

www.rudmet.ru

ISSN 0017-2278

# ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

198 лет

Издается с 1825 года  
(№ 2306)

1.2023

Геотехническое моделирование в горном деле:  
задачи, методы и современная практика



УДК 004.925.83:622.831

## ТРЕХМЕРНАЯ СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЕНИСЕЙСКОГО УЧАСТКА (НИЖНЕКАНСКИЙ МАССИВ)\*



**Д. Ж. АКМАТОВ**<sup>1,2</sup>,  
младший научный сотрудник,  
аспирант



**А. И. МАНЕВИЧ**<sup>1,2</sup>,  
научный сотрудник, старший  
преподаватель,  
ai.manevich@yandex.ru



**В. Н. ТАТАРИНОВ**<sup>1,3</sup>,  
главный научный сотрудник,  
зав. лабораторией, д-р техн. наук,  
чл.-корр. РАН



**Р. В. ШЕВЧУК**<sup>1,2,3</sup>,  
младший научный сотрудник,  
аспирант

<sup>1</sup> Геофизический центр РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Горный институт НИТУ «МИСиС», Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

### Введение

В 2021 г. в пределах Нижнеканского массива на Енисейском участке (Красноярский край) начато строительство уникального в мировой горной практике объекта – подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) для обоснования безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (РАО) [1]. Цель проводимых в ПИЛ исследований заключается в оценке сохранности изоляционных свойств породного массива при длительном воздействии горного давления, тектонических напряжений и теплового потока на весь период радиобиологической опасности РАО. Немаловажная часть программы исследований в ПИЛ – геомеханические эксперименты и опыты [2, 3]. Одно из главных направлений геомеханических исследований в ПИЛ заключается в создании цифровой трехмерной модели, максимально приближенной к геолого-тектонической обстановке и служащей основным инструментом выявления потенциально опасных геодинамических зон, оценки устойчивости породного массива и многовариантного моделирования напряженно-деформированного состояния [4, 5]. Важным аспектом является иерархичный подход к оценке геомеханической безопасности ПИЛ. Результаты анализа структурно-тектонической

Представлены результаты создания трехмерной модели структурно-тектонического блока Енисейского участка Нижнеканского массива (Красноярский край), разработанной в рамках обоснования возможности безопасной подземной изоляции высокоактивных отходов. Модель включает в себя литологическую часть, разрывные тектонические нарушения, интрузивные образования, зоны трещиноватости и дробления. При создании модели учтены результаты системного анализа комплекса геолого-геофизических характеристик геологической среды, включая схемы разломной тектоники, данные геофизических и глобальных навигационных спутниковых систем наблюдений, параметры внешнего тектонического поля напряжений, физико-механические свойства пород, результаты определения трещиноватости пород и др. Предлагаемая структурно-тектоническая модель может быть использована для многовариантного моделирования напряженно-деформированного состояния породного массива с целью прогноза сохранности его изоляционных свойств при оценке безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов в гранито-гнейсовых породах.

**Ключевые слова:** изоляционные свойства, структурно-тектонический блок, разлом, структурные данные, высокоактивные радиоактивные отходы, подземная исследовательская лаборатория  
**DOI:** 10.17580/gzh.2023.01.11

модели станут основой для задания граничных условий в моделях более крупного масштаба (включающих в себя детальный анализ распределения напряжений вокруг выработанного пространства). Создание геомеханических и геодинамических моделей структурно-тектонического блока, вмещающего ПИЛ, в совокупности с иерархическим подходом является адекватной международной практикой, используемой на объектах захоронения РАО в Китае, Финляндии, Швеции и США и других странах [2, 4–7]. В настоящее время информация о структурно-геологическом строении и геодинамике Енисейского участка детально систематизирована и проанализирована в региональном отношении [8, 9], что позволяет оценить тектонические условия Енисейского участка. Однако на более крупном масштабном уровне информация на данный момент недостаточно систематизирована, и ее явно недостаточно для обоснованного планирования комплекса геомеханических исследований в горных выработках ПИЛ. Ниже описаны работы по созданию трехмерной структурно-тектонической модели массива Енисейского участка, построенной на основе анализа данных о блочном строении, палео- и современных напряжениях, деформациях земной поверхности по результатам наблюдений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и другим показателям [9, 10] как первого этапа создания геомеханической модели [11].

