



Научная статья

Оценка устойчивости породного массива в районе подземной исследовательской лаборатории (Нижнеканский массив, участок Енисейский)

Д.Ж.Акматов^{1,2}, А.И.Маневич^{1,2}, В.Н.Татаринов^{1,3}✉, Р.В.Шевчук^{1,2,3}, С.М.Забродин¹¹ Геофизический центр РАН, Москва, Россия² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия³ Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Акматов Д.Ж., Маневич А.И., Татаринов В.Н., Шевчук Р.В., Забродин С.М. Оценка устойчивости породного массива в районе подземной исследовательской лаборатории (Нижнеканский массив, участок Енисейский) // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 167-178. EDN ECCWUV

Аннотация. Приведены результаты исследования геодинамических и горно-геологических условий участка Енисейский (Красноярский край), выбранного для строительства подземной исследовательской лаборатории. Лаборатория создается на глубине 500 м с целью обоснования пригодности породного массива для захоронения высокоактивных радиоактивных отходов. Породы представлены слаботрещиноватыми гнейсами, гранитами и дайками метадолеритов. Для оценки устойчивости массива выполнены полевые наблюдения на коренных обнажениях пород, включающие определение показателей качества массива, измерение трещиноватости пород и рейтинговую классификацию устойчивости по методу Н.Бартона, а также ГНСС-наблюдения за деформациями земной поверхности. Эти данные использованы при разработке трехмерной структурной модели, включающей литологию, разрывные нарушения, интрузивные тела, упруго-прочностные свойства пород, размеры зон динамического влияния разломов. Модель станет базой для задания граничных условий и построения трехмерных вариационных моделей напряженно-деформированного состояния, выявления зон концентрации опасных напряжений, а также планирования натуральных геомеханических экспериментов в горных выработках подземной лаборатории. Полученные значения модернизированного индекса Q^R для основных типов пород позволили их отнести к устойчивым и среднеустойчивым, что соответствует крепким и очень крепким породам по шкале Бартона и рейтингу массива по геомеханической классификации.

Ключевые слова: геоэкологическая безопасность; высокоактивные радиоактивные отходы; подземная исследовательская лаборатория; структурно-тектоническая модель; тектонический блок; разлом; рейтинговые оценки качества массива

Благодарность. Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки России.

Поступила: 29.10.2022

Принята: 25.10.2023

Онлайн: 26.02.2024

Опубликована: 25.04.2024

Введение. В России накоплен огромный объем радиоактивных отходов (РАО), хранение которых на земной поверхности представляет чрезвычайную опасность для населения и окружающей среды. Наиболее опасными являются высокоактивные РАО, содержащие радионуклиды с периодом полураспада более 10 тыс. лет. На современном уровне научно-технического прогресса самым надежным способом удаления их из биосферы является захоронение РАО в глубокие непроницаемые геологические формации (кристаллические породы, соли, туфы). Фундаментальным условием обеспечения геоэкологической безопасности захоронения РАО являются изоляционные способности породного массива и слабоактивный геодинамический режим территории. Концепция безопасности геологических хранилищ РАО основана на использовании принципа многобарьерности, когда изоляцию РАО обеспечивает комплекс инженерных и природных барьеров. Каждый из барьеров выполняет свои функции в течение определенного времени. Очевидно, что



самым долговечным является геологический барьер. Однако тектонические движения (медленные криповые и быстрые сейсмические) могут привести к разрушению структурно-тектонического блока (дальняя зона) с размещенными в нем выработками пункта глубинного захоронения РАО (ПГЗРО). Не меньшую опасность представляют геомеханические процессы, приводящие к образованию высокоградиентных зон концентрации напряжений или ослаблению приконтурной части (ближней зоны) горных выработок ПГЗРО.

В 2022 г. в гранитогнейсовых породах Нижнеканского массива в 20 км севернее Красноярска началось строительство подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) для принятия окончательного решения о возможности строительства ПГЗРО [1, 2]. Исследования в ПИЛ ведутся во многих развитых странах, использующих ядерные технологии: Швеции (Äspö), Финляндии (Onkalo), Швейцарии (Grimsel), Германии (Горлебен) [3-5], Японии (Mizunami), Китае (Бэйшань) и др. [6, 7]. В России разрабатывается программа исследований для ПИЛ Нижнеканского массива. Немаловажная часть этих исследований – геомеханические эксперименты. Для их проведения планируются специальные камеры и глубокие скважины [8-11]. Проектные решения по организации систем наблюдений включают обоснование методов и методик измерений оптимальных мест для датчиков и проведения натуральных экспериментов, выбор необходимой аппаратуры и технических средств, взаимосвязь с другими экспериментами, алгоритмы обработки результатов наблюдений и т.д. [12].

В статье приведены результаты разработки трехмерной геомеханической модели породного массива на участке Енисейский как начальной стадии этих работ. Предполагается, что на ее основе будут планироваться схемы расположения камер и скважин для натуральных геомеханических экспериментов, размещения датчиков сети мониторинга и задаваться граничные условия для численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) пород в пределах участка.

Методы. На рис. 1 приведен вариант объемно-планировочного решения расположения исследовательских выработок в ПИЛ на конец 2018 г. Лаборатория располагается на глубине 500 м от земной поверхности и включает три шахтных ствола (вентиляционный, эксплуатационный для спуска РАО и персонала), систему горизонтальных выработок, исследовательские камеры и скважины. Эта схема носит предварительный характер и будет уточняться в зависимости от выявления особенностей геологического строения массива [1]. В первую очередь еще

до проходки выработок должна быть разработана классификация устойчивости вмещающих пород, а также определены их критические свойства, влияющие как на долгосрочную стабильность ПГЗРО, так и обеспечение безопасных условий ведения горных работ на глубине 500 м при проходке выработок. При этом должны учитываться следующие основные параметры [13-15].

