



Научная статья

УДК 622.272:622.274

EDN: XLEMХО

DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-3-1

Исследование геомеханического состояния массива горных пород рудного тела Высокое-2

А.М. Павлов^а, А.Ю. Болотнев^б, Б.Н. Олзоев^{с✉}

^{а-с}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

Резюме. Наклонное рудное тело Высокое-2 относится к Киндиканскому участку Ирокиндинского золоторудного месторождения и разрабатывается подземным способом в гористой местности. Горные работы ведутся в сложных геологических условиях, определяющих изменение природного и техногенного напряженного состояния массива горных пород. С целью обеспечения эффективного управления горным давлением в ходе проведенных работ выполнен комплекс исследований геомеханического состояния массива горных пород на нижних горизонтах рудного тела. В рамках работ уточнены параметры трещиноватости массива, проведены физико-механические испытания образцов горных пород и оценена устойчивость обнажений в горных выработках. Натурные измерения по методике Уральского отделения Российской академии наук (на станциях щелевой разгрузки в выработках нижних горизонтов) позволили выявить закономерности распределения природных напряжений в массиве горных пород. Характер распределения напряжений в массиве рудного тела Высокое-2 определен как гравитационно-тектонический. Для оценки техногенной составляющей напряженного состояния выполнен расчет напряжений вокруг выработок с использованием метода конечных элементов. В рамках работ установлены допустимые уровни напряжений для пород, а также закономерности формирования разрушающих напряжений вдоль контура выработок. Анализ показал, что техногенные напряжения превышают допустимые значения, вследствие чего в зоне устойчивых пород требуется проведение мероприятий по разгрузке массива. Данные визуального обследования состояния выработок свидетельствуют о наличии статического горного давления. С учетом полученных результатов разработаны рекомендации по безопасному ведению горных работ на рудном теле Высокое-2.

Ключевые слова: подземная разработка, физико-механические свойства, трещиноватость, устойчивость, напряжения, геомеханика

Для цитирования: Павлов А.М., Болотнев А.Ю., Олзоев Б.Н. Исследование геомеханического состояния массива горных пород рудного тела Высокое-2 // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № ?. С. ?-?. DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-3-1. EDN: XLEMХО.

Original article

Study of the geomechanical behavior of the rock mass of the Vysokoye-2 ore body

Aleksandr M. Pavlov^а, Aleksandr Yu. Bolotnev^б, Boris N. Olzoev^{с✉}

^{а-с}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The Vysokoye-2 inclined ore body belongs to the Kindikansky section of the Irokindinsky gold ore deposit and is mined underground in mountainous area. Mining operations are conducted in complex geological conditions, which determine changes in the natural and man-made stress behavior of the rock mass. To ensure effective management of rock pressure, a set of studies was performed including a comprehensive study of the geomechanical behavior of the rock mass at the lower levels of the ore body. As part of the research, the fracturing parameters of the rock mass were refined, physical and mechanical tests of rock samples were conducted, and the stability of rock exposures in mine workings was assessed. In situ measurements using the method of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (at slot-discharge stations in workings of the lower levels) made it possible to identify the distribution patterns of natural stresses in the rock mass. The stress distribution pattern within the Vysokoye-2 ore body was determined as gravitational-tectonic. To assess the man-made component of the stress behavior, stress calculations around the workings were performed using the finite element method. This work established permissible stress levels for the rocks, as well as formation patterns of destructive stresses along the workings' contours. The analysis showed that man-made stresses exceed the permissible values, and therefore, measures for stress relief of the mass are required in the zone of stable rocks. Data from visual inspection of the condition of the workings indicate the presence of static rock pressure. Taking into account the results obtained, recommendations have been developed for the safe mining operations at the Vysokoye-2 ore body.



Keywords: underground mining, physical and mechanical properties, fracturing, stability, stresses, geomechanics

For citation: Pavlov A.M., Bolotnev A.Yu., Olzoev B.N. Study of the geomechanical behavior of the rock mass of the Vysokoye-2 ore body. *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(?):?-?. (In Russ.). DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-3-1. EDN: XLEM XO.

Введение

Ирокиндинское золоторудное месторождение расположено в южных отрогах Южно-Муйского хребта, в пределах бассейна р. Тулдунь и Тулуя (левые притоки р. Витим). С точки зрения административно-территориального деления месторождение входит в состав Муйского района Республики Бурятия; расстояние до железнодорожной станции Байкало-Амурской магистрали (районный центр Таксимо) составляет 74 км в южном направлении.

Характер рельефа на участке имеет переходный тип: северная часть отличается высокогорным рельефом с сильной расчлененностью, южная – среднегорным. Высотные отметки водоразделов находятся в интервале 1200–2000 м над уровнем моря. Перепады высот между водоразделами и днищами долин варьируются от 300–400 до 1000 м.

Климат района резко континентальный с большими суточными колебаниями температур. Месторождение находится в сейсмически активном районе с вероятной максимальной силой землетрясений – 9 баллов.

Рудное тело Высокое-2 залегает в районе Киндиканского участка месторождения.

Вмещающие породы представлены гнейсами. Гнейсы в приконтактной части с рудным телом – березитизированы, с наличием локальных участков зон графитизации, простирающихся субпараллельно рудному телу по верхнему и нижнему контактам. В непосредственной близости от рудного тела породы подвергнуты интенсивной трещиноватости. Мощность зон расланцевания по вертикали – от 0,2 м до 3 м. Контакт кварцевой жилы и зоны расланцевания четкий, ясный, трещины заполнены глиной трения.

