

## ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.831

### ГЕОДИНАМИКА И ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЗРАБОТКИ МАЛО-ТУЛУКУЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮГО-ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

И. Ю. Рассказов<sup>1</sup>, В. А. Петров<sup>2</sup>, Ю. В. Федотова<sup>1</sup>,  
П. А. Аникин<sup>1</sup>, М. И. Потапчук<sup>1</sup>, В. И. Усиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт горного дела ДВО РАН,

E-mail: rasskazov@igd.khv.ru, ул. Тургенева, 51, 68000, г. Хабаровск, Россия

<sup>2</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
пер. Старомонетный, 35, 119017, г. Москва, Россия

Приведены результаты комплексных геодинамических и геомеханических исследований урановых руд Мало-Тулукеевского месторождения в юго-восточной части Забайкалья. На основе изучения тектонической структуры и морфометрического анализа рельефа Стрельцовского рудного поля выявлены особенности современных геодинамических процессов в районе месторождения и их взаимосвязь с характером напряженно-деформированного состояния массива горных пород. По результатам определения параметров поля напряжений и физико-механических свойств горных пород месторождения установлена возможность разрушения краевых частей массива в динамической форме. В процессе численного моделирования напряженно-деформированного состояния и натурных шахтных наблюдений подтверждена склонность Мало-Тулукеевского месторождения к горным ударам, нижние горизонты которого (с глубины 500 м) отнесены к категории опасных. Для обеспечения безопасности горных работ разработан комплекс мероприятий по предотвращению горных ударов и снижению геодинамического риска.

*Геодинамическое районирование, напряженно-деформированное состояние, физико-механические свойства, моделирование, геомеханический контроль, удароопасность*

DOI: 10.15372/FTPRPI20210501

Освоение месторождений полезных ископаемых на современном этапе сопряжено с ухудшением горно-геологических и геомеханических условий разработки. Существенная неоднородность естественных полей напряжений, предопределяемая сложностью и особенностями тектонической и геологической структуры месторождений, еще больше усиливается при техногенном

---

Исследования проводились с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием "Центр обработки и хранения научных данных ДВО РАН", финансируемого Минобрнауки России по соглашению № 075-15-2021-663.

воздействии на породный массив. Перераспределение исходных напряжений в пространстве и времени, а также их концентрация на отдельных участках — одна из основных причин реализации опасных разрушений участков массива в динамической форме [1–9]. Основные факторы, влияющие на изменение геомеханических процессов в массиве, — рост объемов выработанных пространств и увеличение глубины разработки.

Проблема риска техногенных катастроф при подземных горных работах актуальна для всего мира, в том числе для Дальневосточного региона, где эксплуатируются месторождения, опасные по горным ударам. Результаты геомеханических исследований на таких месторождениях, как “Антей” (Забайкальский край), Николаевское, Южное (Приморский край) и ряде других, свидетельствуют о том, что их удароопасность во многом определяется высоким уровнем действующих в массивах тектонических напряжений. Превышение горизонтальных сжимающих напряжений над вертикальными определяется их геодинамической позицией в пределах тектонически активной Амурской плиты, характеризующейся высокой структурной неоднородностью, тектонической раздробленностью и наличием областей повышенных напряжений [4, 10–16].

Ранее выполненный анализ удароопасности на подземных рудниках Восточного Приморья и Забайкалья выявил усложнение горнотехнической ситуации и увеличение геодинамического риска при ведении горных работ, обусловленных ростом выработанных пространств и глубины разработки. Наблюдается активизация геодинамических процессов, протекающих в форме перестройки и самоорганизации блочного массива горных пород в природно-техногенном поле напряжений. Эти процессы сопровождаются смещениями и подвижками вдоль тектонических нарушений различного масштабного уровня, выделением значительной упругой энергии и проявлением техногенной сейсмичности [13, 17].

В подобных условиях наиболее эффективный подход к исследованию природных и техногенных процессов в массиве горных пород — организация комплексных многоуровневых режимных наблюдений, основанных на ряде взаимодополняемых методов, направленных на изучение верхней части земной коры. Выявление и учет закономерностей формирования природного и техногенного полей напряжений имеют большое значение для обеспечения безопасного и эффективного освоения месторождений полезных ископаемых [18].

#### **ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Объект исследований — Мало-Тулукуевское месторождение урановых руд (юго-восток Забайкалья) находится в пределах Стрельцовского рудного поля, сформировавшегося в одноименной вулcano-тектонической впадине Южно-Ангурского сводового поднятия [19]. Фундамент и борта впадины сложены архей-протерозойскими гранито-гнейсами, ранне- и позднепалеозойскими метасоматическими гранитами, содержащими ксенолиты амфиболитов, гнейсов, доломитов, сланцев и других метаморфических пород. Мезозойские осадочно-вулканогенные формации, образующие верхний структурный этаж, имеют мощность 400–700 м и достигают 1400 м в наиболее опущенных местах впадины. Залегание их друг на друге пологое, под углами 5–15°, осложненное разрывной тектоникой.