\*В работе принимал участие О. А. Морозов, старший научный сотрудник Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, канд. геол.-минерал. наук. Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки России.

Авторы выражают благодарность студентам Горного института НИТУ «МИСиС» А. В. Никитенковой и А. К. Нияз за помощь в обработке геологических данных.



**Геологические и геодинамические условия  
Енисейского участка**

Нижнеканский массив находится в зоне активного орогенеза, т. е. процесс его формирования как горного сооружения еще не закончен. Массив расположен на стыке двух крупных структур – юго-западной части Енисейского кряжа (Ангаро-Канский антиклинорий) и юго-восточного окончания Западно-Сибирской плиты (Чулымско-Енисейский прогиб), и его современное напряженное состояние определяется их тектоническим взаимодействием [10].

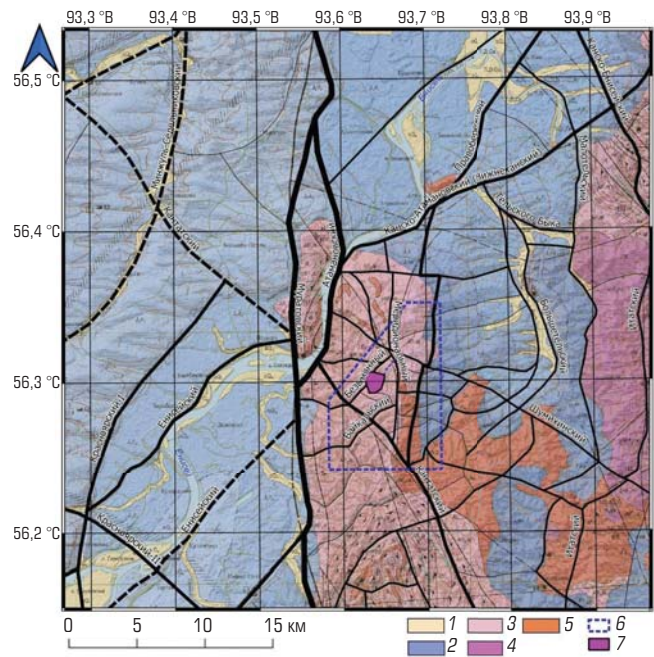
Енисейский участок имеет размеры  $\approx 2 \times 1,5 \times 0,5$  км и располагается на западной границе Нижнеканского гранитоидного массива и вмещающих его докембрийских толщ гнейсов (рис. 1). Такие зоны экзоконтактов магматических тел, как правило, отличаются повышенной трещиноватостью и структурной неоднородностью. Породы представлены также многочисленными дайками метаморфизованных магматических пород основного состава [12].

Восточный край Енисейского участка отсечен древним Правобережным разломом сбросового характера. Этот разлом формирует северо-восточный склон Атамановского хребта. Максимальная амплитуда сброса составляет 400–580 м при длине около 20 км. Амплитуду послееюрского смещения оценивают в 300 м. Разлом был подновлен на новейшем этапе – активен в голоцене и в настоящее время. Об этом свидетельствуют данные повторного высокоточного геодезического нивелирования, согласно которым современные движения по разлому составляют 1 мм/год [10]. Ширина зоны динамического влияния Правобережного разлома по результатам геологических и геофизических изысканий варьируется от 300 м до 3 км [12].

В северной части участка расположен Шумихинский субширотный сдвиг, отделяющий пониженный структурный блок от центральной части участка. Таким образом, эти два разрывных нарушения делят Енисейский участок на три разновысотных структурных блока. Помимо названных, при анализе морфологических особенностей рельефа имеют четкое выражение более мелкие разломы и трещины, а в 2-3 км к западу от границы участка проходит активный Муратовский разлом, который считается современной границей Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты. При этом плита опускается, а платформа медленно вздымается. Суммарная амплитуда вертикальных смещений по разлому превышает 3 мм в год. Это подтверждается результатами наблюдений на геодинамическом полигоне с использованием спутниковых навигационных систем [9, 10].

