжений в массиве пород методом дискования керна	Этапы 1, 2
<i>Изучение смещений и расслоения приконтурной части породного массива</i>		
БЗ-6	Определение конвергенции подземных выработок методом глубинных реперов	Этап 3
БЗ-7	Контроль динамики раскрытия крупных трещин	Этапы 2, 3
<i>Изучение трещиноватости породного массива</i>		
БЗ-8	Изучение трещиноватости породного массива геолого-геофизическими методами	Этап 1, 2
БЗ-9	Сейсмоакустический мониторинг в выработках ПИЛ для выявления активных нарушений и разрушения пород	Этапы 2, 3
<i>Изучение техногенного воздействия на массив</i>		
БЗ-10	Исследование нарушенности пород, образующейся в ходе проведения горнопроходческих работ	Этапы 1, 2
БЗ-11	Изучение удароопасности пород при проходке выработок	Этапы 1, 2
БЗ-12	Исследования стабильности массива и обоснование конструктивных размеров целиков и скважин	Этап 3
БЗ-13	Изучение изменения свойств массива при нагреве	Этап 3

* этап 1 – ориентировочно 2019–2021 годы, этап 2 – 2023–2025 годы, этап 3 – начиная с 2024 года.

деформаций приходится на стадию проведения экспериментов в ПИЛ (ориентировочно после 2024–2025 гг.), а пик работ по изучению структурной нарушенности связан с проходкой горизонтальных выработок и бурением скважин ПГЗРО (табл. 4). В этой связи в проект горнопроходческих работ ПИЛ необходимо закладывать

Таблица 4. Интенсивность геомеханических исследований на различных стадиях строительства

	Строительство шахтных стволов	Проходка горизонтальных выработок и камер ПИЛ	Экспериментальные исследования в ПИЛ	Строительство ПГЗРО*
Физико-механические свойства	❖❖❖	❖❖❖❖	❖	–
Структурная нарушенность	❖❖❖	❖❖❖❖❖	❖❖	❖❖❖
Напряжения	❖❖	❖❖	❖❖❖❖❖	–
Деформации и смещения	–	❖	❖❖❖❖❖	❖❖
Физические поля	–	❖❖❖	❖❖❖❖❖	❖❖

* в случае принятия решения о пригодности среды по результатам исследований в ПИЛ; количество символов ❖ характеризует интенсивность исследований.

время на выполнение натуральных научных экспериментов, в т.ч. геомеханических, иначе теряется сам замысел строительства ПИЛ для детального изучения геологической среды как главного барьера.

Изучение физико-механических свойств горных пород (БЗ-1) необходимо для решения широкого комплекса задач различного назначения, в т.ч. связанных с геомеханическими процессами. Конкретный перечень свойств горных пород определяется задачами и методиками исследований в ПИЛ, которые должны быть изложены в Программе. Прежде всего это плотностные и прочностные свойства (пределы прочности на сжатие и растяжение, сцепление, модуль упругости, коэффициент Пуассона и др.), свойства, определяющие проницаемость пород (пористость, проницаемость и др.), теплофизические свойства. Исследования проводятся в два этапа – отбор образцов горных пород (в основном керна материала скважин) и лабораторные испытания. Отбор образцов пород и испытания проводятся на всех стадиях строительства и эксплуатации ПИЛ НКМ: бурения скважин с поверхности, проходки шахтных стволов и горизонтальных выработок для ПИЛ и, при необходимости, в специальных скважинах, пробуренных из выработок. Отбор проводится

под руководством геологов со строгой геологической документацией места отбора, включая 3D привязку места отбора для последующего внесения данных в цифровой двойник ПИЛ НКМ. Для отбора образцов пород и проведения лабораторных испытаний необходимо опираться на существующие ГОСТы и официально утвержденные методики [28–34 и др.].

Изучение напряжений в массиве направлено на определение величин и направлений главных напряжений для различных горно-геологических условий. Определение напряжений *in situ* может выполняться различными способами (метод Лимана, метод Хаста, метод деформометров, метод разгрузки щелями, метод гидроразрыва, метод ВНИМИ, метод параллельных скважин и др.). Мы остановились на следующих четырех методах.

Определение величин и ориентации напряжений методом полной разгрузки керна (БЗ-2). Цель — определение величин и направлений главных напряжений. Существует несколько модификаций метода. В его основу положено явление восстановления выбуренного керна своих первоначальных размеров после снятия давления. Полный тензор напряжений определяется по результатам измерений как минимум в двух ортогональных скважинах. По измеренным деформациям, зная упругие константы пород (модуль продольной упругости и коэффициент поперечных деформаций), вычисляют действовавшие в массиве напряжения, используя математический аппарат теории упругости. На рис. 6 показаны наиболее известные варианты метода полной разгрузки [18].

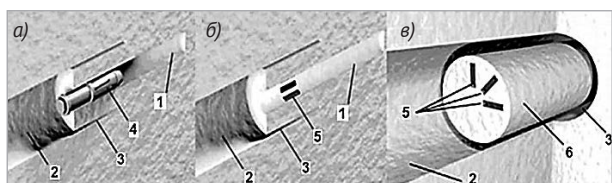


Рис. 6. Варианты метода полной разгрузки:
 а) по схеме Хаста; б) по схеме Лимана; в) по схеме ВНИМИ.
 1 — опережающая скважина; 2 — разгрузочная скважина;
 3 — кольцевая щель; 4 — скважинный деформометр;
 5 — тензодатчики; 6 — обуренный керн [18]

К недостаткам метода необходимо отнести достаточно большую погрешность, обусловленную неоднородностью геологической среды. Опыт проведения подобных работ показал, что напряжения в скважинах, пробуренных в 5–10 метрах друг от друга, могут отличаться на десятки

процентов. Использование метода практически невозможно в сильно трещиноватых массивах.

Определение величин и ориентации напряжений с использованием деформометров (БЗ-3). Для этого деформометры размещаются в скважинах и регистрируются поперечные и продольные деформации стенок скважины или суммарный эффект деформаций скважины. Применяют два типа деформометров. Первый тип — податливые деформометры, фиксирующие деформации стенок скважины, практически не оказывая воздействия на массив пород. Второй тип — жесткие датчики, оказывающие активное сопротивление деформациям горных пород. Существует большое количество моделей деформометров. Наиболее широко используют скважинные гидравлические датчики, применение которых основано на методе разности давлений. В скважину помещают гидравлический датчик типа цилиндрического домкрата с резиновой оболочкой и создают на контакте с горной породой давление. Изменение давления в гидросистеме, фиксируемое манометром, является исходным для расчета изменения напряжений. Существуют также поперечные и продольные деформометры на основе тензодатчиков, индукционных, емкостных, магнитострикционных датчиков, фотоупругие из оптически чувствительного стекла и др.