В плане месторождение вытянуто в северо-западном направлении на 3 км при ширине до 600 м на севере и до 100–150 м на юге. Оруденение слепое, начинается на глубинах от 200 м, его суммарный размах составляет 460 м. Средняя отметка земной поверхности рудника 810 м. За последние пять лет в отработку вовлекались рудные тела на горизонтах VII, VIII, IX, X на глубинах 500–700 м от земной поверхности.

Характерная особенность месторождения — отсутствие видимых геологических контактов рудных тел. Границы между рудными телами и вмещающими породами извилистые, осложнены наличием многочисленных апофиз в местах сочленения тектонических нарушений различной направленности. В рудных телах по падению и простиранию наблюдается чередование участков повышенной мощности (рудных столбов — до 20 м и более, длиной до первых десятков метров) с пережимами мощностью 0.2–0.1 м. В плане субпараллельные рудные тела сближаются на расстояние 3–10 м, пересекаются и сочленяются друг с другом, смещаются тектоническими трещинами, образуя залежи сложного внутреннего строения и разнообразной формы.

К горно-геологическим и горнотехническим особенностям разработки месторождений рудного поля также относится наличие трех типов рудных залежей (пластообразных, жилообразных и штокверкоподобных), для отработки запасов которых применяются разные технологические схемы.

Для исследования удароопасности Мало-Тулукуевского месторождения применялся комплекс методов, включая геодинамическое районирование месторождения, определение параметров напряженно-деформированного состояния горного массива и физико-механических свойств пород и руд, численное моделирование и натурные наблюдения в шахтных условиях.

Геодинамическое районирование месторождения с выделением активных разломов и определением характера деформирования блочного массива горных пород с последующим комплексным анализом данных и сопоставлением результатов с материалами по сейсмичности и неотектонике выполнялось с применением методов морфометрического анализа и дистанционного зондирования Земли [1, 10]. Цифровые модели рельефа SRTM30 и GTOPO90 визуализированы в программном обеспечении QGIS и представлены изображениями с отмывкой рельефа в географической проекции WGS84 [20, 21].

Определение параметров напряженно-деформированного состояния массива горных пород выполнялось методом щелевой разгрузки [22, 23]. Напряжения, действующие перпендикулярно к плоскости щели:

$$\sigma = \frac{U_{AB}E}{1.034 \cdot 2L - l(1 - K_{\perp(\perp)} + \mu K_{\square(\perp)})},$$

где  $U_{AB}$  — смещение пород после образования разгрузочной щели, см;  $E$  — модуль упругости горных пород, МПа;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $L$  — ширина щели, см;  $l$  — расстояние между измеряемыми реперами, см;  $K_{\perp(\perp)}$ ,  $K_{\square(\perp)}$  — коэффициенты концентрации напряжений при контурной части разгрузочной щели в направлениях перпендикулярном и параллельном щели соответственно.

Закономерности формирования техногенных полей напряжений на различных этапах разработки изучались методом конечных элементов, применялись программные комплексы FEM и PRESS 3D URAL. При оценке степени потенциальной удароопасности отдельных участков массива использованы известные критерии хрупкого и сдвигового разрушения, а также энергетический показатель удароопасности, учитывающий модуль спада руды на запредельной диаграмме деформирования [24–27]. Состояние массива горных пород оценивали в процессе натурных наблюдений, в том числе с применением портативного прибора оценки состояния горного массива “Prognoz L” [28, 29].

## ГЕОДИНАМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Изучение геолого-тектонического строения и геодинамики Мало-Тулукуевское месторождения показало, что оно находится в наиболее подвижном и геодинамически опасном узле пересечения разломных зон меридионального и северо-западного простираний. По результатам морфометрических исследований построена карта жестких тектонических блоков дальневосточного региона, составленная по цифровым моделям рельефа на основе матрицы GТОРО30 [10, 20]. Анализ полученных схем позволил предположить, что в результате горизонтального перемещения тектонического потока в юго-восточном направлении формируется характерная волновая картина. Она создается чередованием волн скучивания – растаскивания ансамблей тектонических чешуй. В рельефе это выражается чередованием хребтов — межгорных впадин, которые вытянуты в юго-восточном направлении. В этом же направлении ориентированы векторы скоростей современных горизонтальных движений литосферных блоков по данным GPS на карте современной геодинамики Азии [11].