Рудное тело жилы представляет собой зону расланцевания с прожилками кварцевого состава с варьирующей мощностью от 0,35 до 0,6 м, в среднем 0,4 м, с углом падения от 22 до 40°, с гофрированной формой поверхности.

Устойчивость горных выработок снижается из-за наличия зон расланцевания и трещиноватости руд и вмещающих пород, а также присутствия локальных участков зон графитизации. Горизонты ниже отметки 1160 м на-

ходятся в переходной, техногенной и талой криолитозонах. Массив горных пород рудного тела характеризуется преимущественно среднеустойчивым и неустойчивым состоянием – на долю неустойчивых пород приходится 30 %.

Вскрытие балансовых запасов осуществляется через два съезда, от которых прокладываются квершлагги. Они служат для разделения очистных блоков на подэтажи с шагом по вертикали 25 м. Для подготовки запасов задействуют рудные штреки и восстающие; отработка ведется по камерно-столбовой системе с креплением выемочного пространства, при этом используется самоходное горное оборудование.

Отработка рудного тела производится на глубине более 700 м от поверхности, что обуславливает изменение температурного режима, природных и техногенных напряжений массива горных пород. На нижних горизонтах (абсолютные отметки в интервале 1060–1110 м) фиксируется проявление горного давления, выражающееся в вывалах с бортов и кровли выработок; данный фактор сопровождается повышением уровня разубоживания руды при добыче.

С учетом сложившихся горно-геологических условий для корректного обоснования параметров геотехнологии требуется постоянный геомеханический мониторинг состояния массива. Именно поэтому актуальной становится задача исследования геомеханического состояния рудного тела Высокое-2.

В соответствии с требованиями нормативных документов, специалистами Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ) в области геотехнологии и геомеханики разработки рудных месторождений подземным способом была выполнена научная работа по проведению исследования геомеханического состояния массива горных пород с учетом развития нижележащих горизонтов рудного тела Высокое-2 Киндиканского участка Ирокиндинского месторождения. Выполненные исследования позволили сформировать обоснованный набор параметров геотехнологии, регламентирующих отработку запасов на нижних горизонтах рудного тела Высокое-2.



Материалы и методы исследования

Исследование выполнено в рамках технического задания по договору № 0067/25, заключенному с ООО «Ирокинда» (г. Улан-Удэ, Россия). Физико-механические характеристики горных пород рудного тела Высокое-2 получены в ходе испытаний образцов, отобранных на нижних горизонтах. Исследования проведены в лаборатории геомеханики и физики горных пород ИРННТУ с соблюдением действующих российских стандартов. Данные параметры легли в основу геомеханических расчетов, позволяющих оценить состояние массива в районе размещения горных выработок.

Оценка устойчивости обнажений пород базировалась на пространственно-статистическом анализе тектонических структур. Анализ выполнен по фотоматериалам керна разведочных скважин.

Первоначальные природные напряжения в массиве определены посредством натурных измерений на станциях щелевой разгрузки в выработках нижних горизонтов рудного тела – в соответствии с методикой Института горного дела УрО РАН [1, 2]. Результаты ранее проведенных аналогичных исследований отражены в работах, характеризующих природные закономерности распределения напряжений и их связь с рудоносностью, а также подходы к обоснованию параметров отработки рудных тел в сложных горно-геологических условиях [3–11]. Также были использованы методы оценки и определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород и способы прогноза удароопасности, применимые при проектировании и ведении горных работ [7–11].

Для оценки напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов применяемой системы разработки выполнено математическое моделирование методом конечных элементов [12, 13].

Расчеты выполнены в программном комплексе FEM (разработчик профессор О.В. Зотеев, Институт горного дела УрО РАН) [15–17]. В качестве исходных данных учтены:

- значения первоначальных напряжений горного массива;
- физико-механические свойства пород (включая модуль упругости, коэффициент Пуассона, угол внутреннего трения, сцепление, плотность, пределы прочности на сжатие и растяжение и другие параметры);

- геометрические характеристики сети горных выработок.

Результаты моделирования представлены как в графической (рисунки, графики), так и в числовой форме. Проведенный анализ напряженно-деформированного состояния позволил установить ключевые закономерности распределения горного давления, в частности в целиках, стенках выработок и камерах подрабатываемого массива.

Расчет техногенных напряжений осуществлен с использованием зависимостей, разработанных В.Ф. Трубмачевым, Г.А. Катковым, Д.И. Беккером, Н.П. Влохом, А.В. Зубковым, Л. И. Сосновским [18]. При этом отдельно определены коэффициенты концентрации напряжений.

Фактические проявления горного давления изучены в ходе натурного визуального обследования выработок рудного тела Высокое-2. В процессе обследования проводилась обязательная фотофиксация состояния крепи и массива, что позволило зафиксировать характерные особенности их текущего состояния.

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе настоящих исследований с нижних горизонтов жилы Высокая-2 – с района закладки наблюдательной станции горного давления, на горизонте 1160 м – были отобраны 6 проб горных пород в виде кернового материала, представленного переслаивающимися гнейсами и березитами.