**Создание трехмерной структурно-тектонической модели Енисейского участка**

Модель разрабатывалась на основе результатов системного анализа геолого-геофизических данных, представленных в работах [12] и др. Основываясь на геологической документации керна буровых скважин, результатах геофизических исследований в скважинах и материалах местных и региональных геологических карт, было составлено подробное геологическое описание структурно-тектонического блока Енисейского участка в масштабе



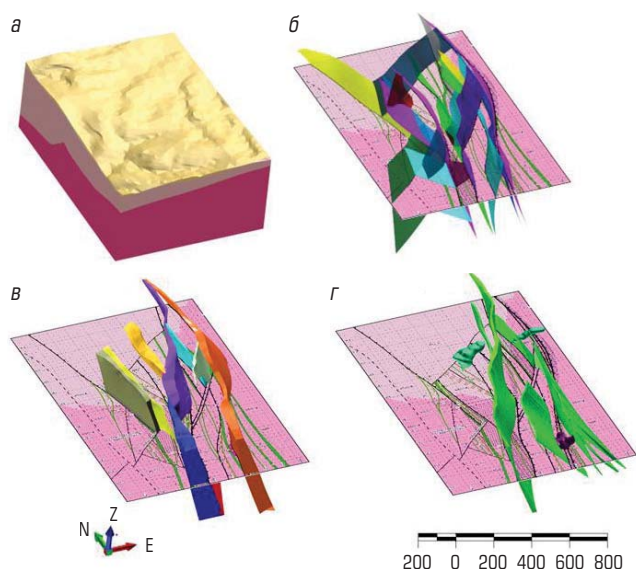
**Рис. 1. Структурно-тектоническая карта района расположения Енисейского участка.**

Толстые черные линии – главные разломы, черные линии средней толщины – региональные разломы, тонкие черные линии – локальные разломы, черные пунктирные линии – предполагаемые разломы;

- 1 – аллювиальные отложения поймы (галечники, пески);
- 2 – юрские отложения (песчаники, алевролиты, аргиллиты);
- 3 – раннеархейские гнейсы, кристаллосланцы атамановской серии; 4 – позднерифейские диориты и гранодиориты;
- 5 – биотитовые позднерифейские граниты; 6 – границы Енисейского участка; 7 – стройплощадка ПИП

1:10 000 [12]. На основе геологических разрезов и схем различных горизонтов были разработаны каркасная и блочная геолого-структурная модели Енисейского участка с помощью программы Mircomine.

Литологическая модель структурно-тектонического блока включает в себя три основных слоя: четвертичных отложений (песчаных суглинков, глинисто-дресвяно-щепнистых) мощностью 10–20 м; верхнюю толщу (плагигнейсов, биотитовых гнейсов с прослоями кристаллических сланцев) и нижнюю толщу (кордиерит-биотитовых гнейсов с прослоями гранатосодержащих гнейсов) (рис. 2, а). Интрузивные комплексы представлены густой сетью крутопадающих позднерифейских субвулканических и гидротермальных образований – даек порфировых долеритов, трахидолеритов и метадолеритов с телами мощностью до 30 м. В непосредственной близости от участка в его южной части зафиксировано наличие раннепротерозойских интрузивных образований гранитогнейсов, а в северной части – позднеархейских интрузивных образований апогаббровых ортоамфиболитов (см. рис. 2, в) [12]. Весь массив пронизан гидротермальными кварцевыми, карбонат-кварцевыми и карбонатными прожилками,



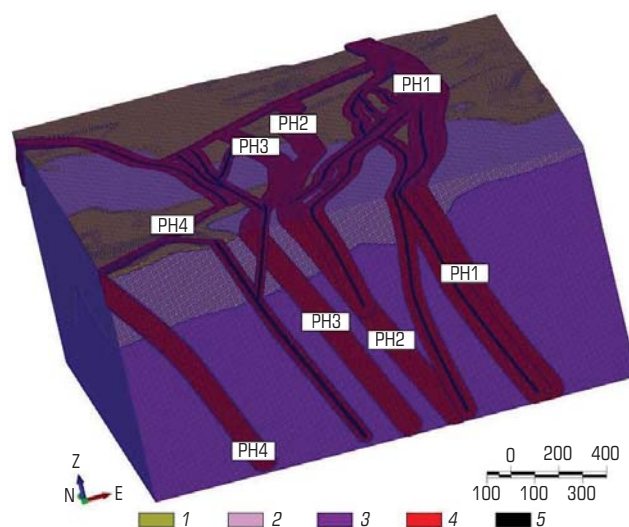
**Рис. 2. Трехмерное представление основных геологических структур объемной модели Енисейского участка:**

*а* – литологическая модель; *б* – модель разрывных нарушений; *в* – зоны дробления, повышенной трещиноватости и брекчирования; *г* – интрузивные и дайковые комплексы

которые вносили в модель как поверхности с неопределенной шириной. Разрывные нарушения на участке представлены зонами дробления, милонитизации, тектоническими брекчиями и разрывами без смещения (см. рис. 2, *б, г*) [12]. Тектонические разрывы модели подразделяют на главные и второстепенные нарушения.