На рис. 1 показан фрагмент участка дневной поверхности, изученный методами дешифрирования дистанционного зондирования Земли. На общем фоне выделяются жесткие блоки и достаточно редкая и, возможно, более древняя сеть региональных разрывных тектонических нарушений. Три таких блока разного масштаба окружают Стрельцовское рудное поле, создавая условия для подвижки блоков массива горных пород по разрывным нарушениям. На общий дрейф тектонического потока накладываются его локальные аномалии. Для восточной части потока выявлен разворот по часовой стрелке. Об этом свидетельствует изменение простирания линейментов, отражающих положение вытянутых элементов рельефа. Центр вращения расположен вблизи Стрельцовского рудного поля. Вероятно, здесь расположена структура, оказывающая максимальное тормозящее воздействие.

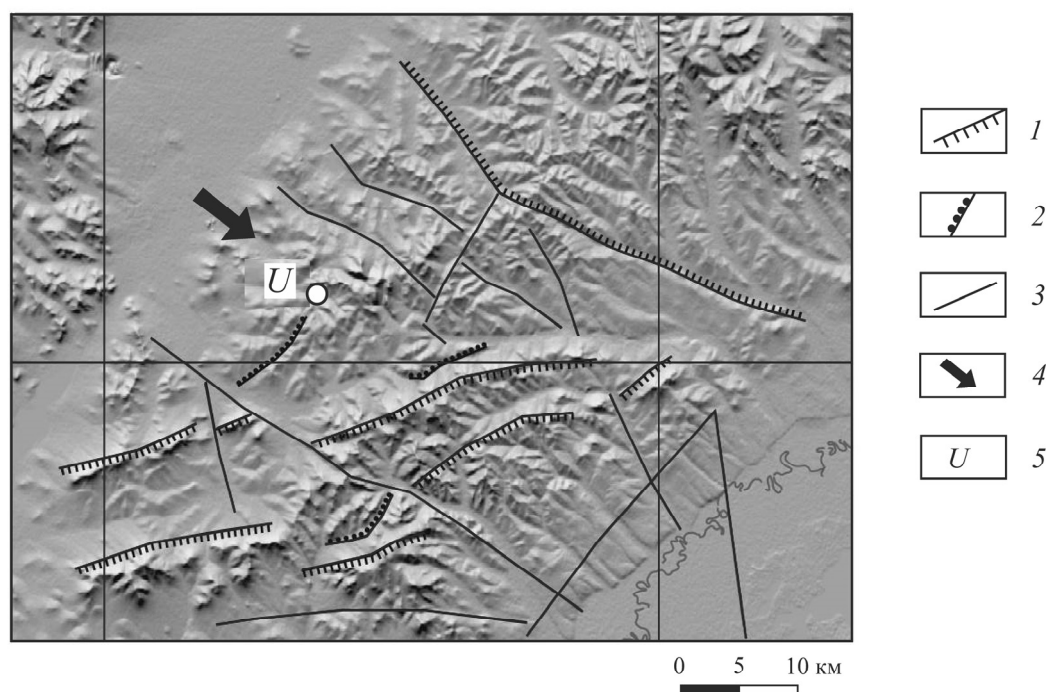


Рис. 1. Морфотектоническая схема района Стрельцовского рудного поля: 1 — взбросы (бергштрихи направлены в сторону взброшенного крыла); 2 — сбросы; 3 — дизъюнктивные нарушения разной кинематики; 4 — направление тектонического потока; 5 — месторождение урановых руд Мало-Тулукуевское. Основа — анаглифическая карта рельефа на базе матрицы SRTM03 (SRTM30)

Разломы II ранга представлены зонами разрывных нарушений северо-западного простирания (Тулукуевская зона). По времени активизации они древнее меридиональных. К разломам III ранга отнесены разрывные нарушения северо-восточного и близширотного простираний. Это позволяет предположить наличие значительных горизонтальных напряжений тектонической природы. В масштабе Стрельцовского рудного поля основной структурной неоднородностью кристаллического фундамента является северо-восточная Аргунская зона длительной тектономагматической активности, которая контролирует размещение центров вулканизма (Краснокаменский вулкан) [19]. В масштабе локализованных в гранитах фундамента месторождений (например, “Антей”) эта зона проявлена жилообразными телами высокотемпературных калишпат-альбититовых метасоматитов.