Изучение напряжений методом гидроразрыва (БЗ-4). Метод основан на принципе восстановления первоначальных напряжений в массиве горных пород и дальнейшего увеличения давления вплоть до образования в массиве трещин разрыва [18]. Из горной выработки в направлении действия одного из главных напряжений бурится измерительная скважина, в которой на определенной глубине устанавливаются два пакера. Через отверстие в одном из них в скважину нагнетается жидкость. При достижении в замкнутом объеме участка скважины определенного значения давления жидкости, по площадке в массиве с наибольшим растягивающим тангенциальным напряжением инициируется трещина разрыва. Направление развития трещины в этом случае будет совпадать с направлением действия максимального сжимающего напряжения, находящегося в плоскости, ортогональной оси скважины [19].

Метод технически сложен, поэтому его выбор требует более детального обоснования. Преимущество заключается в том, что он является прямым методом определения напряжений разрушения пород в их естественном залегании. Поэтому, несмотря на технические сложности, целесообразно его использование в ПИЛ,

ориентировочное количество экспериментов определяется возможностью бурения скважин. Места экспериментов должны быть рассредоточены по всей площади ПГЗРО для основных типов пород. Целесообразно скважины ориентировать вертикально. Их длина 10–15 метров. Возможно объединение эксперимента с наблюдениями другими методами, например с методом акустической эмиссии при различных режимах нагрузки и разрушения пород, воздействия тепла на прочность пород и др.

Определение напряжений в массиве пород методом дискования зерна (БЗ-5), как описано выше,

проводится для глубин от 300 метров и ниже с целью оценки степени удароопасности горных пород. Места проведения экспериментов согласуются в процессе геологических обследований забоев выработок.

Важность определения напряжений *in situ* очевидна, т. к. они закладываются во многие модели обоснования безопасности. Проиллюстрировать это можно примером изучения напряжений в ПИЛ АЕСЛ (Канада) [27]. На левом графике рис. 7 показаны горизонтальные напряжения, полученные в ПИЛ АЕСЛ различными методами для интервала глубин от 0 до 950 метров. Была

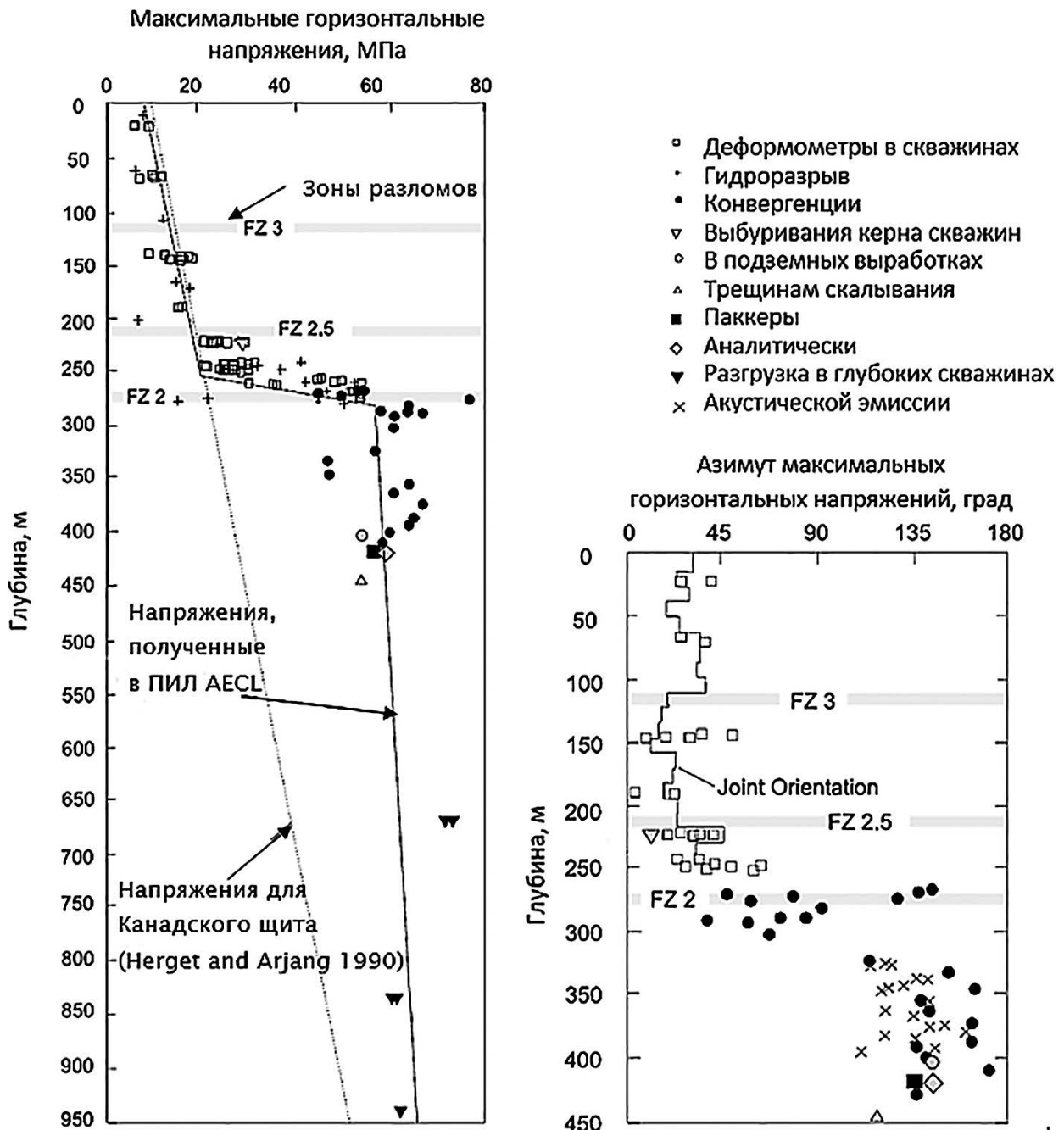


Рис. 7. Максимальные величины напряжений и направления действия главных напряжений по данным различных методов, используемых в ПИЛ АЕСЛ

зафиксирована важнейшая особенность, состоящая в резком увеличении абсолютных значений напряжений в интервале глубин от 250 до 300 метров, связанная с пологопадающим под углом 30° разломом FZ-2. Причем по сравнению с экспериментальной зависимостью напряжений от глубины в виде монотонной прямой, полученной для Канадского щита, этот перелом очень существенен. Такая же особенность зафиксирована и для направления действия главных напряжений на правом графике рис. 7. Зарегистрированный рост напряжений с 20 до 55 МПа очень большой для интервала, который имеет размер 50 метров, и может служить причиной целого ряда негативных геомеханических процессов.