Зоны влияния разломов. Разломные зоны являются потенциальными путями для миграции нуклидов за пределы санитарной зоны ПГЗРО [16-18]. Зоны динамического влияния разломов представляют собой сильно нарушенные по отношению к внутренним частям структурных блоков породы. Если они пересекают площадку, то могут быть триггерами

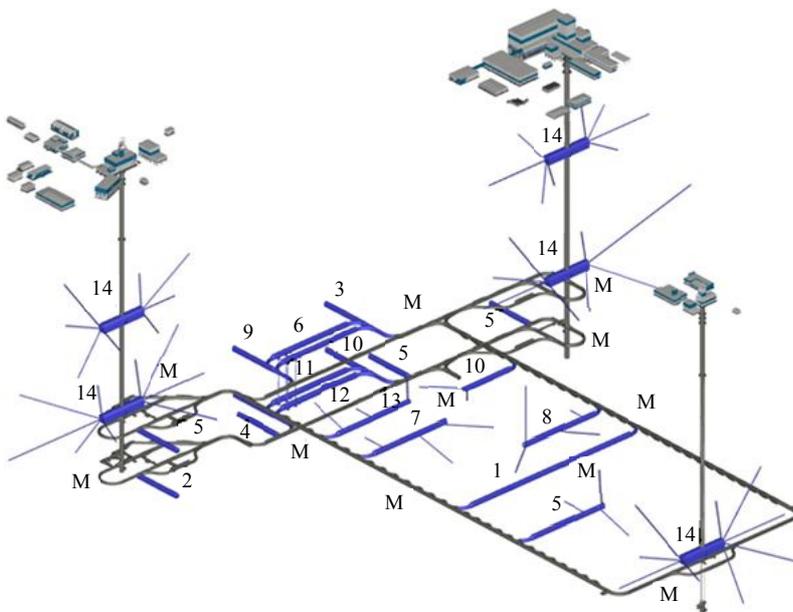


Рис. 1. Принципиальная схема ПИЛ (синим цветом выделены исследовательские выработки), цифрами – планируемые эксперименты по геомиграции (1-3); геохимии (4); геомеханике (5); инженерным барьерам (6-8); микробиологии (9); газовыделению (10); отработке технологии упаковки РАО (11, 12); прототипу захоронения (13); гидрогеологии (14); М – станции мониторинга



опасных геомеханических процессов в приконтурной части выработок и каналами инфильтрации подземных вод к контейнерам с РАО [19, 20].

Разломы классифицируются на три категории в зависимости от их длины [13, 14]:

- класс *A* – разломы с длиной в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен километров;
- класс *B* – разломы с длиной от нескольких километров до десятков километров;
- класс *C* – разломы, длина которых измеряется в метрах или сотнях метров.

Зона динамического влияния разломов в настоящей статье является довольно общим понятием, которое включает все типы трещиноватых зон. Ширина зоны динамического влияния для местных и локальных разломов рассчитывается согласно формуле, приведенной в работе Г.Г.Кочаряна [21],

$$F^W = kL, \quad (1)$$

где L – длина разлома, км; k – коэффициент, зависящий от масштаба и типа разрушения пород, диапазон изменения k от 0,1 до 0,2 для локальных и региональных разломов соответственно [22], некоторые авторы указывают меньшие значения k (до 10^{-4}).

Зонам разломов класса *A* запрещается захватывать строительную площадку ПГЗРО. Присутствие разломов класса *B* разрешено, но они не должны пересекать выработки, предназначенные для размещения РАО. Разломам класса *C* разрешается пересекать выработки, однако необходима рейтинговая оценка качества пород для принятия дополнительных мер.

Химический индекс подземных вод. Отражает основные химические свойства флюидов – кислотность, щелочность, содержание солей и других химических элементов, от которых зависит стойкость инженерных барьеров к коррозии. Химический индекс C_{chm}^R включает три параметра: TDS – содержание общих растворенных твердых веществ; pH – кислотность/щелочность; Cl – параметр, который указывает на концентрацию хлоридных ионов в воде. Значение суммарного химического индекса определяется в зависимости от состава подземных вод. При $6 < \text{pH} < 10$, $\text{TDS} < 50$ г/л, $\text{Cl} < 20$ г/л геохимическая обстановка вполне благоприятна и не снизит «качество» пород. Значение геохимического параметра определяется как 1,0. Если одно из этих требований не выполняется, то геохимическая обстановка считается в основном благоприятной и принимается значение 0,8. В противном случае геохимическая среда рассматривается как «малопригодная» и ей присваивается достаточно низкое значение 0,1.

Тепловой эффект. Вследствие распада радионуклидов вмещающие породы будут подвергаться воздействию повышенных температур длительный период времени (по различным оценкам порядка 120-150 °C в течение более 150 лет). В условиях одновременного воздействия горного давления и тектонических напряжений это может оказать существенное влияние на устойчивость пород. Свойства пород рассматриваются в двух аспектах. Величина теплопроводности может влиять на объемно-планировочные решения выработок ПГЗРО. Другой аспект – изменение физико-механических свойств под воздействием высокой температуры. Экспериментальные исследования в работе [23] подтвердили, что высокая температура может привести к значительному снижению механической прочности горных пород. В данной статье индекс теплового эффекта определяется как отношение прочности при одноосном сжатии при максимальной температуре $\sigma_{cd}^{T_{\max}}$ к значению прочности при комнатной температуре C_{cd} :

$$C_T^R = \frac{\sigma_{cd}^{T_{\max}}}{C_{cd}}. \quad (2)$$

Предлагается использовать средневзвешенное значение индекса теплового эффекта в случае, если на исследуемом участке отмечается несколько типов пород. Например, если присутствуют гранит и метаморфическая порода (гнейсы) в соотношении 70 и 30 % соответственно, то индекс рассчитывается с использованием формулы:

$$C_T^R = 0,7C_{T_{gran}}^R + 0,3C_{T_{metam}}^R. \quad (3)$$



Q-индекс по Н.Бартону. Согласно исследованиям, проведенным в подземной лаборатории «Äspö» (Швеция) [6], выявлено, что параметры коэффициента релаксации напряжений (SRF) и обводненности пород J_w не являются подходящими для оценки устойчивости массива при подземной изоляции РАО [24, 25]. Поэтому в системе оценки пригодности массива пород для захоронения РАО принято использовать произведение четырех параметров:

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a}, \quad (4)$$

где RQD – индекс качества горных пород; J_n – количество систем трещин; J_r – показатель шероховатости поверхностей трещин (шероховатость наиболее неблагоприятного разрыва); J_a – выветренность и изменение состояния трещин.

Индекс качества пород, характеризующий их структурную нарушенность, рассчитывается по формуле [26-28]:

$$RQD = \frac{L_\Sigma}{L} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где L_Σ – сумма длин расстояний между естественными трещинами длиной более 10 см, м.