Достаточно высокая геодинамическая активность исследуемого района подтверждается данными GPS-наблюдений, выполненных специалистами ИЗК СО РАН [30, 31]. Установлено, что пункт IRKT (г. Иркутск), представляющий стабильную часть Евразии, в абсолютных координатах (ITRF 2009) смещается со скоростью 6.8 мм/год на юг, 25.0 мм/год на восток и испытывает незначительное опускание со скоростью 0.2 мм/год. Одновременно с этим постоянные измерения на пункте ULAZ (г. Улан-Удэ), проводимые с 1999 г., показывают его юго-восточное смещение со скоростью 8.3 мм/год и поднятие с невысокой скоростью. Разница в скоростях смещения IRKT и ULAZ указывает на наличие компоненты растяжения в расположенной между ними Байкальской впадине. Измерения на постоянном пункте СНИТ (г. Чита), установленном на базе ИПРЭК СО РАН (район Арахлейских озер), показали, что горизонтальные смещения происходят со скоростью 10.9 мм/год на юг, 39.9 мм/год на восток. Пункт опускается со скоростью 22.3 мм/год. Также получены данные о смещениях пункта KRNK (г. Краснокаменск), находящегося на территории Стрельцовского рудного поля. Согласно расчетам, горизонтальные смещения здесь происходят со скоростью 5.8 мм/год на юг и 25.6 мм/год на восток. Пункт поднимается со скоростью 1.12 мм/год. Измерения в районе г. Краснокаменска вблизи Стрельцовского рудного поля показали, что геодезические пункты, расположенные на бортах Урулюнгуевской впадины, смещаются в восточном и восток-юго-восточном направлении в системе координат ITRF 2009. Скорости горизонтальных движений варьируют от 20 до 25 мм/год.

Проанализированы данные о механизмах очагов землетрясений в районе г. Краснокаменска. Выявлено, что их средний механизм близок к сдвиговому типу. Оси сжатия и растяжения близгоризонтальны, ось сжатия — субширотного (восток-северо-восток), ось растяжения — субмеридионального направлений (север-северо-запад) [32].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам лабораторных исследований образцов горных пород Мало-Тулукуевского месторождения установлено, что их прочностные и упругие характеристики варьируют в широком диапазоне: предел прочности на одноосное сжатие 17.1 – 116.3 МПа (среднее 48.1 МПа); предел прочности на одноосное растяжение 1.2 – 8.7 МПа (среднее 3.0 МПа); модуль Юнга 7.1 – 30.2 ГПа (среднее 26.0 ГПа). Наиболее прочными и хрупкими породами (потенциально удароопасными) являются граниты крупно- и мелкозернистые. К квазихрупким породам также относятся граниты светло-серые, брекчированные. Коэффициенты хрупкости, равные 1 (потенциально удароопасные), установлены у 25 % из всех исследованных образцов в естественном состоянии и у 11 % образцов — в водонасыщенном. По отдельным скважинам отмечается дискование кернa, — признак повышенных напряжений в массиве и его потенциальной удароопасности.

Измерения напряжений в массиве горных пород Мало-Тулукуевского месторождения методом щелевой разгрузки выполнены на девяти замерных станциях на горизонтах V, VI, VIIд, IX на глубине 368–616 м<sup>1</sup>.

Анализ результатов определения параметров напряженного состояния показал, что в массиве месторождения действует неравнокомпонентное гравитационно-тектоническое поле напряжений, в котором максимальные сжимающие напряжения ориентированы по простиранию рудного тела на юго-юго-запад по азимуту 155–180° и в 1.7–2.1 раза превышают вертикальную гравитационную составляющую тензора напряжений (табл. 1). Наблюдается рост наибольших напряжений с глубиной от 33.3 МПа на горизонте V (глубина 370 м) до 49.9 МПа на горизонте IX (глубина 620 м).

ТАБЛИЦА 1. Результаты натурных измерений напряжений массива горных пород Мало-Тулукуевского месторождения

Напряжение	Напряжение по А. Н. Диннику, МПа	Среднее напряжение, МПа	Отношение напряжения	
			по простиранию к вертикальному	вкрест простирания к вертикальному
Горизонт V, глубина от поверхности 368 м				
Вертикальное	–9.5	–20.2	—	—
По простиранию	–3.7	–33.3	2.10	—
Вкрест	–3.7	–26.2	—	1.30
Горизонт VI, глубина от поверхности 428 м				
Вертикальное	–11.1	–20.3	—	—
По простиранию	–4.3	–33.8	1.67	—
Вкрест	–4.3	–27.1	—	1.33
Горизонт VIIд, глубина от поверхности 512 м				
Вертикальное	–13.4	–24.0	—	—
По простиранию	–5.2	–43.4	1.80	—
Вкрест	–5.2	–34.8	—	1.45
Горизонт IX, глубина от поверхности 616 м				
Вертикальное	–16.0	–26.0	—	—
По простиранию	–6.2	–49.9	1.90	—
Вкрест	–6.2	–41.6	—	1.60

Для оценки влияния горных работ на напряженно-деформированное состояние горного массива выполнено его математическое моделирование методом конечных элементов. В качестве расчетной схемы выбран разрез 93, наиболее полно отражающий геолого-структурные особенности месторождения (рис. 2а, табл. 2). Результаты моделирования приведены на рис. 2б.