Главные разрывные нарушения местного масштаба включают в себя Верхнешумихинский, Верхнемеркурьевский, Меркурьевский и Безымянный разломы и пересекают всю площадь Енисейского участка в простирании, близком к субмеридиональному, а Безымянный разлом – в северо-восточном направлении. Второстепенные разрывные нарушения имеют малую протяженность до 2–3 км и являются внутриблоковыми структурами. Их концентрация наиболее высока в северо-восточной части модели, ограниченной поверхностями Верхнешумихинского и Верхнемеркурьевского разломов. Кроме этого, в модель были заложены зоны дробления и повышенной трещиноватости, выделенные по данным документации керн. Эти зоны тесно коррелируют с главными разломами участка, достигая предельных глубин геологического изучения участка (до 700 м).

В каркасной модели разрывные нарушения строили в виде поверхностей (дислокаций) с нулевой шириной в силу недостатка информации о мощности разломов. С использованием эмпирических зависимостей [13, 14] были определены размеры зон динамического влияния разрывных нарушений, в том числе и локального размера. В границах каркасной модели участка была создана блочная модель для визуализации и анализа тектонической нарушенности массива. С помощью каркасов структурной модели и инструмента создания буферных зон от тектонических дислокаций блокам модели были присвоены коды литологических и структурно-геологических доменов (рис. 3). В пустую блочную



**Рис. 3. Блочная структурно-геологическая модель разрывных нарушений с зонами динамического влияния:**

PH1, PH2, PH3, PH4 – Верхнешумихинский, Верхнемеркурьевский, Меркурьевский и Безымянный разломы соответственно;

1 – четвертичные отложения (песчанистые суглинки, глинисто-древяно-щепнистые); 2 – верхняя толща (плаггиогнейсы, биотитовые гнейсы с прослоями кристаллических сланцев); 3 – нижняя толща (кордиерит-биотитовые гнейсы с прослоями гранатосодержащих гнейсов); 4 – зоны динамического влияния разрывных нарушений; 5 – разрывные нарушения

модель в пределах каждого из доменов записывали атрибуты физико-механических свойств горных пород (определенных на основе лабораторных исследований), характерных для данного домена.

#### Структурные данные и внешние условия, определяющие тектонические напряжения

На данный момент всего на участке пробурены 17 скважин, из которых отбирали образцы для определения физико-механических свойств горных пород (табл. 1). При этом документацию керна для определения категорий устойчивости породных массивов не выполняли. В связи с этим возникает ряд неопределенностей в оценке устойчивости пород Нижнеканского массива, так как на данный момент масштабные работы по сбору геомеханических данных на участке еще не осуществляли. С целью оценки категорий устойчивости и нарушенности горных пород Нижнеканского массива в период 2021–2022 гг. была выполнена геотехническая документация скальных обнажений на земной поверхности. Определен показатель качества массива RQD (методом треугольника на скальном обнажении), проведена съемка трещин обнажений для получения стереограмм и установлены параметры индекса качества массива Q по Н. Бартону [15–17]. Измерения проведены на 15 геологических площадках скальных обнажений. Поскольку изучали скальные обнажения на земной поверхности ввиду отсутствия горных

**Таблица 1. Сводные физико-механические свойства горных пород на Енисейском участке**

Характеристика	Породы	
	Гнейсы	Долериты
Объемный вес, т/м <sup>3</sup>	2,75	2,91
Коэффициент Пуассона	0,27	0,29
Модуль упругости, МПа	(7÷7,7)·10 <sup>4</sup>	9,15·10 <sup>4</sup>
Модуль деформации, МПа	5,9·10 <sup>4</sup>	7,09·10 <sup>4</sup>
Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	131	143,9
Предел прочности на растяжение, МПа	12,89	12,41
Предел прочности на сдвиг, МПа	57,15	99,6