Представляется полезным привести высказывание канадских ученых: «Важный урок, извлеченный из исследования напряжений в ПИЛ АЕСЛ, заключается в том, что определение тензора напряжений — это процесс, который строится на последовательных этапах сбора информации. Он начинается с метода гидравлического разрыва пласта в скважинах, пробуренных с поверхности, и завершается крупномасштабными экспериментами в горных выработках. Измерения напряжений могут дополняться наблюдениями за разрушением горных пород или микросейсмическими процессами. Новые данные о напряжениях добавляются к предыдущим и последовательно повышают уровень достоверности определения тензора напряжений *in situ*. Это не означает, что качественная информация не может быть получена в ходе испытаний в одной скважине, но уверенность в этом может быть достигнута только с помощью различных методов испытаний» [27].

Изучение смещений и расслоения приконтурной части породного массива проводится с целью определения скоростей деформаций массива, связанных с влиянием выработанного пространства, для различных категорий трещиноватости массива, а также изучения поведения крупных трещин, которые будут обнаружены на стадии проходки выработок. Эти трещины служат своего рода «маячками» процессов сдвига. Основной регистрируемой величиной является смещение репера относительно некоторой точки, за которую обычно принимают контур выработки. При этом координаты этой точки периодически контролируются маркшейдерской службой. В качестве методического материала могут использоваться [35—38 и др.], а также более современные издания.

Определение конвергенции подземных выработок методом глубинных реперов (БЗ-6). Известно,

что зона, примыкающая к контуру выработки, характеризуется пониженными напряжениями. В ее пределах породы деформируются. При этом реализуются как упругие, так и неупругие деформации, последние проявляются в виде раскрытия трещин. Эту зону называют *зоной неупругих деформаций*. Ее параметры определяются интегральным воздействием различных факторов — тектоническими напряжениями, формой и размерами выработок, способом их проходки, упругими свойствами пород, температурой и др. Именно зона неупругих деформаций в первую очередь определяет изоляционные свойства пород.

Динамику развития зоны неупругих деформаций изучают инструментальными методами, путем измерения абсолютных и относительных перемещений на контуре выработки и в глубине массива. В глубине массива деформации измеряют с помощью метода глубинных реперов. Обычно в скважине длиной до 15 метров размещают от 3 до 6 глубинных реперов.

На рис. 8 показана одна из возможных схем экспериментального пункта по изучению

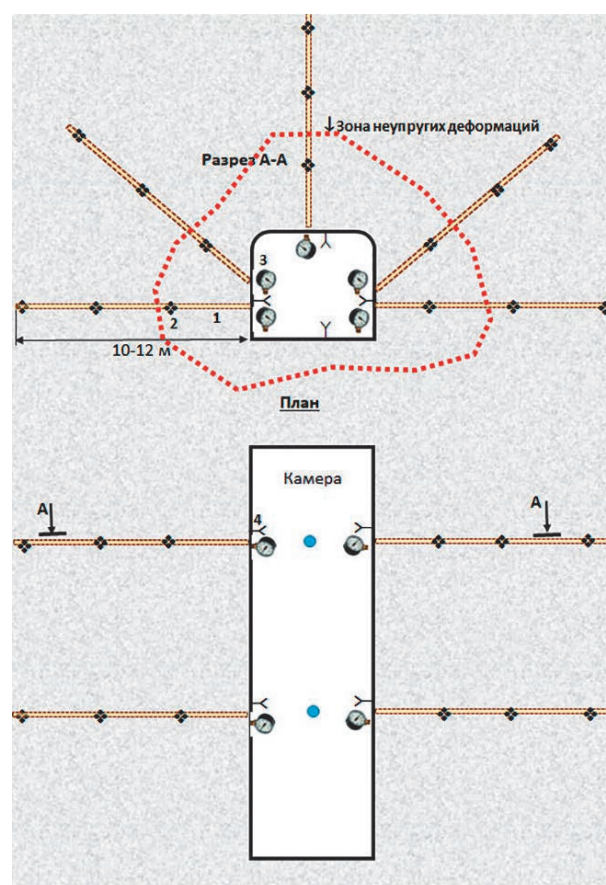


Рис. 8. Схема эксперимента по изучению неупругих деформаций вокруг выработок (БЗ-6): 1 — скважина; 2 — глубинный репер; 3 — регистрирующее устройство; 4 — контурный репер

неупругих деформаций. Для этого в исследовательской камере (размером $\sim 5 \times 5$ м) бурятся два веера по 5 скважин длиной 15 м, в них устанавливаются по 3 глубинных репера на глубине 3, 8 и 12 метров, имеющих жесткую связь с измерительными устройствами на устье скважины, которые в автоматическом режиме передают информацию в диспетчерский пункт. Перед установкой реперов проводится визуальное геологическое обследование скважин (возможно проведение в них геофизических измерений и лазерного сканирования). На контуре выработки устанавливаются контурные репера в бортах, кровле и подошве выработки. Время эксперимента может составлять 4–5 лет. При этом есть возможность повышения информативности путем размещения в массиве мощного источника тепла, имитирующего контейнер с РАО, по аналогии с зарубежными исследованиями, представленными в [10, 11],

Контроль динамики раскрытия крупных трещин (БЗ-7). Контроль проводится в местах пересечения горизонтальными выработками крупных трещин [2, 38]. На этих трещинах, обнаруженных при проходке выработок, устанавливаются датчики, которые регистрируют величину раскрытия трещин. Конструктивно это обычные потенциометры с дистанционным управлением.

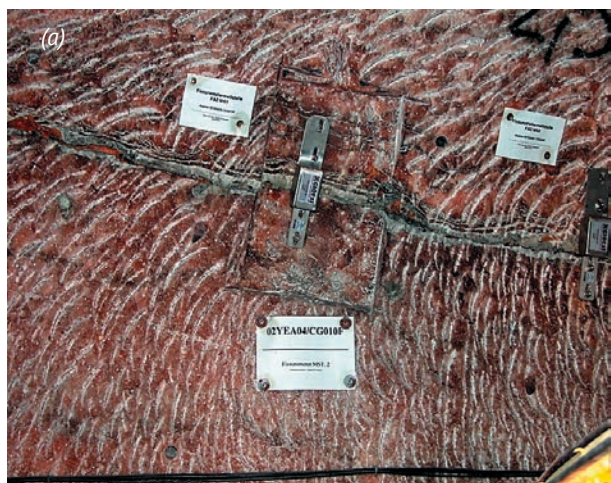


Рис. 9. Пример установки датчика на трещине в солях в ПИЛ Горлебен (Германия) (а) и одна из конструкций трещинметра-потенциометра (б)

Информация передается по сети на центральный пункт. Время проведения эксперимента не ограничено (5–6 лет). Сам эксперимент очень прост в исполнении, поэтому можно на горизонте установить до 20–30 датчиков. Основное требование — отсутствие в месте наблюдений бетонной крепи. На рис. 9а для примера показан такой датчик, установленный на трещине в ПИЛ Горлебен (Германия), а на рис. 9б одна из конструкций такого датчика.