По результатам лабораторных испытаний физико-механических свойств горных пород установлено, что пробы, отобранные с жилы Высокая-2, характеризуются высокими упругими и прочностными показателями, типичными для пород магматического и метаморфического генезиса.

Определены следующие значения физико-механических характеристик:

- объемный вес – 0,028 МН/м³;
- угол внутреннего трения – 33°;
- коэффициент Пуассона – 0,2;
- модуль упругости – 81 ГПа;
- модуль деформации – 70 ГПа;
- сцепление – 14 МПа;
- предел прочности на сжатие – 95 МПа;
- предел прочности на растяжение – 15 МПа.

При водонасыщении образцов не происходит заметного уменьшения прочностных свой-



ств, то есть породы являются водостойкими. Коэффициент крепости по М.М. Протоdjяконову получен в диапазоне 6–10, что соответствует породам средней крепости и крепким породам.

Оценка хрупкости пород по методике Г.Н. Кузнецова (по соотношению прочностей на одноосное сжатие и растяжение) на нижних горизонтах рудника показала, что представленные образцы пород склонны к хрупкому разрушению. Средний коэффициент хрупкости 6,7, что больше критерия хрупкости Г.Н. Кузнецова, равного 6.

Соотношение упругих и полных деформаций по методике Я.А. Бича показало высокую склонность представленных образцов к хрупкому разрушению под нагрузкой [19].

Лабораториями ИРНТУ и Научно-исследовательского института горной геомеханики и маркшейдерского дела в ходе испытаний образцов аналоговых литотипов горных пород и руд, отобранных на вышележащих горизонтах, ранее была подтверждена склонность пород и руд рудного тела Высокое-2 к хрупкому разрушению под нагрузкой. Выявленная характеристика согласуется с ранее установленными закономерностями поведения массива.

Данные лабораторных исследований прочностных и упругих свойств пород, проведенных в 2012–2025 гг., показывают хорошую сходимость результатов. Это позволяет сделать вывод о стабильности физико-механических характеристик горного массива на протяжении указанного периода.

Для выполнения расчетов в качестве исходных параметров использованы усредненные

показатели физико-механических свойств – они получены по итогам лабораторных испытаний керны из рудных интервалов разведочных скважин рудного тела Высокое-2. Указанные значения представлены в табл. 1.

В ходе анализа фотоматериалов керны из 264 разведочных скважин, пробуренных из буровых камер на горизонтах 1110–1160 м, зафиксировано наличие характерного дискования лишь в 16 скважинах, что составляет менее 6 % от общего количества обследованных скважин.

Проведена оценка степени дискования керны по разведочным скважинам, пробуренным из подземных выработок. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что массив горных пород по жиле Высокая-2 характеризуется наличием незначительных по площади и тонких (0,05–0,5 м) по мощности участков пород гнейса, находящихся в высоконапряженном состоянии.

Участки с дискованием керны находятся на значительном удалении от устья скважин, вне зоны опорного горного давления выработки, что свидетельствует о наличии отдельных высоконапряженных участков в массиве горных пород, связанных с тектоническими разломами или контактами разнопрочных пород. В случае обнажения таких участков, которые сложены переслаивающимися гнейсами с тонкими линзообразными гнейсами и березитами, массив будет разваливаться (разгрузится без динамического проявления горного давления), а при более мощных монолитных прослойках пород возможно

Таблица 1. Расчетные физико-механические характеристики пород для моделирования напряжений массива (рудное тело Высокое-2)
Table 1. Calculated physical and mechanical properties of rocks for stress modeling of the rock mass (Vysokoye-2 ore body)

Физико-механическое свойство	Значение в естественном состоянии
Коэффициент Пуассона	0,2
Угол внутреннего трения, град.	33
Сцепление, МПа	14
Модуль упругости, ГПа	81
Остаточная прочность, МПа	9,7
Коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протоdjяконова	9
Плотность, т/м ³	2,75
Объемный вес, мН/м ³	0,0282
Категория устойчивости	Средней устойчивости, неустойчивые
Модуль деформации в образце, ГПа	70
Модуль деформации в массиве, ГПа	5–12
Количество трещин на 1 м, шт.	13
Средний размер структурного блока, м	0,07



проявление горного давления в опорной зоне в виде заколообразования.

В рамках пространственно-статистического анализа трещиноватости массива по фотоматериалам керна разведочных скважин выполнена расчетная оценка средневзвешенной интенсивности трещиноватости (удельной трещиноватости). Показатель представлен в виде количества трещин на 1 пог. м интервала керна. Следует отметить, что с целью оптимизации решения технологических задач и анализа степени влияния рудных жил на трещиноватость вмещающего массива интенсивность трещиноватости оценивалась вблизи (7–15 м) рудных тел, то есть будущих очистных камер.

Анализ показал, что интенсивность трещиноватости вблизи рудных тел и в остальной части горного массива практически сопоставима. Таким образом, наличие рудных тел не приводит к существенному увеличению трещиноватости приконтурного массива.

Среднестатистический показатель интенсивности трещиноватости в зоне около рудных тел, рассчитанный по данным анализа керна из 13 разведочных скважин (общая длина исследованных интервалов 306 м), составляет $13,9 \pm 1,9$ трещин на 1 пог. м. Статистическая однородность результатов по всем скважинам подтверждена: данные относятся к единой выборке. При этом среднее расстояние между отдельными трещинами варьируется в пределах 6–8 см.