**Таблица 2. Сводные категории устойчивости горных пород Нижнеканского массива**

Тип массива	Основные породы	RQD, %	Q
Тип 1. Зона динамического влияния Муратовского разлома	Гранитогнейсы	44–72	0,5–4,38
Тип 2. Зона динамического влияния местных тектонических нарушений	Гранитогнейсы	68–87	1,5–7,19
Тип 3. Выходы даечных долеритовых комплексов	Долериты	79–90	3,53–11,73
Тип 4. Вне зон динамического влияния тектонических нарушений	Гранитогнейсы	69–88	4,44–10,57

выработок, полученные данные не использовали при заполнении атрибутов создаваемой модели. Однако они являются полезными для определения относительной разницы в устойчивости массивов в различных тектонических условиях (их сводные параметры приведены в **табл. 2**). Данные были обобщены в следующие категории устойчивости.

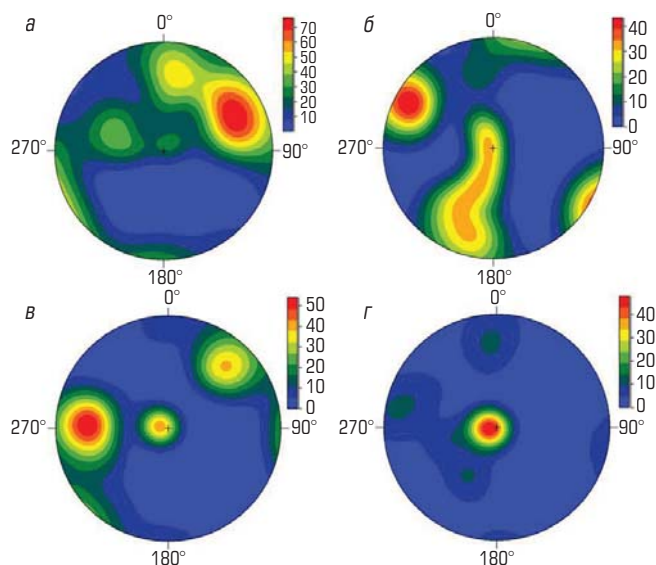
**Тип 1.** 500-метровая зона динамического влияния Муратовского разлома. Массивы представлены в основном гранитогнейсами с прожилками кварца и дайками долеритов малой мощности.

**Тип 2.** Зоны динамического влияния разрывных нарушений местного масштаба. Массивы представлены в основном гранитогнейсами с прожилками кварца и дайками долеритов малой мощности.

**Тип 3.** Интрузивные комплексы, представленные дайками долеритов мощностью до 10–20 м.

**Тип 4.** Вне зоны динамического влияния разрывных нарушений. Массивы представлены в основном массивными выходами гранитогнейсов.

Из данных **табл. 2** следует, что наихудшие условия устойчивости массива определяются в зоне динамического влияния Муратовского разлома, который является крупнейшей региональной тектонической структурой и считается современной границей Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты. В зоне динамического влияния главных и второстепенных разломов модели качество массива изменяется не так однозначно и коррелирует, скорее, с наличием признаков тектонических движений по ним. Массивы пород, представленные дайковыми комплексами долеритов, являются наиболее устойчивыми.



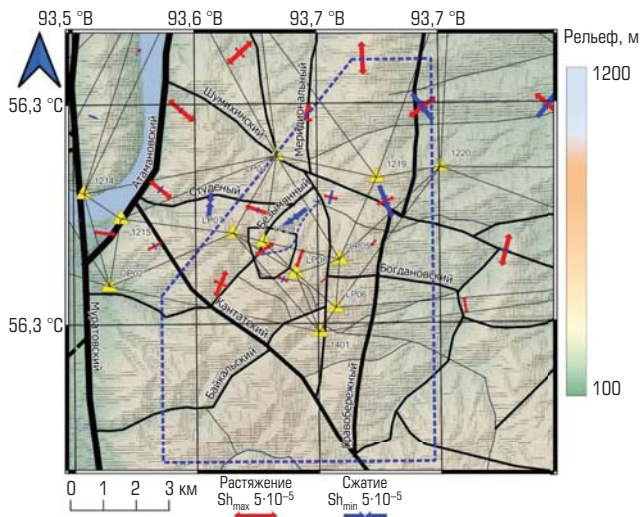
**Рис. 4. Стереограммы трещиноватости пород Нижнеканского массива:**