<sup>1</sup>Исследования напряженного состояния массива пород Мало-Тулукуевского месторождения проводились с участием сотрудников ИГД УрО РАН Р. В. Криницына и С. В. Сентябова.

ТАБЛИЦА 2. Граничные условия, используемые при моделировании напряженно-деформированного состояния участка массива горных пород Мало-Тулукеевского месторождения

Граничные условия	Глубина от поверхности, м	Напряжения, МПа	
		горизонтальные	вертикальные
Для исследования распределения напряжений в нетронутом массиве в проекции на разрез 93	368 (горизонт V)	–26.2	–20.2
	616 (горизонт IX)	–41.6	–26.0
Для исследования напряженно-деформированного состояния в конструктивных элементах слоевой системы разработки очистного блока на горизонте IX	556	–37.9	–26.0
	616	–41.6	–26.0

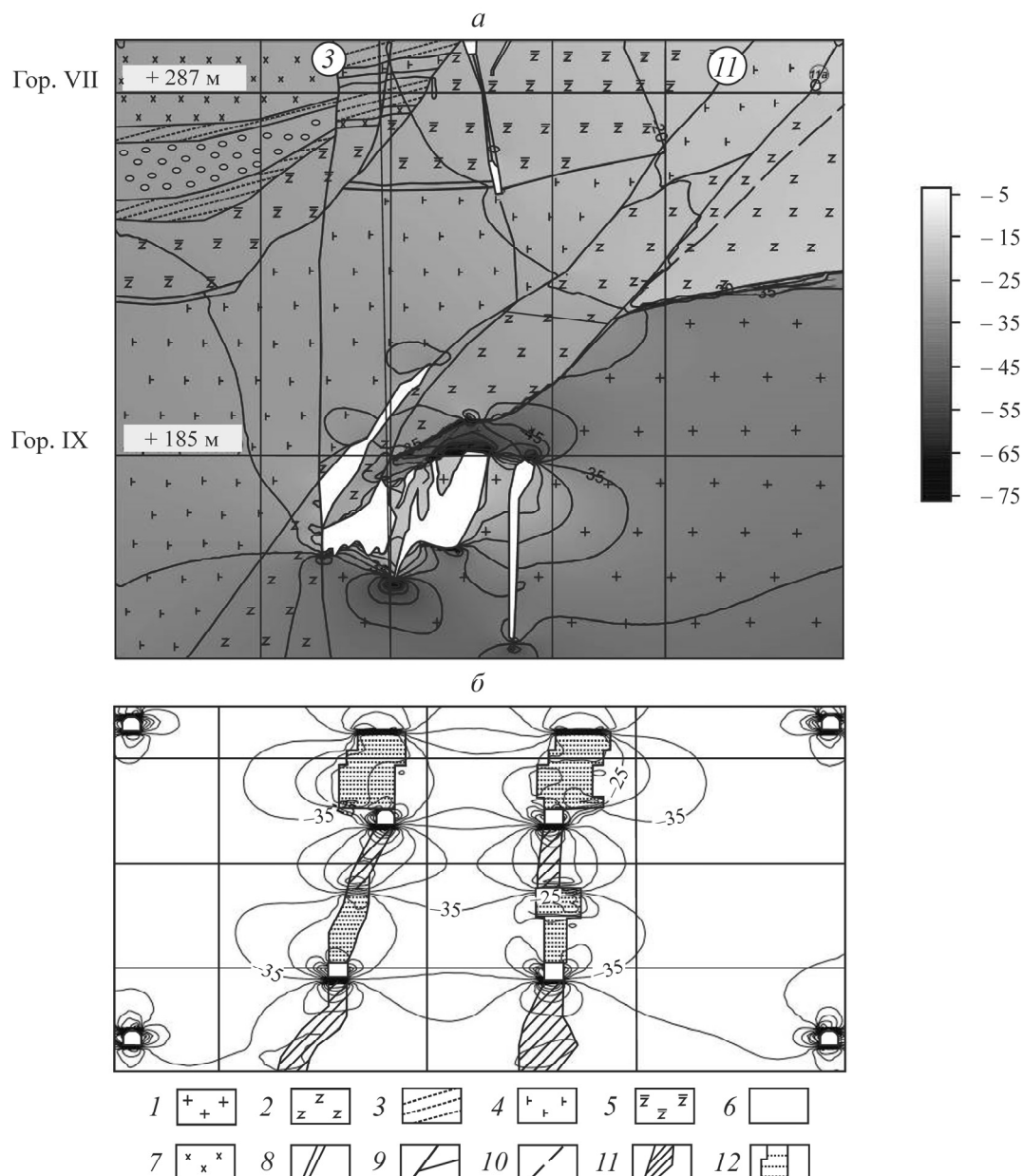


Рис. 2. Геологическая схема Мало-Тулукеевского месторождения (*a*) и распределение горизонтальных напряжений вкрест простирания рудных тел (*b*) после полной отработки запасов: 1 — граниты; 2 — трахидациты флюидалные; 3 — песчаники; 4 — базальты массивные; 5 — трахидациты; 6 — туфы; 7 — конгломераты; 8 — рудные тела; 9, 10 — разломы I и II порядка; 11 — выработанное пространство; 12 — твердеющая закладка

Отработка рудных тел сложной морфологии в условиях гравитационно-тектонического поля напряжений способствует на отдельных участках увеличению исходных напряжений в 1.8–2.2 раза (рис. 2б). Во вмещающем массиве над и под выработанным пространством, заложённым твердеющей закладкой, выявлено наличие зон повышенных напряжений (на глубине 600 м  $\sigma_x = -76$  МПа,  $\sigma_z = 59$  МПа). Концентрация напряжений наблюдается также вдоль контакта пород гранитов и трахидацитов и сохраняется в процессе всей отработки рудных запасов.

В процессе моделирования с учетом применяемой на месторождении технологии и порядка отработки запасов, предусматривающих деление участка рудной залежи на два полублока с последующей разработкой нисходящими горизонтальными слоями высотой 3.0–3.5 м и последующей закладкой выработанного пространства, установлен наиболее высокий уровень напряжений в уменьшающихся по мере отработки межблочных целиках. На конечной стадии отработки очистного блока максимальная концентрация горизонтальных сжимающих напряжений  $\sigma_x$  в уменьшающемся рудном целике высотой 12 м достигает 93 МПа, превышая предел прочности на сжатие вмещающих пород на 83 %. Результаты оценки напряженного состояния в уменьшающихся по мере отработки рудных целиков на конечной стадии отработки блока приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Оценка изменения напряженно-деформированное состояния в межблочных целиках по коэффициентам концентрации среднего давления и максимальных сжимающих напряжений, МПа

Исходное поле напряжений		Максимальные напряжения в рудных целиках		Коэффициент концентрации	