По объему массива распределение интенсивности трещиноватости имеет следующий характер: в 68 % объема значение показателя не превышает среднего уровня, в оставшихся 32 % – превышает его.

С учетом полученных результатов массив горных пород на нижних горизонтах месторождения отнесен к категориям среднеустойчивых и неустойчивых пород. С целью выявления природных – первоначальных напряжений были заложены станции щелевой разгрузки на глубине 620–730 м от поверхности по квершлагу 1/1060, штрекам 3/1060 и 4/1060 в талых породах. Суммарное количество выполненных щелей по станциям равно 16. Выявленные закономерности распределения поля первоначальных напряжений, действующих на нижних горизонтах рудного тела Высокое-2, по результатам измерений на глубине 620–730 м показали, что на глубине 700 м от земной поверхности в массиве горных пород рудного тела Высокое-2 максимальные напряжения действуют горизонтально, вкрест простирания рудных жил.

В этом направлении напряжения превышают вертикальные в 1,6 раза. Горизонтальные напряжения, ориентированные в направлении простирания рудных жил (продольные) несколько меньше, они превышают вертикальные в 1,1 раза. Распределение напряжений в массиве горных пород рудного тела Высокое-2 носит гравитационно-тектонический характер.

Такое распределение напряжений характерно для глубоких горизонтов многих жильных месторождений [20].

Прогнозные значения первоначальных напряжений для массива нижних горизонтов (глубина 700–950 м) подлежат аппроксимации с использованием следующих расчетных формул:

$$\begin{aligned}\sigma_v &= -\gamma H; \\ \sigma_{np} &= -1,1 \times \gamma H; \\ \sigma_n &= -1,9 \times \gamma H,\end{aligned}$$

где: σ_v – вертикальные напряжения, МПа; σ_{np} – продольные напряжения, МПа; σ_n – поперечные напряжения, МПа; γ – объемный вес пород МН/м³; H – глубина измерения, м.

Приведенные зависимости предлагается использовать в качестве граничных условий при инженерных расчетах техногенных напряжений в конструктивных элементах систем разработки для ведения горных работ в условиях массива талых пород нижних горизонтов рудного тела Высокое-2 на глубинах до 900–950 м от земной поверхности.

Соответствующие прогнозные значения первоначальных напряжений нижних горизонтов приведены в табл. 2.

Экстраполяция результатов натурных измерений, выполненных в 2025 г. на глубине 620–730 м, в целях геомеханических расчетов допустима на интервал не более 200–250 м. Таким образом, предельная глубина, до которой обоснована экстраполяция данных, составляет 900–950 м от земной поверхности, рекомендуется повторить цикл измерений первоначальных напряжений массива горных пород с целью своевременного предупреждения негативных проявлений горного давления в динамических и статических формах.

Для оценки напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов системы разработки, реализуемой на руднике, был задействован программный комплекс FEM. Проведенная с его помощью обработка расчетных данных дала возможность определить ключевые закономерности распределения горного давления, в частности в целиках, стенках выработок и камерах подрабатываемого мас-



Таблица 2. Прогнозные значения первоначальных напряжений нижних горизонтов рудного тела Высокое-2
Table 2. Predicted values of initial stresses of the lower horizons of the Vysokoye-2 ore body

Глубина горных работ, м	Значение напряжения, МПа		
	вертикального	горизонтального	
	σ_v	$\sigma_{пр}$	σ_n
700	-19,6	-21,6	-31,4
800	-22,4	-24,6	-35,8
900	-25,2	-27,7	-40,3
950	-26,6	-29,3	-42,6

Примечание. σ_v , $\sigma_{пр}$, σ_n – вертикальные, продольные и поперечные напряжения соответственно, МПа.

сива. Кроме того, на базе моделирования выполнена оценка устойчивости конструктивных элементов системы разработки.

Графические результаты моделирования напряженно-деформированного состояния для одиночных горизонтальных и наклонных выработок (квершлагов, наклонно-транспортного съезда), размещенных вне зоны воздействия очистных работ, приведены на рис. 1. Анализ данных показал, что в указанных выработках преобладают сжимающие напряжения. Наибольшие значения напряжений отмечены в кровле и в угловых участках кровли, наименьшие – в стенках выработок.

На глубинах 700–950 м напряжения в стенках одиночных выработок составляют -10... -13 МПа. Данный уровень напряжений существенно ниже допустимых значений: 76 МПа – по критерию динамических проявлений горного давления, 21 МПа – по критерию статических

форм проявлений. Следовательно, стенки выработок характеризуются как неудароопасные и устойчивые. Напряжения в кровле и углах кровли на указанных глубинах достигают -59... -80 МПа, что практически меньше допустимых напряжений по динамическим проявлениям (до глубин 900 м, свыше – превышают), но выше допустимых по статическим проявлениям горного давления. Кровля и углы кровли одиночных горизонтальных и наклонных выработок неустойчивы, начиная с глубин 600 м.

Таким образом, одиночные горизонтальные и наклонные выработки вне зоны влияния очистных работ на глубинах 600–900 м находятся в области проявления статического горного давления и требуют крепления.

Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния в надштрековых и подштрековых целиках и в подготовительных штреках приведены на рис. 2, 3.