Индекс гидравлической проводимости пород. Гидравлическая проводимость (скорость жидкости через поры и трещины) играет важную роль, так как в случае разрушения инженерных барьеров определяет скорость выноса радионуклидов в окружающую среду (в данном случае в р. Енисей). Гидравлическая проводимость зависит от проницаемости, насыщения, плотности и вязкости жидкости, индекс определяется следующим образом:

$$J_w^R = \begin{cases} 1,0, & \text{если } (K < 10^{-8} \text{ м/сут}) \geq 90 \%; \\ 0,7, & 70 \% \text{ если } (K < 10^{-8} \text{ м/сут}) < 90 \%; \\ 0,3, & 30 \% \text{ если } (K < 10^{-8} \text{ м/сут}) < 70 \%; \\ 0,1, & 70 \% \text{ если } (K < 10^{-8} \text{ м/сут}) < 30 \%, \end{cases} \quad (6)$$

где K – удельная гидравлическая проводимость (или проницаемость) горных пород.

Индекс отношения прочности к напряжению. Механическая устойчивость выработок в основном зависит от соотношения прочности и действующих напряжений в массиве пород [26, 29]. Обычно это оценивается по отношению прочности при одноосном сжатии к максимальному главному напряжению. Это отношение используют в качестве коэффициента запаса прочности [30]. В соответствии с классификацией устойчивости Бартона он определяется по формуле

$$SRF^R = \begin{cases} 0,5, & \text{если } (\sigma_c / \sigma_1 > 5) \geq 90 \%; \\ 1,0, & 70 \% \text{ если } (\sigma_c / \sigma_1 > 5) < 90 \%; \\ 5,0, & 40 \% \text{ если } (\sigma_c / \sigma_1 > 5) < 70 \%; \\ 20, & \text{если } (\sigma_c / \sigma_1 > 5) < 40 \%, \end{cases} \quad (7)$$

где σ_c – прочность пород при одноосном сжатии; σ_1 – максимальное напряжение в массиве; $\sigma_c / \sigma_1 > 5$ – процент данных о соотношении прочности и напряжений.

В работе [31] представлена система классификации горных пород на основе Q -индекса по Н.Бартону, но адаптированная под особенности подземной изоляции РАО. Оценочный индекс пригодности вмещающих пород включает факторы теплового воздействия, химического состава подземных вод и водопроницаемость вмещаемого массива. Модернизированный индекс определяется формулой

$$Q^R = C_{chm}^R C_T^R Q' \frac{J_w^R}{SRF^R}. \quad (8)$$

Классификация породного массива по классу устойчивости приведена в табл. 1.



Таблица 1

Категории массива горных пород по степени устойчивости

Q^R	Класс	Степень устойчивости	Категория устойчивости массива
[40, 1000]	I	Высокая	Устойчивый
[10, 40]	II	Средняя	Среднеустойчивый
[0, 10]	III	Низкая	Неустойчивый

Характеристика породного массива. Нижнеканский массив расположен в зоне аккреции, на контакте двух крупных геологических структур – Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты [32]. Выбранный для строительства ПИЛ участок Енисейский имеет размеры приблизительно 2×3 км и находится на северо-западе гранитоидного Нижнеканского массива. На рис.2

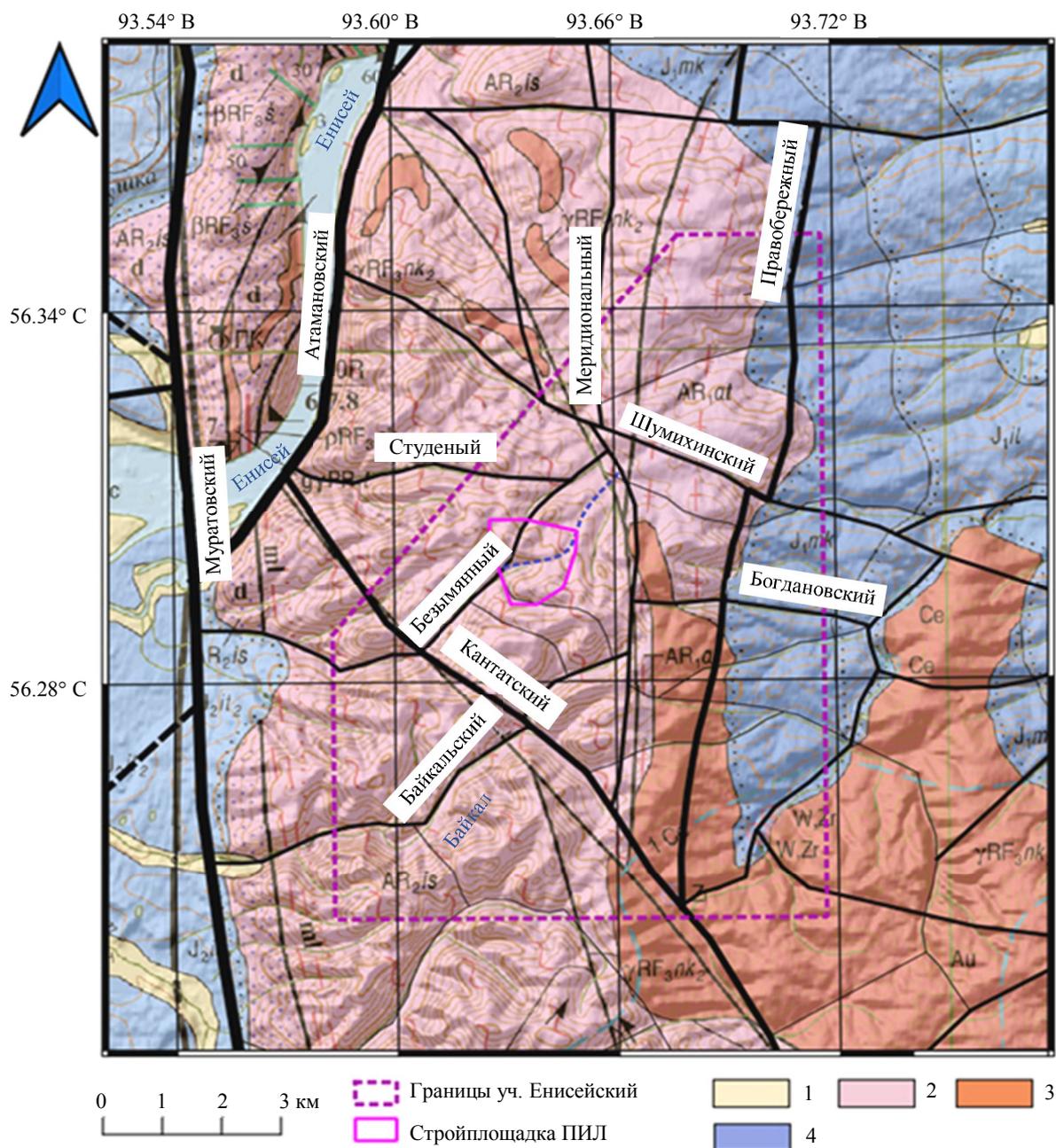


Рис.2. Структурно-тектоническая схема района. Черные линии – разломы: толстые – главные, средней толщины – региональные, тонкие – локальные, пунктирные – предполагаемые разломы