Среднее давление	Максимальные сжимающие напряжения	Среднее давление	Максимальные сжимающие напряжения	Среднее давление	Максимальные сжимающие напряжения
31.20	37.90	58.00	92.60	1.86	2.44

Максимальные коэффициенты концентрации среднего давления и горизонтальных сжимающих напряжений на конечной стадии формирования целика составили 1.86 и 2.44 соответственно. При отработке нижней части месторождения напряжения в отдельных участках рудопородного массива (межблочные рудные целики, а также высоконапряженные участки, сложенные гранитами, расположенные в верхней и нижней частях очистных блоков) превышают предельные значения, указывая на потенциальную удароопасность этих конструктивных элементов системы разработки.

В процессе шахтных натурных наблюдений и локального геоакустического контроля приконтурного массива на отдельных участках горных выработок выявлены динамические проявления удароопасности, включая стрельания пород и динамическое заколообразование кровли с отслоением плоских кусков породы с рваными краями при проходке штрека 8-902 на горизонте IX. В районе блоков 8-903 и 8-703 установлен повышенный уровень акустической активности. На горизонте IX в районе сопряжения орта 8-905 и штрека 8-902 количество АЭ-импульсов по каналу прибора “Prognoz L”  $N_1$  составило 127 имп., по каналу  $N_2$  — 126 имп., показатель амплитудного распределения 0.008, что соответствует категории “Опасно” [27, 28].



По результатам выполненных исследований установлена склонность Мало-Тулукуевского месторождения к горным ударам, а его нижняя часть с глубины 500 м (ниже горизонта VIId) отнесена к категории опасных. Для предупреждения опасных динамических проявлений горного давления разработаны указания по безопасному ведению горных работ на Мало-Тулукуевском месторождении, в которых обоснованы состав и параметры мероприятий по управлению горным давлением и снижению геодинамического риска. Для эффективной оценки и контроля удароопасности необходимо организовать комплексный геомеханический мониторинг состояния массива с применением инструментальных методов и технических средств, включая многоканальные автоматизированные системы контроля горного давления подобные “Prognoz ADS”.

## **ВЫВОДЫ**

Установлена достаточно высокая геодинамическая активность района Стрельцовского рудного поля и расположенного в его пределах Мало-Тулукуевского месторождения. Действующий здесь горизонтально тектонический поток ориентирован в юго-восточном направлении, что соответствует ориентации векторов скоростей современных горизонтальных движений литосферных блоков по данным GPS. В районе Стрельцовского рудного поля горизонтальные смещения тектонических блоков происходят в восток-юго-восточном направлении со скоростью 20–25 мм/год.