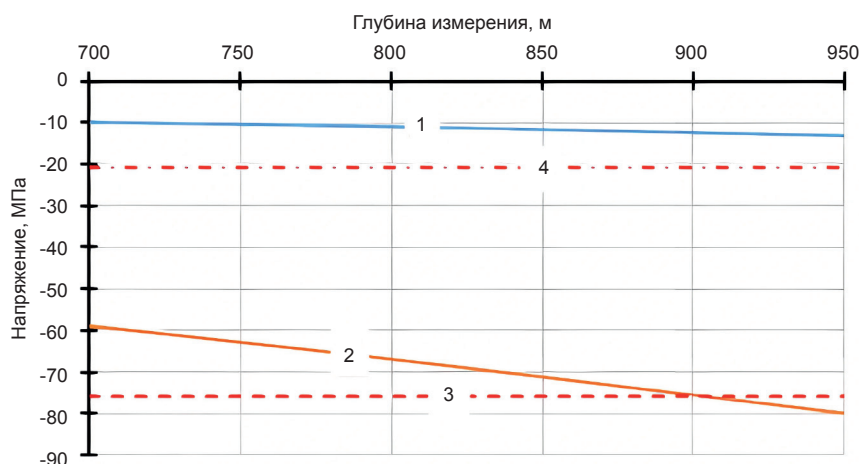


Рис. 1. Напряжения на контуре одиночных выработок вне зоны влияния очистных работ:

- 1 – напряжения в стенках; 2 – напряжения в кровле и углах кровли;
3 – напряжения, допустимые по проявлениям горного давления в динамических формах;
4 – напряжения, допустимые по проявлениям горного давления в статических формах

Fig. 1. Stresses at the contour of single workings outside the influence zone of stoping operations:

- 1 – stresses in the walls; 2 – stresses in the roof and roof corners;
3 – stresses permissible for rock pressure manifestations in dynamic forms;
4 – stresses permissible for rock pressure manifestations in static forms

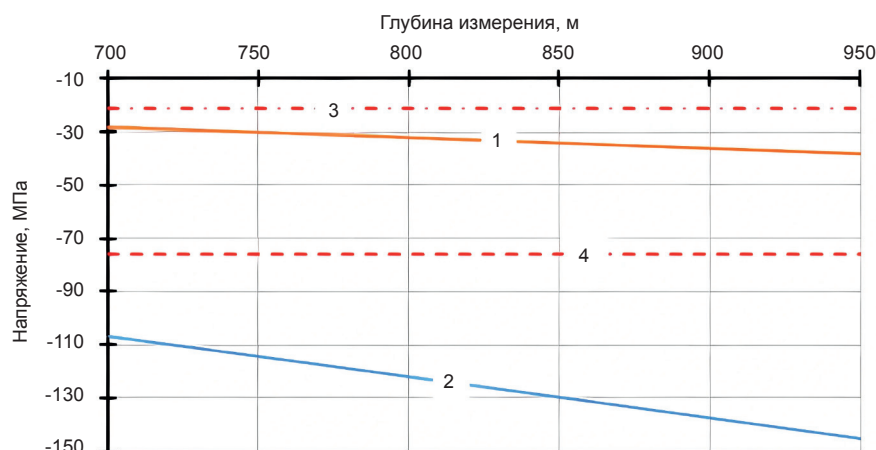


Рис. 2. Напряжения на контуре рудных штреков:

- 1 – напряжения в стенках; 2 – напряжения в кровле и углах кровли;
3 – напряжения, допустимые по проявлениям горного давления в статических формах;
4 – напряжения, допустимые по проявлениям горного давления в динамических формах

Fig. 2. Stresses at the ore drift contour:

- 1 – stresses in the walls; 2 – stresses in the roof and roof corners;
3 – stresses permissible for rock pressure manifestations in static forms;
4 – stresses permissible for rock pressure manifestations in dynamic forms

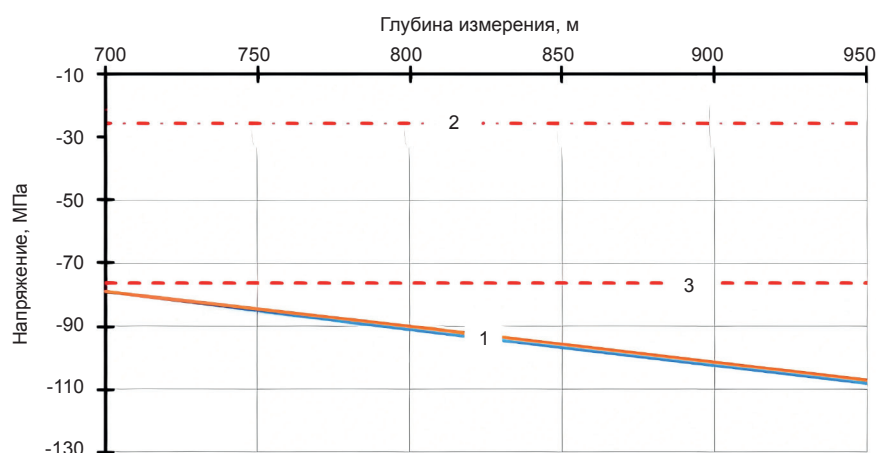


Рис. 3. Напряжения в предохранительных надштрековом и подштрековом целиках:

- 1 – напряжения в подштрековом и надштрековом целиках;
2 – напряжения, допустимые по проявлениям горного давления в статических формах;
3 – напряжения, допустимые по проявлениям горного давления в динамических формах