*а, б, в* – в зоне динамического влияния Муратовского, Безымянного разломов и второстепенного разрывного нарушения соответственно; *г* – вне зоны динамического влияния разрывных нарушений – дайковый комплекс долеритов

По результатам анализа трещиноватости в керновом материале было установлено, что трещиноватость развита во всех местных породах [12], что также подтверждается результатами массовой съемки трещин в скальных выходах на земной поверхности. Трещины имеют протяженность от первых сантиметров до 2–3 м. Степень трещиноватости массива может существенно варьироваться: до четырех систем трещин в зоне динамического влияния Муратовского или местных разломов (**рис. 4, а, б**) с уменьшением плотности и числа систем трещин по мере удаления от зоны влияния разрывных нарушений (см. **рис. 4, в, г**). Также, в отличие от гранитогнейсовых пород, меньшее число систем трещин преимущественно имеют дайковые комплексы долеритов.

Важнейшим элементом модели при задании граничных условий моделирования напряжений является внешнее поле напряжений. По результатам геологических исследований поле напряжений Нижнеканского массива определяется доминирующими напряжениями субгоризонтального сжатия, ориентированными в северо-восточном направлении в позднеплейстоценовое и голоценовое время. Более детальное изучение современного напряженно-деформированного состояния Нижнеканского массива было выполнено средствами ГНСС [9, 10]. В результате были оценены параметры современных движений и деформаций земной поверхности во временном интервале с 2012 по 2021 г. (**рис. 5**). Из анализа осей ориентации и скоростей деформации участка видно, что реальное поле тектонических напряжений является «мозаичным» и сложноградиентным. Северная и восточная границы участка, западнее от Правобережного разлома, преимущественно испытывают субмеридиональное растяжение. Для западной границы участка, соответствующей оси Правобережного





**Рис. 5. Разломно-блоковая схема Енисейского участка, главные оси и скорости деформаций, установленные по результатам ГНСС-наблюдений за период с 2012 по 2021 г.**

разлома, характерны субмеридиональное сжатие и субширотное растяжение. Зона севернее Безымянного разлома испытывает растяжение, а блок, ограниченный Меркурьевским и Верхнешумихинским разломами, – сжатие. Границы участка также находятся в неоднородном поле современных деформаций.

В районе Енисейского участка также проводили работы по оценке напряженно-деформированного состояния геофизическими методами и методом гидроразрыва [18]. Естественное поле напряжений на глубинах 450–500 м характеризуется следующими показателями: горизонтальное напряжение  $\sigma_r = 13,5$  МПа, вертикальное напряжение  $\sigma_z = 12$  МПа. Сопоставление установленных в ходе экспериментальных натурных исследований величин максимальных напряжений в массиве ( $\sigma_{max} = 21,4$  МПа) в сравнении с данными прочности основных представителей горных пород (см. табл. 1) позволяет сделать вывод, что породный массив по отношению к полю тектонических

естественных напряжений, несмотря на их сложную морфологию, имеет существенный запас прочности.

### Заключение

На основе анализа геологических данных была разработана структурно-тектоническая модель Енисейского участка, включающая в себя систему разрывных нарушений, литологическую модель, модели интрузивных образований и зоны повышенной трещиноватости и дробления.

Ввиду отсутствия реализации масштабной программы по сбору геомеханических данных о породах Нижнеканского массива, была выполнена также оценка категорий устойчивости горных пород на скальных выходах на земной поверхности. Полученные результаты подтвердили существующие гипотезы о динамическом влиянии Муратовского разлома на Енисейский участок. Подтверждено, что массивы пород в зоне динамического влияния главных разломов участка являются менее устойчивыми относительно вмещающих пород, а массивы, представленные дайковыми комплексами долеритов, являются наиболее устойчивыми.

Данные о современном напряженно-деформированном состоянии района, полученные с использованием средств ГНСС, позволяют оценить распределение внешних тектонических напряжений, действующих по границам создаваемой геомеханической модели. Несмотря на изменения характера (от сжатия к растяжению) современных деформаций участка, реальные измерения действующих напряжений в массиве показывают наличие его запаса прочности при полученных физико-механических свойствах горных пород. Таким образом, созданная трехмерная структурно-тектоническая модель Енисейского участка является основой для разработки геомеханических моделей участка как пункта глубинного захоронения РАО в частности, так и отдельных горных выработок вообще.