1 – аллювиальные отложения (галечники, пески); 2 – юрские отложения (песчаники, алевролиты, аргиллиты); 3 – ранние архейские гнейсы, кристаллосланцы атамановской серии; 4 – позднерифейские граниты биотитовые [33]

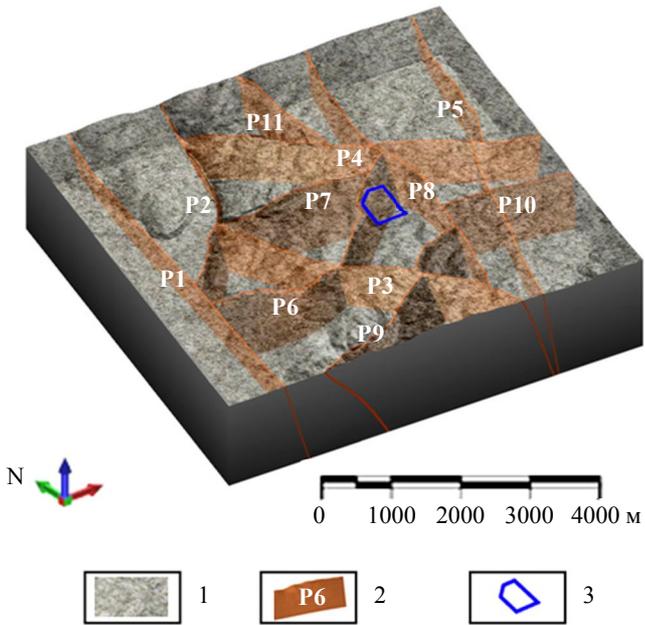


Рис.3. Трехмерная модель основных тектонических нарушений.
Разломы: P1 – Муратовский; P2 – Атамановский;
P3 – Кангатский; P4 – Шумихинский; P5 – Правобережный;
P6 – Безымянный; P7 – Студеный; P8 – Меридиональный;
P9 – Байкальский; P10 – Богдановский; P11 – № 1
1 – гнейс; 2 – разломы; 3 – контур площадки ПГЗРО

300 до 1000 м. Эти локальные разломы ориентированы на северо-восток, и их количество превышает 16. В соответствии с классификацией оценки пригодности, разломы класса А не достигают контур строительной площадки. Разлом класса В (Безымянный) пересекает строительную площадку, не достигая выработок ПГЗРО. Можно сделать вывод, что участок Енисейский оценивается как пригодный для строительства ПИЛ.

На участке Енисейский пробурено 17 скважин с отбором керна и выполнено определение физико-механических свойств горных пород (табл.2) [35]. По причине того, что документация керна для определения категорий устойчивости породных массивов не велась, в 2021-2022 гг. было выполнено геотехническое документирование скальных обнажений с целью определения степени нарушенности горных пород и оценки их устойчивости [33]. Статистическая обработка результатов показала, что трещины в зоне динамического влияния Муратовского разлома имеют северо-восточное направление (рис.4, в), Безымянного разлома – северо-восточное – юго-западное и юго-восточное – северо-западное (азимут $\sim 10^\circ$ и 130°) (рис.4, з). В отличие от гранитогнейсовых пород, дайковые комплексы метадолеритов менее трещиноватые [35].

Таблица 2

Сводные физико-механические свойства горных пород на участке Енисейский

Характеристика	Породы	
	Гнейсы	Метадолериты
Объемный вес, т/м ³	2,75	2,91
Коэффициент Пуассона	0,27	0,29
Модуль упругости, МПа	$(7,0-7,7) \cdot 10^4$	$9,15 \cdot 10^4$
Модуль деформации, МПа	$5,9 \cdot 10^4$	$7,09 \cdot 10^4$
Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	131,0	143,9
Предел прочности на растяжение, МПа	12,89	12,41
Предел прочности на сдвиг, МПа	57,15	99,6

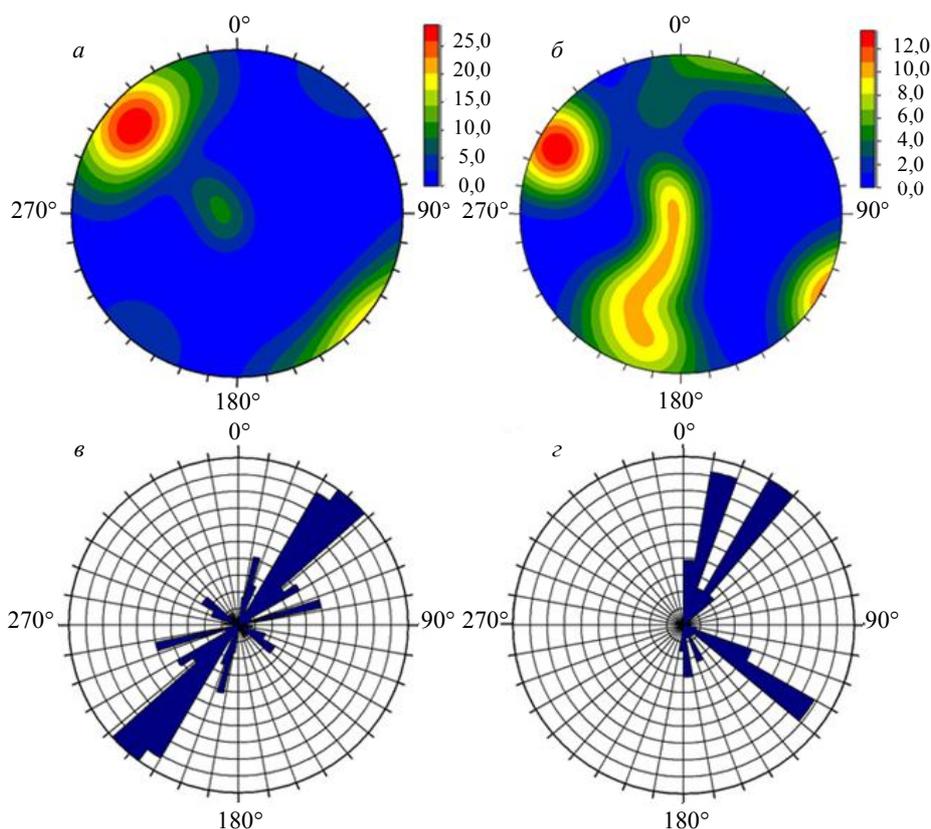


Рис.4. Стереограммы трещиноватости пород Нижнеканского массива в зонах динамического влияния Муратовского (а) и Безымянного (б) разломов; роза-диаграмма трещиноватости в зонах динамического влияния Муратовского (в) и Безымянного (г) разломов