Изучение трещиноватости породного массива проводится в основном геологическими методами на обнажениях горных выработок и по керну скважин. В настоящее время широко внедряются в практику телевизионный и лазерный методы исследования стенок скважин, а также не разрушающие среду геофизические методы.

Изучение трещиноватости породного массива геолого-геофизическими методами (БЗ-8). Геофизические методы по сравнению с геологическими обладают преимуществом — они позволяют выявлять основные закономерности пространственного распределения трещин, пористости, слоистости и анизотропии, а также количественно оценивать интегральную степень структурной нарушенности пород в глубине массива без нарушения его сплошности (бурения скважин), что весьма важно для ПГЗРО. Однако в этом заключается и слабость геофизических методов: они являются косвенными методами и требуют обязательной заверки в контрольных точках, в том числе путем бурения скважин и шпуров, что для специфики ПГЗРО не всегда может быть возможным. В основном используются методы регистрации упругих колебаний на различных частотах: сейсмический — на частотах от 30 до 300–500 Гц, акустический — на частотах от 0,3–0,5 до 10 кГц, ультразвуковой — на частотах более 10 кГц. Для изучения флюидопроводящей среды эффективным является электрометрический метод. Существует масса стандартных методик проведения геофизических наблюдений, которые невозможно охватить в рамках настоящей статьи.

Сейсмоакустический мониторинг в выработках ПИЛ для выявления активных нарушений и разрушения пород (БЗ-89). Самостоятельным геофизическим методом, широко применяемым в шахтных условиях, является сейсмоакустический мониторинг. Под сейсмоакустикой различными исследователями понимается достаточно широкий диапазон методов. В нашем случае это изучение естественной и наведенной акустической эмиссии (АЭ). АЭ — излучение упругих волн, возникающее в процессе локальной

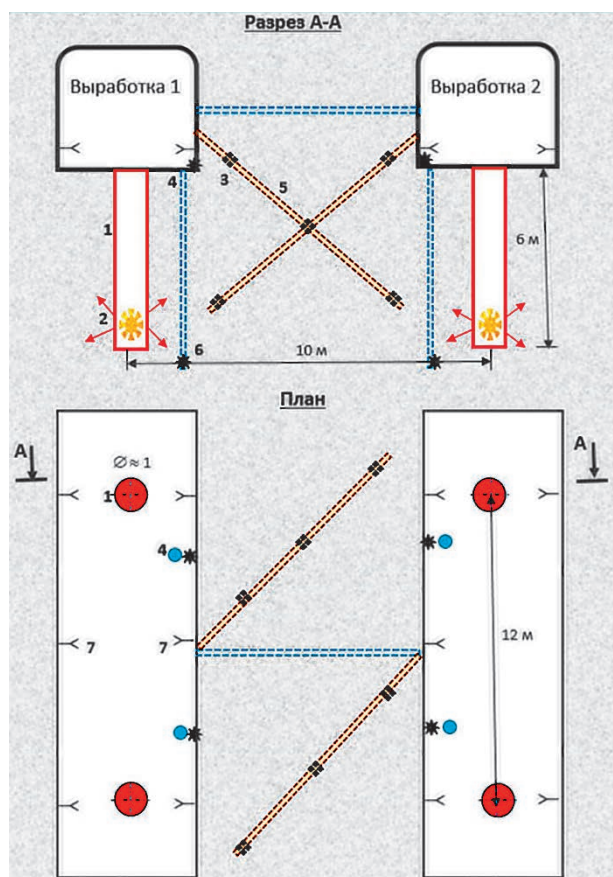


Рис. 10. Один из вариантов эксперимента по изучению изменения свойств массива при нагреве (БЗ-12)
 1 – скважина для теплового источника; 2 – тепловой источник; 3 – глубинные реперы; 4 – скважины для геофизических измерений и измерений температуры; 5 – скважины для экстензометров; 6 – датчики сейсмоакустической эмиссии; 7 – контурные (створовые) реперы на бортах выработок

динамической перестройки структуры пород. Основные источники АЭ — процессы неупругой деформации пород, связанные с возникновением и развитием микро- и макротрещин, и трение блоков по трещинам. Верхняя граница рабочего диапазона датчиков АЭ (геофононов) обычно не превышает 100 герц и редко достигает 1 кГц. Исследования в сейсмоактивных регионах показали, что в звуковом диапазоне свыше 1 кГц регистрируются достаточно мощные геоакустические сигналы, в т. ч. связанные с подготовкой землетрясений.

В рамках ПИЛ НКМ данный метод может использоваться для решения очень широкого круга экспериментов. Это следует и из анализа использования данного метода в зарубежных ПИЛ. Представляется целесообразным использование метода для решения следующих трех задач.

Первое направление — обнаружение (локация) местоположения активных трещин и новых зарождающихся очагов разрушения в глубине

массива. Особенно это важно для верхней части массива над выработками ПГЗРО, где развиваются сдвигения над выработанным пространством. АЭ активно развивается также в локальных зонах концентрации полей напряжений в активных приразломных зонах. Результаты сейсмоакустического мониторинга помогут при построении различных геомеханических моделей.

Второе направление — оценка стабильности участков породного массива при проведении различных экспериментов, например теплового воздействия от РАО (эксперименты БЗ-12, БЗ-13), рис. 10.

Третье направление — исследование особенностей проявлений АЭ для различных режимов смещений по границам между структурными блоками горной породы. Это направление получило развитие в последнее время [23], когда в лабораторных условиях были установлены зависимости АЭ для всего спектра деформационных режимов — от динамического срыва до стабильного скольжения.

Изучение техногенного воздействия на массив включает в себя прогноз дополнительного нарушения массива от следующих факторов:

- а) выработанного пространства, которое приводит к образованию локальных зон концентрации напряжений, определяющие конструктивные особенности выработок и скважин подземной части ПГЗРО;
- б) буровзрывных горнопроходческих работ, создающих зону нарушенности вокруг выработок;
- в) теплового воздействия от РАО.

Необходимо подчеркнуть, что каждый из экспериментов требует подробного объемного описания, поэтому остановимся только на общих моментах.

Исследование нарушенности пород, образующейся в ходе проведения горнопроходческих работ (БЗ-10). Эксперимент ZEDEX проводился в ПИЛ ASPE (рассмотрен выше) и ПИЛ АЕСЛ. Сохранность приконтурной части массива определяется рядом природных и техногенных свойств и процессов. Прежде всего — технологией ведения БВР, абсолютными величинами и направлением действия главных и локальных напряжений, степень концентрации которых связана с геометрическими параметрами выработок, упругопрочностными свойствами и трещиноватостью горных пород и т. п.