Fig. 3. Stresses in protective over-drift and under-drift pillars:

- 1 – stresses in under-drift and over-drift pillars;
2 – stresses permissible for rock pressure manifestations in static forms;
3 – stresses permissible for rock pressure manifestations in dynamic forms

Минимальные значения напряжений зафиксированы в стенках рудных штреков. На глубине 700–950 м их величина варьируется в диапазоне от -28 до -38 МПа. Этот уровень напряжений ниже предельно допустимого значения в 76 МПа (с учетом возможных динамических проявлений горного давления), однако превышает нормативное значение в 21 МПа, установленное для выработок долговременного состояния при статических формах проявления горного давления. В то же время в кровле руд-

ных штреков напряжения достаточно высоки и превышают допустимые по статическим и динамическим проявлениям на всех анализируемых глубинах (см. рис. 2). Борта и кровлю рудных штреков на больших глубинах необходимо крепить. Очевидно, в процессе отработки блока высокие напряжения в охранных целиках рудного штрека должны компенсироваться внутриблоковыми целиками и охранными целиками восстающего. Однако в процессе погашения большинства целиков в блоке вполне веро-



ятно разрушение охранных целиков рудных штреков, в том числе в динамических формах. Рекомендуется разработка технических мероприятий по упрочнению или снижению концентрации напряжений в охранных целиках рудных самоходных штреков.

Результаты напряжения в кровле очистной камеры до погашения внутриблоковых целиков приведены на рис. 4.

Напряжения в кровле очистной камеры меньше допустимых напряжений по проявлению горного давления в статической и динамической формах. В кровле очистных камер на момент формирования всех внутриблоковых целиков напряжения, сжимающие по характеру, небольшие по величине. Кровля очистных камер на момент их формирования (при пролете 3 м) устойчива при креплении распорными стойками.

В ходе визуального обследования горных выработок зафиксировано проявление статического горного давления на нижележащих горизонтах – в зоне талых, среднеустойчивых и неустойчивых пород. Оно выражается в отслоении пород по естественным трещинам. Данное явление наблюдается в случаях отсутствия крепления либо его несоответствия горно-геологическим условиям, а также при превышении допустимых значений напряжений на контуре выработок.

Визуальный осмотр показал, что состояние устойчивости обнажений массива горных по-

род при проходке горных выработок и ведении очистных работ в блоках согласуется с выводами проведенных исследований геомеханического состояния пород по рудному телу Высокое-2.

Заключение

Результаты исследований геомеханического состояния массива горных пород рудного тела «Высокое-2» позволяют сформулировать следующие выводы.

В рамках камерно-столбовой системы разработки с креплением и локализацией выработанного пространства (применяемой при отработке жилы Высокая-2 на участке Киндиканский) наибольшую опасность с точки зрения динамических проявлений горного давления представляют временные охранные (предохранительные) целики блоковых восстающих и рудных штреков. Согласно планам развития горных работ, такие целики оставляются на срок не менее трех лет.

На момент формирования всех внутриблоковых целиков и охранных целиков восстающего целики находятся в условиях проявления статического горного давления. Кровля очистных камер на момент их формирования (при расстоянии между целиками 3 м) требует крепления (из-за трещиноватости) и несклонна к динамическому виду обрушения. В процессе погашения целиков при достижении пролета кровли 12–14 м в оставшихся целиках будут возможны проявления

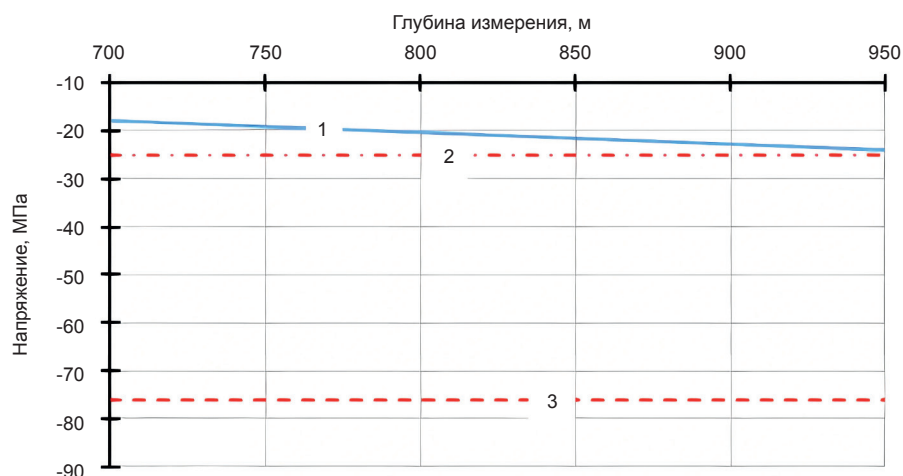


Рис. 4. Напряжения в кровле очистных камер до погашения внутриблоковых целиков:

1 – напряжения в целиках,

2 – напряжения, допустимые по проявлениям горного давления в статических формах;

3 – напряжения, допустимые по проявлениям горного давления в динамических формах

Fig. 4. Stresses in the roof of stoping chambers before the removal of intra-block pillars:

1 – stresses in pillars;

2 – stresses permissible for rock pressure manifestations in static forms;

3 – stresses permissible for rock pressure manifestations in dynamic forms



горного давления в динамических формах, а в кровле очистного пространства между ними – обрушения под действием высоких растягивающих напряжений.