При задании граничных условий для моделирования полей напряжений очень важно правильное направление внешних тектонических усилий [36-39]. Результаты геолого-геофизических исследований показывают, что поле напряжений в районе характеризуется доминирующими напряжениями субгоризонтального сжатия по азимутам около 40° . Более детальное изучение современного НДС Нижнеканского массива приведено в работе [8]. По результатам анализа ориентации осей и скоростей деформаций, полученных средствами ГНСС, очевидно, что поле деформаций представляет собой весьма «мозаичную» картину (рис.5). Северная и восточная границы участка западнее от Правобережного разлома в основном характеризуются субмеридиональным растяжением. Западная граница участка, соответствующая оси Правобережного разлома, подвергается субмеридиональному сжатию и субширотному растяжению. Зона к северу от разлома Безымянный испытывает растяжение, в то время как блок, ограниченный Меркурьевским и Верхнешумихинским разломами, сжатие.

На расстоянии 3 км от участка Енисейский ранее были выполнены работы по оценке напряжений методом гидроразрыва. Они показали, что горизонтальное напряжение $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 13,5$ МПа, а вертикальное $\sigma_{zz} = 12$ МПа. В других работах [33, 40] отмечается, что напряжения в массиве составляют 21,4 МПа. Как видно, данные весьма противоречивые. При геотехнической документации скальных обнажений площадки выбирались равномерно в различных геологических условиях. Подробно изучалась зона динамического влияния Муратовского разлома, на расстоянии до 1 км от него были выполнены измерения на четырех геологических площадках. Еще три площадки были выбраны на удалении от местных тектонических нарушений – в массивах, не нарушенных интрузивными телами даек. Пять площадок исследований соответствовали разрывным нарушениям местного масштаба – Байкальский, Кантатский, Безымянный, Верхнешумихинский и Меркурьевский разломы. Еще четыре площадки описаны в ходе рекогносцировочных маршрутов,

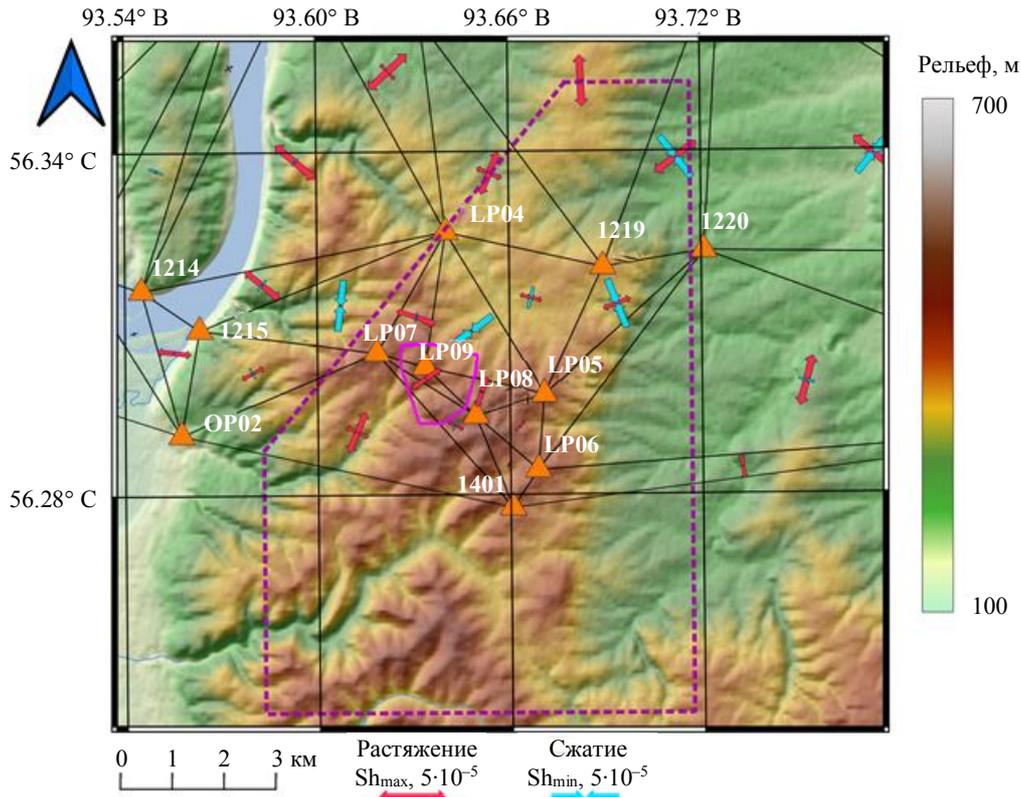


Рис.5. Главные оси и скорости горизонтальных деформаций, установленные по результатам наблюдений с использованием ГНСС за период с 2012 по 2021 г. [8]

в которых были зафиксированы интрузивные комплексы даек метадолеритов. Все данные обобщены по категориям устойчивости пород по величине Q^R и систематизированы в табл.3:

- категория 1 – 500-метровая зона динамического влияния Муратовского разлома. Породы состоят в основном из гранитов и гнейсов с прожилками кварца и дайки метадолеритов малой мощности;
- категория 2 – зоны динамического влияния разрывных нарушений местного масштаба. Породы выражены в основном гранитами и гнейсами с прожилками кварца дайки метадолеритов малой мощности;
- категория 3 – интрузивные комплексы, представленные дайками метадолеритов мощностью до 10-20 м;
- категория 4 – вне зоны динамического влияния разрывных нарушений. Породы выражены в основном гранитами и гнейсами.