В практике горнопроходческих работ с использованием БВР существует две группы технологий:

- а) максимального дробления пород взрывом шпуровых зарядов (обычная технология);

б) применения контурных зарядов и зарядов с уменьшенной мощностью ВВ (щадящая технология).

Существуют три причины образования нарушенной зоны вокруг подземных выработок:

- техногенное трещинообразование в результате воздействия взрывчатых веществ;
- разрушение массива под действием высокой концентрации напряжений вокруг образуемых выработок (связано также со скоростью проходки выработок);
- разрушение массива вдоль тектонических нарушений и новообразованных трещин.

Согласно публикациям, мощность нарушенной зоны на горных предприятиях при «обычной» БВР технологии составляет 0,3–1,4 м, а при использовании контурного взрывания менее 0,4 м [24]. В качестве примера можно привести результаты натурных испытаний, выполненных Горным институтом КНЦ РАН на Юкспорском тоннеле № 2 ОАО «Апатиты» [25]. Горно-геологические условия очень близки к условиям ПГЗРО, глубина расположения тоннеля 454 м, прочность пород на сжатие 184 МПа, породы II группы трещиноватости, тектонические напряжения в пределах 19–25 МПа. Измеренная с помощью реометрического метода зона нарушений при проведении БВР составила для пород с повышенной трещиноватостью 0,6 м, для пород со средней трещиноватостью 0,3–0,4 м.

В другом примере [26] приведены данные по гранитам и гранитогнейсам, (прочность пород на сжатие 160 МПа), глубина работ – 100 м, породы средне трещиноватые, размер структурного блока 0,5–1,0 м, напряжения достаточно низкие – 10 МПа, поэтому определяющим в повреждении пород был структурный фактор. При проходке применялась «обычная» технология БВР. Обследование показало, что мощность нарушенной зоны после 20–40 лет эксплуатации горных выработок составила 0,8 м.

Таким образом, даже применение «обычной» технологии БВР позволяет обеспечить размеры зоны нарушенных пород менее одного метра. Применение технологии контурного взрывания позволит уменьшить эту величину как минимум в 2 раза.

Изучение удароопасности пород при проходке выработок (БЗ-11).

Как говорилось выше, изучение удароопасности целесообразно начать с изучения хрупких свойств пород и измерений методом дискования керна в скважинах, начиная с глубины 300 м. Целесообразно также выполнить предварительное моделирование НДС, исследовать поведение массива и свойства пород в опережающих

скважинах, провести геофизические наблюдения за состоянием массива в динамике (включая сейсмоакустику), особенно при приближении к крупным тектоническим нарушениям. После чего принять решение о продолжении исследований или об отсутствии опасности разрушения пород в динамической форме [40, 41].

Два оставшихся эксперимента – исследование стабильности массива и обоснование конструктивных размеров целиков и скважин (БЗ-12) и изучение изменения свойств массива при нагреве (БЗ-13) очень важны для ПИЛ НКМ. Их описанию будет посвящена отдельная статья.

Заключение

1. Предложенные эксперименты по исследованию геомеханических процессов в подземной исследовательской лаборатории направлены на решение главной задачи оценки и прогноза сохранности изоляционных свойств массива в зависимости от развития процессов сдвига, деформаций, разуплотнения и его разрушения, обусловленного внедрением в геологическую среду крупного инженерного сооружения, а также локальной задачи – обеспечить безопасность ведения горных работ при строительстве ПИЛ и ПГЗРО.

2. Изучение влияния техногенных факторов на состояние природного и инженерных барьеров и получение новой информации о геомеханических процессах в породном массиве позволят реализовать первоочередные мероприятия «Комплексной программы исследований для обоснования долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров ПГЗРО в Нижнеканском массиве».

3. В связи с началом строительства ПИЛ НКМ в 2019–2020 гг. необходима разработка Программы геомеханических исследований, которая должна включать в себя обоснование методов исследований, методик проведения наблюдений, объемов необходимых для исследований выработок и скважин, взаимосвязь с другими экспериментами и т. д., которые, с одной стороны, должны быть эффективными при решении указанных задач, а с другой – не быть избыточными.

4. Для каждого эксперимента должен быть составлен типовой паспорт, где детально должны быть изложены: этапность выполнения экспериментов, необходимое оборудование и аппаратура, алгоритм обработки и интерпретации данных, как они будут в дальнейшем использоваться при прогнозе изоляционных свойств пород и т. д.

5. Дискуссионным до сих пор остается вопрос о том, до какой степени мы можем нарушать геологический массив скважинами, которые необходимы для изучения и уточнения характеристик массива, включая скважины, пробуренные с земной поверхности. С одной стороны, чем их больше, тем более детальную информацию о массиве мы имеем, а с другой — должен существовать какой-то предел, достигнув которого мы критически изменяем нарушенность массива и его гидравлическую проницаемость. Пока в публикациях, за исключением одного эксперимента в ПИЛ ASPE, нет анализа подобной ситуации.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИР, утвержденного Минобрнауки России.

Литература

1. Морозов В. Н., Татарин В. Н., Кафтан В. И., Маневич А. И. Подземная исследовательская лаборатория: геодинамические и сейсмотектонические аспекты безопасности // Радиоактивные отходы. 2018. № 3 (4). С. 16–29.
2. Баклашов И. В. Геомеханика. В 2 т. М.: Изд-во Московского горного университета. 2004. Т. 1 Основы геомеханики. 208 с.
3. Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 114–120.
4. Дорофеев А. Н., Большов Л. А., Линге И. И., Уткин С. С., Савельева Е. А. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 33–42.
5. Программа проведения исследований в подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) на Нижнеканском массиве для подтверждения проектных параметров безопасности подземного захоронения РАО классов 1 и 2: Решение секции №1 «Экологическая и радиационная безопасность пунктов долговременного хранения, консервации и захоронения РАО» НТС № 10 Госкорпорации «Росатом» от 06.04.2016.
6. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности» (НП-055-14). М.: Ростехнадзор. 2014. 29 с.
7. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. «Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов» (НП-100-17). М.: Ростехнадзор. 2017. 121 с.
8. Andersson J. C. Äspö Hard Rock Laboratory Äspö Pillar Stability Experiment, Final report Rock mass response to coupled mechanical thermal loading. Svensk Kärnbränslehantering AB, 2007. SKB TR-07-01.
9. Методические указания по прогнозу степени удароопасности участков массива горных пород (руд) по разделению керна на диски и выходу буровой мелочи. Л., 1985. 24 с.
10. Andersson J. C., Martin C. D. The Aspo pillar stability experiment: Part I—Experiment design // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 46 (2009) 865–878.
11. Andersson J. C., Martin C. D., Stille H. The Aspo Pillar Stability Experiment: Part II—Rock mass response to coupled excavation-induced and thermal-induced stresses // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 46 (2009) 879–895.
12. Koyama T., Chijimatsu M., Shimizu H., Nakama S., Fujita T., Kobayashi A., Ohnishi Y. Numerical modeling for the coupled thermo-mechanical processes and spalling phenomena in Äspö Pillar Stability Experiment (APSE) // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 5 (2013) 58–72.
13. Отчет по обоснованию безопасности деятельности по размещению и сооружению не относящегося к ядерным установкам пункта хранения РАО, создаваемого в соответствии с проектной документацией на строительство объектов окончательной изоляции РАО (Красноярский край, Нижнеканский массив) в составе подземной исследовательской лаборатории. М.: ФГУП «НО РАО». 2015.
14. Saiang D. Blast-Induced Damaged Zone Studies Final Report to Trafikverket. Division of Mining and Geotechnical Engineering Luleå University of Technology Sweden. 2011. 193 p.
15. Андерсон Е. Б., Белов С. В., Камнев Е. Н., Колесников И. Ю., Лобанов Н. Ф., Морозов В. Н., Татарин В. Н. Подземная изоляция радиоактивных отходов. М.: «Горная книга». 2011. 592 с.
16. Морозов В. Н., Гупало Т. А., Татарин В. Н. Прогноз изоляционных свойств породного массива при размещении радиоактивных материалов в горных выработках // Горный вестник. 1999. № 6. С. 99–105.
17. Морозов В. Н., Буров И. Ю., Татарин В. Н. Прогнозирование потенциальных каналов распространения экологически опасных веществ в геологической среде // Environment, Technology, Resources: Proceeding of the 3rd Intern. conf. Rezekne. 2001. С. 102–106.
18. Хмелинин А. П. Разработка комплексного геофизического метода для выбора мест заложения скважин геомеханических измерений и контроля