### Библиографический список

См. англ. блок.

«GORNYI ZHURNAL», 2023, № 1, pp. 69–74  
DOI: 10.17580/gzh.2023.01.11

#### 3D structure tectonics model of Yenisei site of the Nizhnekansk Massif

##### Information about authors

**D. Zh. Akmatov**, Junior Researcher<sup>1</sup>, Post-Graduate Student<sup>2</sup>

**A. I. Manevich**, Researcher<sup>1</sup>, Senior Lecturer<sup>2</sup>, ai.manevich@yandex.ru

**V. N. Tatarinov**, Chief Researcher<sup>1</sup>, Head of Laboratory, Doctor of Engineering Sciences<sup>3</sup>, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences

**R. V. Shevchuk**, Junior Researcher<sup>1,3</sup>, Post-Graduate Student<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>NUST MISIS' College of Mining, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

##### Abstract

In 2021, in the Yeniseisky region of the Nizhnekansk Massif in the Krasnoyarsk region, construction of an underground research laboratory (URL) was started to justify safety of high-level radioactive

waste disposal. The URL investigations aimed to assess preservation of isolation properties of rock mass exposed to long-active rock pressure, tectonic stresses and heat flow within the whole period of effective radiobiological risk of radioactive waste.

Based on the geological data analysis, the structure-and-tectonics model of the Yenisei site was developed, including tectonic faults, lithology, intrusives, as well as heavy fracturing and crushing zones. With no large-scale acquisition of geomechanical data on the Lower Kan Massif, the rock stability was estimated at outcrops on ground surface. The results proved the existing hypotheses of the dynamic impact exerted by the Muratov Fault on the Yenisei site. It was also confirmed that the zone of the dynamic impact of the major faults was less stable than the enclosing rock mass while the rock mass composed of dolerite dykes featured the highest stability.

The authors appreciate participation of the researcher from the Nuclear Safety Institute, Russian Academy of Sciences, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences O. A. Morozov in this study.

This work was conducted in the framework of budgetary funding of the Geophysical Center of RAS, adopted by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

The authors express their gratitude to the students of the NUST MISIS' College of Mining A. V. Nikitenkova and A. K. Niyaz for the help in processing geological data.

**Keywords:** isolation properties, structural–tectonic block, fault, structural data, high-level radioactive waste, underground research laboratory.