Выявлено, что прочностные и упругие характеристики образцов горных пород Мало-Тулукуевского месторождения варьируют в широком диапазоне (предел прочности на одноосное сжатие от 17 до 116 МПа, модуль Юнга от 7.1 до 30.2 ГПа). Наиболее прочными и хрупкими породами являются крупно- и мелкозернистые граниты. Коэффициенты хрупкости, равные 1, определены у 25 % исследованных образцов в естественном состоянии и у 11 % образцов в водонасыщенном.

Измерения напряжений методом щелевой разгрузки показали, что в массиве месторождения действует неравнокомпонентное гравитационно-тектоническое поле напряжений, в котором максимальные сжимающие напряжения ориентированы вдоль простирания рудных тел по азимуту 155–180° и в 1.7–2.1 раза превышают вертикальную гравитационную составляющую тензора напряжений.

Отработка рудных тел сложной морфологии в условиях гравитационно-тектонического поля напряжений приводит на отдельных участках к увеличению исходных напряжений в 1.8–2.2 раза. Во вмещающем массиве над и под выработанным пространством, заложенным твердеющей закладкой, имеются зоны повышенных напряжений, особенно в уменьшающихся по мере отработки межполублочных целиках. На конечной стадии отработки очистного блока максимальная концентрация горизонтальных сжимающих напряжений в рудном целике высотой 12 м достигает 93 МПа, значительно превышая предел прочности на сжатие вмещающих пород.

Результаты численного моделирования и предварительных оценок нашли подтверждение в процессе шахтных натурных наблюдений и локального геоакустического контроля приконтурного массива горных пород. На его отдельных участках выявлены динамические проявления удароопасности и установлен повышенный уровень акустической активности.

Геомеханическими наблюдениями выявлена склонность Мало-Тулукуевского месторождения к горным ударам, а его нижняя часть с глубины 500 м отнесена к категории опасных по горным ударам. Для предупреждения опасных динамических проявлений горного давления обоснованы состав и параметры мероприятий по управлению горным давлением и снижению геодинамического риска и даны рекомендации по организации комплексного геомеханического мониторинга.

В исследованиях принимали участие сотрудники ИГД ДВО РАН В. Г. Крюков, М. И. Рассказов, А. А. Терешкин, Д. И. Цой, М. И. Ломов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петухов И. М., Батугина И. М. Геодинамика недр. — М.: Недра коммюникейшенс, 1999. — 256 с.
2. Курленя М. В. Геодинамика и техносфера. — Новосибирск: Наука, 2004. — 131 с.
3. Филиппов В. Н., Еременко А. А., Христолюбов Е. А. Отработка предохранительных целиков в удароопасных условиях на Таштагольском и Шерегешевском месторождениях // ФТПРПИ. — 2021. — № 1. — С. 62–72.
4. Рассказов И. Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона. — М.: Горн. книга, 2008. — 329 с.
5. Meifeng C. Prediction and prevention of rockburst in metal mines — a case study of Sanshandao gold mine, J. Rock Mech. Geotech. Eng., 2016, Vol. 8, Issue 2. — P. 204–211.
6. Williams Stroud S. C. Earth stress and seismic hazard from the size-frequency distribution of seismic events, Proc. of 51<sup>st</sup> Rock Mech., Geomech. Symp. California, San-Francisco, American Rock Mech. Association, 2017. — P. 544–550.
7. Marcak H. and Mutke G. Seismic activation of tectonic stresses by mining, J. Seismology, 2013, Vol. 17, No. 4. — P. 1139–1148.
8. Keneti A. and Sainsbury B. Review of published rockburst events and their contributing factors, Eng. Geol., 2018, No. 246. — P. 361–373.
9. Manchao H., Fuqiang R., and Dongqiao L. Rockburst mechanism research and its control, Int. J. Min. Sci. Technol., 2018, Vol. 28, Issue 5. — P. 829–837.
10. Rasskazov I. Yu., Saksin B. G., Petrov V. A., Shevchenko B. F., Usikov V. I., and Gil'manova G. Z. Present day stress strain state in the upper crust of the amurian lithosphere plate, Izvestiya Phys. Solid Earth, 2014, Vol. 50, No. 3. — P. 444–452.
11. Карта современной геодинамики Азии. Масштаб 1:5000000 / Сост. К. Г. Леви, С. И. Шерман, В. А. Саньков, О. В. Лунина, А. В. Лухнев. — Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007.
12. Seminskii K. Zh. Hierarchy in the zone-block lithospheric structure of central and eastern Asia, Russ. Geol. Geoph., 2008, Vol. 49, No. 10. — P. 771–779.
13. Рассказов И. Ю., Саксин Б. Г., Петров В. А., Просекин Б. А. Геомеханические условия и особенности динамических проявлений горного давления на месторождении “Антей” // ФТПРПИ. — 2012. — № 3. — С. 3–13.
14. Имаева Л. П., Гусев Г. С., Имаев В. С., Ашурков С. В., Мельникова В. И., Середкина А. И. Геодинамическая активность новейших структур и поля тектонических напряжений северо-востока Азии // Геодинамика и тектонофизика. — 2017. — Т. 8. — № 4. — С. 737–768.
15. Петров В. А., Сим Л. А., Насимов Р. М., Щукин С. И. Разломная тектоника, неотектонические напряжения и скрытое урановое оруденение в районе Стрельцовой кальдеры // Геология рудных месторождений. — 2010. — Т. 52. — № 4. — С. 310–320.