- процесса их бурения: Дисс... к. т. н. Новосибирск. 2014. 165 с.
19. Шкуратник, В. Л., Николенко П. В. Методы определения напряжённо-деформированного состояния массива горных пород: научно-образовательный курс. М.: МГТУ, 2012. 112 с.
20. Гупало В. С. Оценка параметров техногенной трещиноватости подземного объекта захоронения высокоактивных отходов для прогноза его изоляционных свойств // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 11. С. 92—100.
21. Kamnev E. N, Morozov V. N., Tatarinov V. N., Kaftan V. I. Geodynamics aspects of investigations in underground research laboratory (Niznekansk massif) // Eurasian mining. No 2. Pp. 11—14. 2018. DOI: 10.17580/em.2018.02.03.
22. Морозов В. Н., Татаринов В. Н. Прогнозирование устойчивости геологической среды при выборе мест размещения и эксплуатации объектов ядерного топливного цикла // Инженерная экология. 2008. № 5. С. 10—16.
23. Кочарян Г. Г., Остапчук А. А. Акустическая эмиссия при различных режимах межблоковых перемещений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 1. С. 3—13.
24. Мельников Н. Н., Епихамов Ю. А., Абрамов Н. Н. Научные основы интенсификации возведения большепролетных подземных сооружений в скальном массиве. Апатиты, КНЦ РАН. 2008. 226 с.
25. Абрамов Н. Н., Епихамов Ю. А., Абрамчук В. П. Геомеханический мониторинг скального массива при проходке Юкспорского тоннеля № 2 // Метро и тоннели. 2012. № 1. С. 33—35.
26. Абрамов Н. Н., Епихамов Ю. А. Оценка состояния массива пород большепролетных подземных сооружений в процессе длительной эксплуатации // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12. № 4. С. 596—600.
27. Chandler, Neil A., Rodney S. Read, C. Derek Martin. In Situ Stress Measurement for Nuclear Fuel Waste Repository Design // Proc. 2nd North American Rock Mechanics Symposium. Montreal, 1996. Balkema: Rotterdam. Pp. 929—936.
28. ГОСТ 21153.0-75 Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний.
29. ГОСТ 21153.1-75 Породы горные. Метод определения коэффициента крепости по Протодьяконову
30. ГОСТ 21153.2-84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии.
31. ГОСТ 21153.2-85 Методы определения предела прочности при одноосном растяжении.
32. ГОСТ 21153.8-88 Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии.
33. ГОСТ 25493-82 Породы горные. Метод определения удельной теплоемкости и коэффициента температуропроводности.
34. ГОСТ 28985-91 Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии.
35. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений / М-во цв. мет. СССР. Горное управление. ВНИМИ. М.: Недра. 1988. 112 с.
36. Методические указания по определению устойчивости пород в зависимости от их нарушенности на рудных месторождениях. Л., ВНИМИ, 1974.
37. Инструкция по проведению маркшейдерских работ. РД-07-603-03. 2003. 92 с.
38. Борщ-Компоницец В. И. Геодезия. Маркшейдерское дело: Учеб. для горн. и геол.-развед. спец. вузов. М.: Недра, 1989. 511 с.
39. Требования к разведке места для захоронения ВАО в скальной горной породе (АСТЕР) : Отчет о НИР. М.: ДБЕ Технолоджи ГмбХ. 2005.
40. Петухов И. М., Линьков А. М. Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра. 1982. 223 с.
41. Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов: Том 2 / Отв. ред. Н. Н. Мельников. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 261 с.

Информация об авторах

Татаринов Виктор Николаевич, доктор технических наук, заведующий лаборатории геодинамики, Геофизический центр РАН (119296, Москва, ул. Молодежная, 3), e-mail: v.tatatrinov@gcras.ru.

Морозов Владислав Николаевич, профессор, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Геофизический центр РАН (119296, Москва, ул. Молодежная, 3), e-mail: v.morozov@gcras.ru.

Маневич Александр Ильич, научный сотрудник, Геофизический центр РАН, аспирант (119296, Москва, ул. Молодежная, 3), e-mail: ai.manevich@yandex.ru.

Татаринова Татьяна Александровна, старший научный сотрудник, Геофизический центр РАН (119296, Москва, ул. Молодежная, 3), e-mail: tata@wdbc.ru.

Библиографическое описание статьи

Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Маневич А. И., Татаринова Т. А. Подземная исследовательская лаборатория: к программе геомеханических исследований // Радиоактивные отходы. 2019. № 2 (7). С. 101–118. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-101-118.

UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY: TO THE PROGRAM
OF GEOMECHANICAL RESEARCH

Tatarinov V. N.^{1,2}, Morozov V. N.¹, Manevich A. I.^{1,3}, Tatarinova T. A.^{1,2}

¹Geophysical Center of RAS, Moscow, Russia

²Institute of Physics of the Earth. O. Yu. Schmidt, Moscow, Russia

³Mine Institute of NITU "MISiS", Moscow, Russia

Article received

The main directions and tasks of geomechanical research in an underground research laboratory are formulated. A set of geomechanical methods and experiments that can be used as the basis for the development of a detailed research program and passports of field experiments is proposed. This will help to assess and predict the long-term preservation of the insulating properties of the rock mass and ensure the safety of mining operations during the construction of a deep disposal facility for high-level radioactive waste in the Yeniseisky site.