Таблица 3

Классы устойчивости пород

Категория	Q'	C_{chm}^R	C_T^R	J_w^R	SRF	Q^R	Класс
1	13	1,0	0,80	1,0	0,5	20,8	II
2	86	1,0	0,88	1,0	0,5	151,4	I
3	22	1,0	0,87	0,8	0,5	30,6	II
4	68	1,0	0,85	0,7	0,5	80,9	I

Гидрохимические исследования показали: общая минерализация 50-450 мг/л, воды гидрокарбонатно-кальциевые [41], среднее значение pH = 8,1, общая жесткость не превышает 6,25 °Ж, содержание нитрат-иона ниже 3,76 мг/л, хлоридов – 0,9-7,5 мг/л. Следовательно, требования к геохимическим параметрам выполняются и геохимический параметр может быть принят как 1,0. Индекс



теплового эффекта принят $C_T^R = 0,88$ из анализа результатов физико-механических исследований и экспериментов в Китае [13]. Согласно работам [32, 42], коэффициент водопроницаемости для гранитогнейсовых пород Нижнеканского массива варьируется в диапазоне от 10^{-9} до 10^{-10} м/сут. Это означает, что они обладают низкой водопроницаемостью. В соответствии с (6) величина J_W^R принимается равной 1,0. Конкретное значение соотношения прочности к главному напряжению, согласно (7), равно 6,2, следовательно величина SRF^R будет равна 0,5. Таким образом, оценка устойчивости породного массива (8) показала, что участок характеризуется хорошими значениями рейтинга качества и пригоден для строительства ПИЛ.

Следующим этапом работы стало создание трехмерной геологической модели по результатам анализа архивных геолого-геофизических данных [42-44]. На основе геологических разрезов и схем различных горизонтов были разработаны каркасная и блочная геолого-структурная модели участка Енисейский [33]. Литологическая модель включает три слоя пород: четвертичные отложения и образования коры выветривания с мощностью до 20 м. Верхний слой состоит из плагиогнейсов и биотитовых гнейсов с прослоями кристаллических сланцев. Нижний – из кордиерит-биотитовых с прослоями биотитовых и гранатсодержащих гнейсов (рис.6, а). Разрывные нарушения на участке представлены зонами дробления, милонитизации, тектоническими брекчиями и разрывами без смещения (рис.6, б, в) [33, 35]. Тектонические разрывы модели подразделяются на главные и второстепенные нарушения. Интрузивные и ультраметаморфические образования представлены густой сетью крутопадающих дайк метадолеритов с мощностью до 30 м (рис.6, з). Разрывные нарушения местного и локального масштаба подробно описаны в работе [33]. Кроме этого, в модель были включены зоны дробления и смятия по данным геологических разрезов. Эти зоны тесно коррелируют с главными разломами участка, достигая глубины до 700 м.

Блочная модель, составленная на основе каркасной (рис.6, а, в), представляет геологические структурные особенности в виде блоков

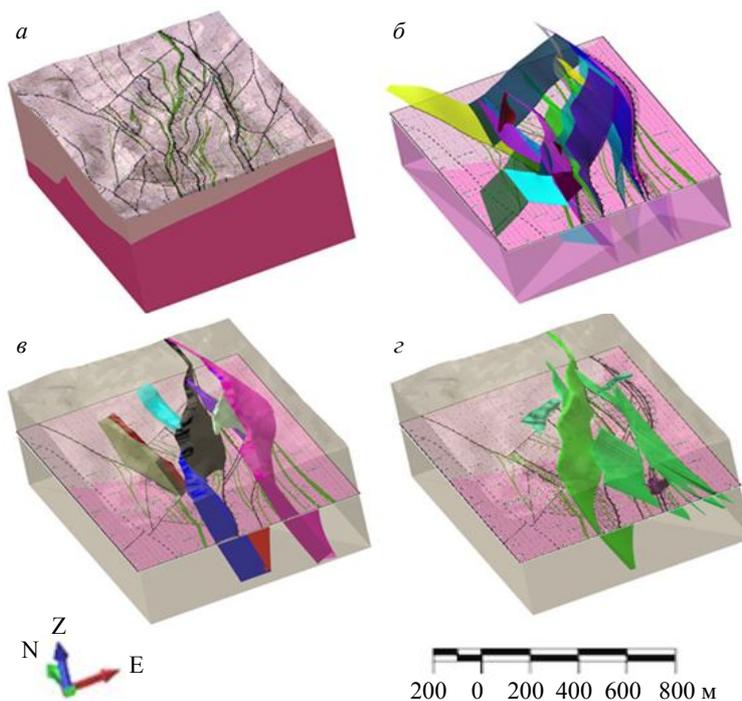


Рис.6. Трехмерное представление основных геологических структур 3D-модели участка Енисейский: а – литологическая модель; б – модель разрывных нарушений; в – зоны дробления, повышенной трещиноватости и брекчирования; г – интрузивные и дайковые комплексы

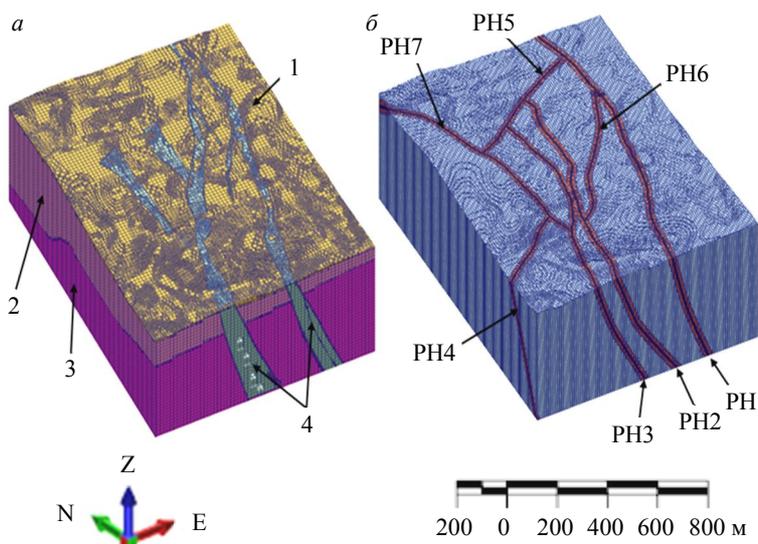


Рис.7. Каркасная модель: а – структурная блочная модель; б – зоны динамического влияния главных разрывных нарушений

1 – четвертичные отложения; 2 – верхняя толща; 3 – нижняя толща; 4 – зоны повышенной трещиноватости; разломы: PH1 – Верхнешумихинский; PH2 – Верхнемеркурьевский; PH3 – Меркурьевский; PH4 – Безымянный; PH5 – № 5; PH6 – № 6; PH7 – № 7



с определенными физико-механическими свойствами (рис.7, а). Эта модель используется для более детального и точного описания геологической структуры и поведения горного массива.