16. Саньков В. А. Современная геодинамика внутриконтинентальных областей: инструментальные и геолого-геоморфологические оценки движений и деформаций земной коры центральной Азии // Геодинамика и тектонофизика. — 2014. — Т. 5. — № 1. — С. 159–182.
17. Рассказов И. Ю., Саксин Б. Г., Усиков В. И., Потапчук М. И. Геодинамическое состояние массива пород Николаевского полиметаллического месторождения и особенности проявления удароопасности при его освоении // Горн. журн. — 2016. — № 12. — С. 13–19.
18. Рассказов И. Ю., Петров В. А., Гладырь А. В., Тюрин Д. В. Геодинамический полигон Стрельцовского рудного поля: практика и перспективы // Горн. журн. — 2018. — № 7. — С. 15–19.
19. Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье / под ред. С. С. Наумова — Иркутск: ГК “Геологоразведка”, 2007. — 260 с.
20. Усиков В. И. 3D-модели рельефа и строение верхней части земной коры Приамурья // Тихоокеанская геология. — 2011. — № 6. — С. 14–33.
21. Рыбас О. В., Гильманова Г. З. Применение теории масштабируемого пространства для выделения и анализа структур рельефа по радиолокационным данным // Исследование Земли из космоса. — 2011. — № 6. — С. 45–52.
22. Влох Н. П. Управление горным давлением на подземных рудниках. — М.: Недра, 1994. — 208 с.
23. Зубков А. В., Феклистов Ю. Г., Липин Я. И., Худяков С. В., Криницын Р. В. Деформационные методы определения напряженного состояния пород на объектах недропользования // Проблемы недропользования. — 2016. — № 4. — С. 41–49.
24. Петухов И. М., Линьков А. М., Сидоров В. С. Расчетные методы в механике горных ударов и выбросов. — М.: Недра, 1992. — 256 с.
25. Зотеев О. В. Моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород численными методами // Горн. журн. — 2003. — № 5. — С. 108–115.
26. Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А. Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005. — 264 с.
27. Сидоров Д. В., Потапчук М. И., Сидляр А. А., Курсакин Г. А. Оценка удароопасности при освоении глубоких горизонтов Николаевского месторождения // Записки горн. ин-та. — 2019. — Т. 238. — С. 392–398.
28. Рассказов И. Ю., Мигунов Д. С., Аникин П. А., Гладырь А. В., Терешкин А. А., Желнин Д. О. Геоакустический портативный прибор нового поколения для оценки удароопасности массива горных пород // ФТПРПИ. — 2015. — № 3. — С. 169–179.
29. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых ФНП в области промышленной безопасности / Приказ Ростехнадзора № 505 от 08.12.2020 г. — М., 2020. — 275 с.
30. Саньков В. А., Леви К. Г., Лухнев А. В., Мирошниченко А. И. Современные движения литосферных блоков Центральной Азии по данным GPS-геодезии // Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии. — Новосибирск: СО РАН, 2005. — С. 165–179.
31. Лухнев А. В., Саньков В. А., Мирошниченко А. И., Ашурков С. В., Кале Э. Вращения и деформации Земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе по данным GPS-измерений // Геология и геофизика. — 2010. — Т. 51. — № 7. — С. 1006–1017.
32. Петров В. А., Лексин А. Б., Погорелов В. В., Ребецкий Ю. Л., Саньков В. А., Ашурков С. В., Рассказов И. Ю. Геодинамическое моделирование рудоносных геологических структур (на примере района Стрельцовского урановорудного поля) // Геология рудных месторождений. — 2017. — Т. 59. — № 3. — С. 173–200.

*Поступила в редакцию 09/VIII 2021*

*После доработки 09/IX 2021*

*Принята к публикации 10/IX 2021*