Key words: high-level radioactive waste, underground research laboratory, geomechanical processes, stress-strain state.

References

1. Morozov V. N., Tatarinov V. N., Kaftan V. I., Manevich A. I. Podzemnaya issledovatel'skaya laboratoriya: geodinamicheskie i seismotektonicheskie aspekty bezopasnosti. [Underground Research Laboratory: Geodynamic and Seismotectonical Aspects of Safety]. *Radioaktivnye Othody — Radioactive Waste*, 2018, no. 3 (4), pp. 16–29.
2. Baklashov I. V. *Geomekhanika*. [Rock mechanics] V 2 t. M.: Izd-vo Moskovskogo gornogo universiteta. 2004. T.1 Osnovy geomekhaniki. 208 p.
3. Strategiya sozdaniya punkta glubinnogo zahoroneniya radioaktivnyh othodov. [Strategy for the establishment of a deep disposal facility for radioactive waste]. *Radioaktivnye Othody — Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 114–120.
4. Dorofeev A.N., Bolshov L. A., Linge I. I., Utkin S. S., Saveleva E. A. Strategicheskij master-plan issledovaniy v obosnovanie bezopasnosti sooruzheniya, ehkspluatatsii i zakrytiya punkta glubinnogo zahoroneniya radioaktivnyh othodov. [Strategic Master Plan for R&D Demonstrating the Safety of Construction, Operation and Closure of a Deep Geological Disposal Facility for Radioactive Waste]. *Radioaktivnye Othody — Radioactive Waste*, 2017, no. 1, pp. 32–41.
5. Programma provedeniya issledovaniy v podzemnoj issledovatel'skoj laboratorii (PIL) na Nizhnekanskom massive dlya podtverzhdeniya proektnyh parametrov bezopasnosti podzemnogo zahoroneniya RAO klassov 1 i 2: Reshenie sekcii № 1 «Ehkologicheskaya i radiacionnaya bezopasnost' punktov dolgovremennogo hraneniya, konservatsii i zahoroneniya RAO» NTS № 10 Goskorporatsii «Rosatom» ot 06.04.2016.
6. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj ehnergii. «Zahoroneniya radioaktivnyh othodov. Principy, kriterii i osnovnye trebovaniya bezopasnosti» (NP-055-14). M.: Rostekhnadzor. 2014. 29 p.
7. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj ehnergii. «Trebovaniya k sostavu i sodержaniyu otcheta po obosnovaniyu bezopasnosti punktov zahoroneniya radioaktivnyh othodov» (NP-100-17). M.: Rostekhnadzor. 2017. 121 s.
8. Andersson J. C. *Äspö Hard Rock Laboratory Äspö Pillar Stability Experiment, Final report Rock mass response to coupled mechanical thermal loading*. Svensk Kärnbränslehantering AB, 2007. SKB TR-07-01.
9. *Metodicheskie ukazaniya po prognozu stepeni udaroopasnosti uchastkov massiva gornyh porod (rud) po*

- razdeleniyu kerna na diski i vyhodu burovoj melochi. L., 1985. 24 p.
10. Andersson J. C., Martin C. D. The Aspö pillar stability experiment: Part I—Experiment design. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2009, no. 46, pp. 865–878.
11. Andersson J. C., Martin C. D., Stille H. The Aspö Pillar Stability Experiment: Part II—Rock mass response to coupled excavation-induced and thermal-induced stresses. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2009, no. 46, pp. 879–895.
12. Koyama T., Chijimatsu M., Shimizu H., Nakama S., Fujita T., Kobayashi A., Ohnishi Y. Numerical modeling for the coupled thermo-mechanical processes and spalling phenomena in Äspö Pillar Stability Experiment (APSE). *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2013, no. 5, pp. 58–72.
13. *Otchet po obosnovaniyu bezopasnosti deyatel'nosti po razmeshcheniyu i sooruzheniyu ne odnosyashchegosya k yadernym ustanovkam punkta hraneniya RAO, sozdavaemogo v sootvetstvii s proektnoj dokumentaciej na stroitel'stvo ob'ektov okonchatel'noj izolyacii RAO (Krasnoyarskij kraj, Nizhnekanskij massiv) v sostave podzemnoj issledovatel'skoj laboratorii*. M.: FGUP «NO RAO». 2015.
14. Saiang D. *Blast-Induced Damaged Zone Studies Final Report to Trafikverket*. Division of Mining and Geotechnical Engineering Luleå University of Technology Sweden. 2011. 193 p.
15. Anderson E. B., Belov S. V., Kamnev E. N., Kolesnikov I. YU., Lobanov N. F., Morozov V. N., Tatarinov V. N. *Podzemnaya izolyaciya radioaktivnyh othodov*. [Underground isolation of radioactive waste]. M.: «Gornaya kniga». 2011. 592 p.
16. Morozov V. N., Gupalo T. A., Tatarinov V. N. Prognoz izolyacionnyh svojstv porodnogo massiva pri razmeshchenii radioaktivnyh materialov v gornyh vyrabotkah. [Forecast of rock mass isolation properties for radioactive waste disposal in excavations]. *Gornyj vestnik*, 1999, no. 6, pp. 99–105.
17. Morozov V. N., Burov I. Yu., Tatarinov V. N. Prognozirovanie potencial'nyh kanalov rasprostraneniya ehkologicheskoi opasnyh veshchestv v geologicheskoi srede. [Forecast of potential hazardous contaminants spreading pathways in geological medium]. *Environment, Technology, Resources: Proceeding of the 3rd Intern. conf. Rezekne*. 2001. pp. 102–106.
18. Hmelinin A. P. *Razrabotka kompleksnogo geofizicheskogo metoda dlya vybora mest zalozheniya skvazhin geomekhanicheskikh izmerenij i kontrolya processa ih bureniya*. [Development of a comprehensive geophysical method for siting boreholes for geomechanical measurements and control of the drilling process. Dr. tech. sci. diss.]. Novosibirsk. 2014. 165 p. (In Russian).
19. Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V. *Metody opredele-niya napryazhyonno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornyh porod: nauchno-obrazovatel'nyj kurs*. [Methods of stress-deformed condition determination for rock mass: scientific educational course]. M.: MGGU, 2012. 112 p.
20. Gupalo V. S. Ocenka parametrov tekhnogennoj treshchinovatosti podzemnogo ob'ekta zahoroneniya vysokoaktivnyh othodov dlya prognoza ego izolyacionnyh svojstv. [Assessment of artificial fracturing parameter for the underground high-level waste disposal facility for the purpose of forecasting its isolation properties]. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal) — Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*, 2017, no. 11, pp. 92–100.
21. Kamnev E. N., Morozov V. N., Tatarinov V. N., Kaf-tan V. I. Geodynamics aspects of investigations in underground research laboratory (Nizhnekansk mas-sif). *Eurasian mining*, 2018, no. 2, pp. 11–14. doi: 10.17580/em.2018.02.03.
22. Morozov V. N., Tatarinov V. N. Prognozirovanie ustojchivosti geologicheskoi sredy pri vybore mest razmeshcheniya i ehkspluatacii ob'ektov yadernogo toplivnogo cikla. [Forecasting the geological medium stability in siting and operation of nuclear fuel cycle facilities]. *Engineering ecology — Inzhenernaya ehkologiya*, 2008, no. 5, pp. 10–16.
23. Kocharyan G. G., Ostapchuk A. A. Akusticheskaya ehmissiya pri razlichnyh rezhimah mezhblokovyh peremeshchenij [Acoustic emission for various modes of inter-block movements]. *Physical and technical problems of mining mineral resources — Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopae-myh*, 2015, no. 1, pp. 3–13.
24. Mel'nikov N. N., Epihamov Yu. A., Abramov N. N. *Nauchnye osnovy intensivizatsii vozvedeniya bol'sheproletnyh podzemnyh sooruzhenij v skal'nom massive*. [Scientific foundations for construction of long span structures in rock mass]. Apatity, KNC RAN, 2008. 226 p.
25. Abramov N. N., Epimahov Yu. A., Abramchuk V. P. Geomekhanicheskij monitoring skal'nogo massiva pri prohodke Yuksporskogo tonnelya № 2. [Geomechanical rock monitoring in process of excavation of Yuksporsky tunnel No. 2]. *Metro and tunnels – Metro i tonneli*, 2012, no. 1, pp. 33–35.
26. Abramov N. N., Epihamov Yu. A. Ocenka sostoyaniya massiva porod bol'sheproletnyh podzemnyh sooruzhenij v processe dlitel'noj ehkspluatacii. [Assessment of the condition of long span underground structures in process of long term operation]. *Vestnik MGTU*, 2009, vol. 12, no. 4, pp. 596–600.
27. Chandler, Neil A., Rodney S. Read, C. Derek Martin. In Situ Stress Measurement for Nuclear Fuel Waste Repository Design. Proc. 2nd North American