В каркасной модели (см. рис.6, б) разрывные нарушения строились в виде поверхностей (дислокаций) с нулевой шириной по причине недостатка информации о мощности разломов [33]. Используя эмпирические зависимости, были определены размеры зон динамического влияния разрывных нарушений, и на основе этой информации построена блочная модель рис.7, б.

Построение блочной модели разломов с зонами динамического влияния является важным инструментом для вариационного моделирования НДС, анализа и оценки геодинамических процессов, происходящих в массиве.

Заключение. Для безопасного захоронения высокоактивных РАО важно определить критические свойства горных пород, которые влияют как на долгосрочную стабильность геологического хранилища РАО, так и обеспечение безопасных условий горных работ. Анализ мирового опыта показал, что для этого эффективно используются эмпирические рейтинговые классификации. Для оценки устойчивости породного массива, вмещающего выработки ПГЗРО, существующие классификации были модернизированы.

В модернизированный индекс Q^R включены параметры, учитывающие разрывные зоны, соотношение прочности и действующих напряжений SRF, индекс Q и др. Предварительные результаты оценки устойчивости породного массива показали, что выбранный участок пригоден для строительства ПИЛ. Установлено, что участки породного массива в зоне динамического влияния основных тектонических разломов района являются менее устойчивыми, в то время как интрузивные породы, представленные дайковыми комплексами, более устойчивы.

Разработана трехмерная структурно-тектоническая модель участка Енисейский, которая станет впоследствии основой для численного вариационного моделирования напряженно-деформированного состояния массива и создания общей геомеханической модели участка. Построение блочной модели с зонами динамического влияния разрывных нарушений является первым шагом к более глубокому пониманию поведения разломов и их влияния на стабильность и безопасность горных массивов. Модель позволит выявить зоны концентрации опасных напряжений, а также спланировать натурные геомеханические эксперименты в горных выработках ПИЛ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дорофеев А.Н., Большов Л.А., Линге И.И. и др. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 33-40.
2. Абрамов А.А., Большов Л.А., Дорофеев А.Н. и др. Подземная исследовательская лаборатория в Нижнеканском массиве: эволюционная проработка облика // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 9-21. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-9-21
3. Joutsenvaara J., Holma M., Kotavaara O. et al. Callio Lab – the deep underground research centre in Finland, Europe // 17th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics, 26 August – 3 September 2021, Valencia, Spain. Journal of Physics Conference Series, 2022. Vol. 2156. № 012166. DOI: 10.1088/1742-6596/2156/1/012166
4. Qiangyong Zhang, Chuancheng Liu, Kang Duan et al. True Three-Dimensional Geomechanical Model Tests for Stability Analysis of Surrounding Rock During the Excavation of a Deep Underground Laboratory // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020. Vol. 53. P. 517-537. DOI: 10.1007/s00603-019-01927-0
5. Цебаковская Н.С., Уткин С.С., Капырин И.В. и др. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО. М.: Комтехпринт, 2015. 208 с.
6. Koyama T., Chijimatsu M., Shimizu H. et al. 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. Vol. 5. Iss. 1. P. 58-72. DOI: 10.1016/j.jrmge.2013.01.001
7. Saceanu M.C., Paluszny A., Zimmerman R.W., Ivars D.M. Fracture growth leading to mechanical spalling around deposition boreholes of an underground nuclear waste repository // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2022. Vol. 152. № 105038. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2022.105038
8. Татаринов В.Н., Морозов В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И. Современная геодинамика южной части Енисейского кряжа по результатам спутниковых наблюдений // Геофизические исследования. 2018. Т. 19. № 4. С. 64-79. DOI: 10.21455/gr2018.4-5
9. Кафтан В.И., Гвишиани А.Д., Морозов В.Н., Татаринов В.Н. Методика и результаты определения движений и деформаций земной коры по данным ГНСС на Нижне-Канском геодинамическом полигоне в районе захоронения радиоактивных отходов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 83-94. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-83-94