Минимальная расчетная глубина по проявлениям горного давления в динамических формах без учета временных целиков составит 900 м при условии локализации – своевременного погашения очистного пространства при выемке внутриблоковых целиков.

Характер проявления горного давления на глубинах, выходящих за пределы расчетных критических значений, напрямую зависит от физико-механических свойств горных пород.

В породах с высокой устойчивостью, значительными упругими и прочностными показателями, предрасположенных к хрупкому разрушению при приложении нагрузки, не исключено развитие динамических форм горного давления.

Напротив, в неустойчивых и среднеустойчивых породах, а также в тех, которые не проявляют склонности к хрупкому разрушению, горное давление реализуется в статической форме и не несет угрозы горных ударов, в том числе и на глубинах, превышающих расчетную критическую отметку.

По результатам геомеханического исследования массива горных пород рудного тела Высокое-2 были определены и выданы конструктивные параметры применяемой системы разработки, позволяющие безопасно вести горные работы с меньшими затратами.

Шахтное поле рудного тела Высокое-2 отличается сложной геомеханической обстановкой. Это обуславливает необходимость регулярного и непрерывного мониторинга со стороны службы горного надзора. Контроль должен охватывать как текущее состояние горного массива, так и соответствие ведения горных работ проектным решениям на нижележащих горизонтах с обязательным учетом ранее сформулированных рекомендаций.

Для своевременного выявления зон повышенного горного давления и разработки мероприятий по безопасному ведению горных работ в области негативного влияния в границах этих зон необходимо вести геомеханический мониторинг. При вскрытии нижних, глубоких и расширении флангов существующих горизонтов необходимо продолжать изучение поведения массива горных пород специализированной организацией, особенно при внедрении новых параметров геотехнологии.

Список источников

1. Влох Н.П. Управление горным давлением на подземных рудниках: монография. М.: Недра, 1994. 208 с. EDN: RCJRTF.
2. Зубков А.В. Геомеханика и геотехнология: монография. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2001. 335 с. EDN: RRVDON.
3. Сосновская Е.Л., Авдеев А.Н. Особенности полей первоначальных напряжений жильных месторождений, расположенных в криолитозоне // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 5-2. С. 162–173. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_162. EDN: AKMMFO.
4. Филонюк В.А., Корнаков В.В., Сосновская Е.Л., Сосновский Л.И. Закономерности структурной взаимосвязи природных полей напряжений и аномальных концентраций рудного вещества в пределах золоторудных месторождений // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка рудных месторождений. 2014. № 5. С. 88–101. EDN: ULNZUZ.
5. Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л., Павлов А.М. Обоснование параметров технологии выемки глубокозалегающих тонких крутопадающих рудных тел // Горная промышленность. 2025. № S5. С. 85–91. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-5S-85-91. EDN: FWZMTE.
6. Мороз Н.Е., Сидоров Д.В., Соннов М.А. Комплексное геомеханическое моделирование разработки жильных месторождений блочного строения // Горная промышленность. 2023. № 6. С. 71–74. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-6-71-74. EDN: DYJMSL.
7. Сентябов С.В., Карамнов Д.В. Методы определения первоначальных напряжений массива горных пород натурными измерениями // Проблемы недропользования. 2023. № 1. С. 54–63. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.054. EDN: WXMOYW.
8. Сосновская Е.Л., Авдеев А.Н. Прогноз удароопасности при разработке жил малой и средней мощности системами с закладкой на больших глубинах // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2024. № 2. С. 471–483. EDN: GCVIMO.
9. Сентябов С.В. Управление горным давлением при освоении глубокозалегающих месторождений // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2023. № 2. С. 62–73. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-62-73. EDN: SVBWUC.
10. Трофимов А.В., Киркин А.П., Кормнов А.А., Шутов А.А. Исследование напряженно-деформированного состояния массива Октябрьского и Талнахского месторождений методом полной разгрузки керна // Цветные металлы. 2024. № 10. С. 31–39. DOI: 10.17580/tsm.2024.10.05. EDN: HGLBOI.



11. Айнбиндер И.И., Овчаренко О.В. Исследования потенциальной удароопасности массива горных пород на проектируемых глубинах отработки месторождения «Валунистое» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 6. С. 35–45. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_35. EDN: GUMUMK.
12. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Fox D.D. The finite element method for solid and structural mechanics. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 672 p.
13. Rust W. Non-linear finite element analysis in structural mechanics. Cham: Springer, 2015. 363 p. DOI: 10.1007/978-3-319-13380-5.
14. Moatamedi M., Khawaja H. Finite element analysis. Boca Raton: CRC Press, 2018. 162 p. DOI: 10.1201/9780429453076.
15. Lee S.W., Chung P.W. Finite element method for solids and structures: a concise approach. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. 366 p. DOI: 10.1017/9781108683982.
16. Boki I.B., Zoteev O.V., Pul V.V., Pul E.K. Selection of basic data for numerical modeling of rock mass stress state at Mirny Mining and Processing Works, Alrosa Group of Companies // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 134. P. 012008. DOI: 10.1088/1755-1315/134/1/012008.
17. Szabó B., Babuška I. Finite element analysis: method, verification and validation. Hoboken: John Wiley & Sons, 2021. 366 p. DOI: 10.1002/9781119426479.
18. Неганов В.П., Коваленко В.И., Зайцев Б.М., Казаченко Ю.А., Сосновский Л.И., Томилов В.Д. [и др.]. Технология разработки золоторудных месторождений / под ред. В.П. Неганова. М.: Недра, 1995. 336 с.
19. Pryalukhin A.F., Martyshev N.V., Malozyomov B.V., Klyuev R.V., Filina O.A., Konyukhov V.Yu., et al. Improvement of operational reliability of units and elements of dump trucks taking into account the least reliable elements of the system // World Electric Vehicle Journal. 2024. Vol. 15. Iss. 8. P. 365. DOI: 10.3390/wevj15080365.
20. Павлов А.М. Совершенствование технологии подземной разработки жильных месторождений золота: монография. Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2013. 127 с.