References

1. Dorofeev A. N., Bolshov L. A., Linge I. I., Utkin S. S., Saveleva E. A. Strategic Master Plan for R&D Demonstrating the Safety of Construction, Operation and Closure of a Deep Geological Disposal Facility for Radioactive Waste. *Radioactive Waste*. 2017. No. 1. pp. 19–26.
2. Ewing R. C., Park S. The Concept of Geological Disposal of Highly Radioactive Nuclear Waste. *Encyclopedia of Nuclear Energy*. Amsterdam : Elsevier, 2021. pp. 588–602.
3. Tatarinov V. N., Morozov V. N., Batugin A. S. An underground research laboratory: New opportunities in the study of the stress–strain state and dynamics of rock mass destruction. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2019. Vol. 19, No. 2. ES2002. DOI: 10.2205/2019ES000659
4. Ju Wang, Liang Chen, Rui Su, Xinguang 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. pp. 411–435.
5. Qiangyong Zhang, Chuancheng Liu, Kang Duan, Zhenjie Zhang, Wen Xiang. 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, Iss. 2. pp. 517–537.
6. Xuechao Wu, Gang Liu, Zhengping Weng, Yiping Tian, Zhiting Zhang et al. Constructing 3D geological models based on large-scale geological maps. *Open Geosciences*. 2021. Vol. 13. pp. 851–866.
7. Tirén S. A., Askling P., Wänstedt S. Geologic site characterization for deep nuclear waste disposal in fractured rock based on 3D data visualization. *Engineering Geology*. 1999. Vol. 52, Iss. 3–4. pp. 319–346.
8. Tatarinov V. N., Morozov V. N., Kamnev E. N., Manevich A. I. Geodynamic aspects of high-level radioactive waste disposal: A case-study of Nizhnekansky massif. *Gornyi Zhurnal*. 2021. No. 3. pp. 108–112. DOI: 10.17580/gzh.2021.03.05
9. Gvishiani A. D., Tatarinov V. N., Manevich A. I., Kaftan V. I. Geodynamic interpretation of modern geodynamic movements in the southern part of the Yenisei Ridge (in application to the problems of underground isolation of radioactive waste). *Eurasian Mining*. 2021. No. 2. pp. 7–11. DOI: 10.17580/em.2021.02.02
10. Gvishiani A. D., Tatarinov V. N., Kaftan V. I., Manevich A. I., Dzeboev B. A. et al. The Velocities of Modern Horizontal Movements of Earth Crust in the South Sector of Yenisei Ridge According to GNSS Observations. *Doklady Earth Sciences*. 2020. Vol. 493, Iss. 1. pp. 544–547.
11. Biryuchev I. V., Makarov A. B., Usov A. A. Geomechanical model of underground mine. Part I. Creation. *Gornyi Zhurnal*. 2020. No. 1. pp. 42–48. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.08.
12. Morozov O. A., Rastorguev A. V., Neuvazhaev G. D. Assessing the State of the Geological Environment at the Yeniseiskiy Site (Krasnoyarsk Region). *Radioactive Waste*. 2019. No. 4(9). pp. 46–62.
13. Sherman S. I., Sorokin A. P., Savitskiy V. A. New methods for the classification of seismoactive lithospheric faults based on the index of seismicity. *Doklady Earth Sciences*. 2005. Vol. 401, No. 3. pp. 413–416.
14. Kocharyan G. G. Geomechanics of faults. Moscow : GEOS, 2016. 424 p.
15. Eremenko V. A., Vinnikov V. A., Kosyreva M. A., Lagutin D. V. Identification of rock jointing parameters by borehole imaging and interval geotechnical documentation of non-oriented drill cores. *Gornyi Zhurnal*. 2022. No. 1. pp. 21–26. DOI: 10.17580/gzh.2022.01.04
16. Eremenko V. A., Ainbinder I. I., Marysyuk V. P., Nagovitsyn Yu. N. Guidelines for selecting ground support system for the Talnakh operations based on the rock mass quality assessment. *Gornyi Zhurnal*. 2018. No. 10. pp. 101–106. DOI: 10.17580/gzh.2018.10.18
17. 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
18. Leontev A. V., Rubtsova E. V., Skulkin A. A. To the estimate of stress-strain state of the rock mass in the Nizhnekansky region. *InterExpo Geo-Sibir*. 2020. Vol. 2. pp. 109–116.

УДК 622.34:622.83

## ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ К ПРОЯВЛЕНИЮ ГОРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИХ УДАРОВ (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЮЖНОЕ)\*



**И. Ю. РАСКАЗОВ<sup>1</sup>**,  
директор, д-р техн. наук, чл.-корр.  
РАН



**А. С. БАТУГИН<sup>2</sup>**,  
проф., д-р техн. наук,  
as-bat@mail.ru



**Ю. В. ФЕДОТОВА<sup>3</sup>**,  
ведущий научный сотрудник,  
канд. техн. наук



**М. И. ПОТАПЧУК<sup>3</sup>**,  
ведущий научный сотрудник,  
канд. техн. наук

По масштабам своего воздействия на техносферу и окружающую среду горно-тектонические удары представляют собой явления более высокого иерархического уровня, чем собственно горные удары и склонность месторождений к этому типу динамических явлений предлагается оценивать отдельно. В качестве признака склонности к проявлению горно-тектонических ударов крупных тектонических нарушений месторождения в современном поле напряжений и достижение массивом предельно-напряженного состояния. По результатам анализа этих признаков установлено, что месторождение склонно к проявлению горно-тектонических ударов.

**Ключевые слова:** месторождение Южное, динамические явления, горно-тектонические удары, природное поле напряжений, тектонические нарушения, предельно-напряженное состояние  
**DOI:** 10.17580/gzh.2023.01.12

### Введение

В классификации по силе (интенсивности) проявления динамических явлений (горно-тектонический удар – собственно горный удар (горный удар) – микроудар – толчок – стреляние) горно-тектонический удар является самым сильным, что хорошо известно из практики [1–3]. Аналог горно-тектонического удара

<sup>1</sup>Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия

<sup>2</sup>НИТУ «МИСиС», Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск, Россия

\*Исследования проводили с частичным использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных Дальневосточного отделения Российской академии наук», финансируемого Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования РФ по проекту № 075-15-2021-663.