10. Manevich A.I., Tatarinov V.N., Kolikov K.S. Detection of crustal deformation anomalies with regard to spatial scale effect // Eurasian mining. 2019. № 2. P. 19-22. DOI: 10.17580/em.2019.02.04
11. Гупало В.С. Приоритетные параметры физических процессов в массиве пород при определении безопасности захоронения радиоактивных отходов // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 118-124. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.118
12. Demenkov P.A., Karasev M.A., Petrov D.N. Predicting Land-Surface Deformations During The Construction of Underground Facilities of Complex Spatial Configuration // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2017. Vol. 8. Iss. 11. P. 1161-1171.
13. Liang Chen, Ju Wang, Zihua Zong et al. A new rock mass classification system QHLW for high-level radioactive waste disposal // Engineering Geology. 2015. Vol. 190. P. 33-51. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.02.006
14. Ju Wang, Liang Chen, Rui Su, Xingguang Zhao. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2018. Vol. 10. Iss. 3. P. 411-435. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.03.002
15. Tong Y., Yue Y., Huang Z. et al. Modified RMR Rock Mass Classification System for Preliminary Selection of Potential Sites of High-Level Radioactive Waste Disposal Engineering // Sustainability. 2022. Vol. 14 (23). P. 1-17. DOI: 10.3390/su142315596
16. Zhang Q., Liu C., Duan K. et al. True Three-Dimensional Geomechanical Model Tests for Stability Analysis of Surrounding Rock During the Excavation of a Deep Underground Laboratory // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020. Vol. 53. P. 517-537. DOI:10.1007/s00603-019-01927-0
17. Протосеня А.Г., Карасаев М.А., Беляков Н.А. Разработка численной модели прогноза предельного состояния массива с использованием критерия прочности Ставрогина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 1. С. 40-48.
18. Ковалев О.В. Горно-геомеханический прогноз размещения отходов в горных выработках, в том числе в сейсмоопасных районах добычи сырья // Записки Горного института. 2016. Т. 217. С. 61-71.
19. León Vargas R.P., Friedel M., Hassanzadegan A. et al. BARIK: an extended Hoek–Brown-based anisotropic constitutive model for fractured crystalline rock // Safety of Nuclear Waste Disposal. 2023. Vol. 2. P. 119-120. DOI: 10.5194/sand-2-119-2023
20. Xie He-ping, Gao Feng, Ju Yang et al. Quantitative definition and investigation of deep mining // Journal of the China Coal Society. 2015. Vol. 40. № 1. P. 1-10. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1690
21. Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М.: ГЕОС, 2016. 424 с.
22. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1983. 112 с.
23. Wang F., Konietzky H. Thermo-Mechanical Properties of Granite at Elevated Temperatures and Numerical Simulation of Thermal Cracking // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019. Vol. 52. Iss. 10. P. 3737-3755. DOI: 10.1007/s00603-019-01837-1
24. Barton N. A review of mechanical over-closure and thermal over-closure of rock joints: Potential consequences for coupled modelling of nuclear waste disposal and geothermal energy development // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020. Vol. 99. № 103379. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103379
25. Barton N. Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2013. Vol. 5. Iss. 4. P. 249-261. DOI: 10.1016/j.jrmge.2013.05.008
26. Еременко В.А., Айнбиндер И.И., Марысюк В.П., Наговицин Ю.С. Разработка инструкции по выбору типа и параметров крепи выработок рудников Талнаха на основе количественной оценки состояния массива горных пород // Горный журнал. 2018. № 10. С. 101-106. DOI: 10.17580/gzh.2018.10.18
27. Шапошник Ю.Н., Усков В.А. Определение качественной характеристики (RQD) и рейтинга (RMR) рудного массива в подземных выработках шахты «Скалистая» // XIII Международный научный конгресс и выставка «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», 19-21 апреля 2017 г., Новосибирск, Россия. Интерэкспо ГЕО-Сибирь, 2017. Т. 2. № 2. С. 99-107.
28. Протосеня А.Г., Вербилло П.Э. Изучение прочности на сжатие трещиноватого горного массива // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 51-57. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.51
29. Андерсон Е.Б., Савоненков В.Г., Любцева Е.Ф. и др. Результаты поисковых и научно-исследовательских работ по выбору площадок для подземной изоляции ВАО и ОЯТ на Нижнеканском массиве гранитоидов (Южно-Енисейский кряж) // Труды Радиового института им. В.Г.Хлопина. 2006. Т. XI. С. 8-64.
30. Коваленко А.А., Захаров Н.Е., Пуль Э.К., Золотин В.Г. Геомеханические аспекты разработки кимберлитового месторождения трубки «Интернациональная» // Горный журнал. 2019. № 2. С. 27-31. DOI: 10.17580/gzh.2019.02.05
31. Truong Ye, Liang Chen, Jian Liu. Study on Rock Mass Classification Methods Used in the Geological Disposal of High-level Radioactive Waste // 11th Conference of Asian Rock Mechanics Society, 21-25 October 2021, Beijing, China. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. Vol. 861. № 4. № 042118. DOI: 10.1088/1755-1315/861/4/042118
32. Кочкин Б.Т., Мальковский В.И., Юдинцев С.В. Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект). М.: ИГЕМ РАН, 2017. 384 с.
33. Акматов Д.Ж., Маневич А.И., Татаринов В.Н., Шевчук Р.В. Трехмерная структурно-тектоническая модель Енисейского участка (Нижнеканский массив) // Горный журнал. 2023. № 1. С. 69-74. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.11
34. Кочкин Б.Т. Задачи изучения геологической среды участка Енисейский на текущем этапе реализации проекта захоронения // Радиоактивные отходы. 2019. № 2 (7). С. 76-91. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-76-91
35. Морозов О.А., Расторгуев А.В., Неуважаев Г.Д. Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 46-62. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62
36. Тарасов Б.Г. Верный механизм динамических трещин сдвига как источник парадоксов прочности и хрупкости горных пород // Горный журнал. 2020. № 1. С. 18-23. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.03
37. Бирючев И.В., Макаров А.Б., Усов А.А. Геомеханическая модель рудника. Часть 1. Создание // Горный журнал. 2020. № 1. С. 42-48. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.08
38. Abdulla H. Al Nuaimi, Williams L.G. Sensitivity study of risk to future generations from geological disposal of radioactive waste in high strength rock in the UAE // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. 2022. Vol. 15. Iss. 3. P. 218-231. DOI: 10.1016/j.jrras.2022.06.013



39. Gunzburger Y., Magnenet V. Stress inversion and basement-cover stress transmission across weak layers in the Paris basin, France // *Tectonophysics*. 2014. Vol. 617. P. 44-57. DOI: 10.1016/j.tecto.2014.01.016
40. Леонтьев А.В., Рубцова Е.В., Скулкин А.А. К оценке напряженно-деформированного состояния породного массива Нижнеканского региона // XVI Международный научный конгресс и выставка «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск, Россия. Интерэкспо ГЕО-Сибирь, 2020. Т. 2. С. 109-116. DOI: 10.33764/2618-981X-2020-2-109-116
41. Еременко В.А., Винников В.А., Косырева М.А., Лагутин Д.В. Определение параметров залегания трещин в породном массиве на основе оптической съемки скважин и интервального геотехнического документирования неориентированных кернов // *Горный журнал*. 2022. № 1. С. 21-26. DOI: 10.17580/gzh.2022.01.04
42. Xuechao Wu, Gang Liu, Zhengping Weng et al. Constructing 3D geological models based on large-scale geological maps // *Open Geosciences*. 2021. Vol. 13. Iss. 1. P. 851-866. DOI: 10.1515/geo-2020-0270
43. Бирючев И.В., Макаров А.Б., Усов А.А. Геомеханическая модель рудника. Часть 2. Использование // *Горный журнал*. 2020. № 2. С. 35-44. DOI: 10.17580/gzh.2020.02.04
44. Курцев Б.В., Федотов Г.С. Геомеханическое сопровождение горных работ с использованием ГГИС Micromine // *Горный журнал*. 2022. № 1. С. 45-50. DOI: 10.17580/gzh.2022.01.08

Авторы: **Д.Ж.Акматов**, младший научный сотрудник, аспирант, <https://orcid.org/0000-0001-6435-464X> (Геофизический центр РАН, Москва, Россия; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия), **А.И.Маневич**, научный сотрудник, старший преподаватель, <https://orcid.org/0000-0001-7486-6104> (Геофизический центр РАН, Москва, Россия; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия), **В.Н.Татаринов**, член-корреспондент РАН, д-р техн. наук, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, victat@wdcb.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7546-2072> (Геофизический центр РАН, Москва, Россия; Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия), **Р.В.Шевчук**, младший научный сотрудник, аспирант, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-3461-6383> (Геофизический центр РАН, Москва, Россия; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия; Институт физики Земли РАН им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия), **С.М.Забродин**, главный специалист, <https://orcid.org/0000-0003-2834-9311> (Геофизический центр РАН, Москва, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.