Rock Mechanics Symposium. Montreal, 1996. Balkema: Rotterdam. Pp. 929–936.

28. GOST 21153.0-75. *Porody gornye. Otkor prob i obshchie trebovaniya k metodam fizicheskikh ispytaniy*. [State Standard 21153.0-75. Rocks. Sampling and general requirements to physical tests].

29. GOST 21153.1-75. *Porody gornye. Metod opredeleniya koehfficienta krepости po Protod'yakonovu*. [State Standard 21153.1-75. Rocks. Method for identification of Protodyakonov scale of hardness value].

30. GOST 21153.2-84. *Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom szhatii*. [State Standard 21153.2-84. Rocks. Method for determining ultimate stress for single axis compression].

31. GOST 21153.2-85. *Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom rastyazhenii*. [State Standard 21153.2-85. Method for determining ultimate stress for single axis stretching].

32. GOST 21153.8-88. *Porody gornye. Metod opredeleniya predela prochnosti pri ob'emnom szhatii*. [State Standard 21153.8-88. Rocks. Method for determining ultimate stress for single volume compression].

33. GOST 25493-82. *Porody gornye. Metod opredeleniya udel'noj teploemkosti i koehfficienta temperaturoprovodnosti*. [State Standard 25493-82. Rocks. Method for determining specific heat capacity and temperature conductivity coefficient].

34. GOST 28985-91. *Porody gornye. Metod opredeleniya deformatsionnykh harakteristik pri odnoosnom szhatii*. [State Standard 28985-91. Rocks. Method for determining deformation characteristics for single axis compression].

35. *Instrukciya po nablyudeniya za sdvizheniem gornyh porod i zemnoj poverhnosti pri podzemnoj razrabotke rudnykh mestorozhdenij* [Instruction for observing the rock and earth surface shift in process of excavation of mineral deposits] / M-vo cv. met. SSSR. Gornoe upravlenie. VNIMI. Moscow, Nedra Publ. 1988. 112 p.

36. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu ustojchivosti porod v zavisimosti ot ih narushennosti na rudnykh mestorozhdeniyah* [Guidelines for determining rock stability depending on rock fracturing at mineral deposits]. L., VNIMI, 1974.

37. *Instrukciya po provedeniyu markshejderskikh rabot. RD-07-603-03*. [Instruction for surveyor works. ПД-07-603-03]. 2003. 92 p.

38. Borshch-Komponiec V. I. *Geodeziya. Markshejderskoe delo: Ucheb. dlya gorn. i geol.-razved. spec. vuzov*. [Geodesy. Mine surveying: Textbook for mining and surveying classes]. Moscow, Nedra Publ. 1989. 511 p.

39. *Trebovaniya k razvedke mesta dlya zahoroneniya VAO v skal'noj gornoj porode (ASTER)*. [Requirements to surveillance of HLW disposal site in crystalline rock mass (ASTER)] : Otchet o NIR. M.: DBE Tekhnolodzhi GmbH. 2005.

40. Petuhov I. M., Lin'kov A. M. *Mekhanika gornyh udarov i vybrosov*. [Mechanics of bursting and outbursts.] Moscow, Nedra Publ. 1982. 223 p.

41. *Metody i sistemy sejsmodeformacionnogo monitoringa tekhnogennykh zemletryasenij i gornyh udarov: Tom 2 / Otv. red. N. N. Mel'nikov*. [Methods and systems for seismic drift monitoring of artificial earthquakes and bursting: Vol. 2 / Edited by N. N. Melnikov]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2010. 261 p.

Information about authors

Tatarinov Viktor Nikolaevich, doctor of Technical Sciences, Head. lab., Geophysical Center of RAS (3, Molodezhnaya str., Moscow, 119296, Russia), e-mail: v.tatarinov@gcras.ru.

Morozov Vladislav Nikolaevich, prof, doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Geophysical Center of RAS. (3, Molodezhnaya str., Moscow, 119296, Russia), e-mail: v.morozov@gcras.ru.

Manevich Alexander Il'ich, researcher, Geophysical Center of RAS. (3, Molodezhnaya str., Moscow, 119296, Russia), e-mail: ai.manevich@yandex.ru.

Tatarinova Tatyana Aleksandrovna, researcher, Geophysical Center of RAS (3, Molodezhnaya str., Moscow, 119296, Russia), e-mail: tata@wdbc.ru.

Bibliographic description

Tatarinov V. N., Morozov V. N., Manevich A. I., Tatarinova T. A. Underground Research Laboratory: to the Program of Geomechanical Research. *Radioactive Waste*, 2019, no.2 (7), pp. 101–118. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-101-118. (In Russian).