References

1. Vlokh N.P. *Rock pressure management in underground mines*. Moscow: Nedra; 1994, 208 p. (In Russ.). EDN: RCJRTF.
2. Zubkov A.V. *Geomechanics and geotechnology*. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2001, 335 p. (In Russ.). EDN: RRVD0H.
3. Sosnovskaya E.L., Avdeev A.N. Peculiarities of initial stress fields in lode deposits in the permafrost zone. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2021;5-2:162-173. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_162. EDN: AKMMFO.
4. Filonyuk V.A., Kornakov V.V., Sosnovskaya E.L., Sosnovskiy L.I. Regularities in structural relationship of natural stress fields and anomalous concentrations of ore material within gold deposits. *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*. 2014;5:88-101. (In Russ.). EDN: ULNZUZ.
5. Avdeev A.N., Sosnovskaya E.L., Pavlov A.M. Justification of technological parameters for mining deep steeply dipping thin ore bodies. *Russian Mining Industry*. 2025;S5:85-91. (In Russ.). DOI: 10.30686/1609-9192-2025-S5-85-91. EDN: FWZMTE.
6. Moroz N.E., Sidorov D.V., Sonnov M.A. Complex geomechanical modeling of mining vein deposits of block structure. *Russian Mining Industry*. 2023;6:71-74. (In Russ.). DOI: 10.30686/1609-9192-2023-6-71-74. EDN: DYJMSL.
7. Sentyabov S.V., Karamnov D.V. Methods for determining the initial stresses of the rock massif by in-situ measurements. *Problems of Subsoil Use*. 2023;1:54-63. (In Russ.). DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.054. EDN: WXMOYW.
8. Sosnovskaya E.L., Avdeev A.N. Prediction of impact hazard in the development of low- and medium-power cores by systems with a bookmark at great depths. *News of the Tula State University. Sciences of Earth*. 2024;2:471-483. (In Russ.). EDN: GCVIMO.
9. Sentiabov S.V. Rock pressure management during deep deposit development. *Minerals and Mining Engineering*. 2023;2:62-73. (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-62-73. EDN: SVBWUC.
10. Trofimov A.V., Kirkin A.P., Kormnov A.A., Shutov A.A. Study of the stress-strain state of Oktyabrskoe and Talnakhskoe deposits' rock mass by overcoring method. *Tsvetnye Metally*. 2024;10:31-39. (In Russ.). DOI: 10.17580/tsm.2024.10.05. EDN: HGLBOI.
11. Aynbinder I.I., Ovcharenko O.V. Potential rockburst hazard research at the project mining depth at the Valunistoe deposit. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2022;6:35-45. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_35. EDN: GUMUMK.
12. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Fox D.D. *The finite element method for solid and structural mechanics*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2013, 672 p.
13. Rust W. *Non-linear finite element analysis in structural mechanics*. Cham: Springer; 2015, 363 p. DOI: 10.1007/978-3-319-13380-5.
14. Moatamedi M., Khawaja H. *Finite element analysis*. Boca Raton: CRC Press; 2018, 162 p. DOI: 10.1201/9780429453076.
15. Lee S.W., Chung P.W. *Finite element method for solids and structures: a concise approach*. Cambridge: Cambridge University Press; 2021, 366 p. DOI: 10.1017/9781108683982.
16. Boki I.B., Zoteev O.V., Pul V.V., Pul E.K. Selection of basic data for numerical modeling of rock mass stress state at Mirny Mining and Processing Works, Alrosa Group of Companies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018;134:012008. DOI: 10.1088/1755-1315/134/1/012008.



17. Szabó B., Babuška I. *Finite element analysis: method, verification and validation*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2021, 366 p. DOI: 10.1002/9781119426479.
18. Neganov V.P., Kovalenko V.I., Zaitsev B.M., Kazachenko Yu.A., Sosnovsky L.I., Tomilov V.D., et al. *Technology of development of gold deposits*. Moscow: Nedra; 1995, 336 p. (In Russ.).
19. Pryalukhin A.F., Martyushev N.V., Malozyomov B.V., Klyuev R.V., Filina O.A., Konyukhov V.Yu., et al. Improvement of operational reliability of units and elements of dump trucks taking into account the least reliable elements of the system. *World Electric Vehicle Journal*. 2024;15(8):365. DOI: 10.3390/wevj15080365.
20. Pavlov A.M. *Improving underground mining technology for vein gold deposits*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2013, 127 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Павлов Александр Митрофанович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
go_gor@estu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-6239-7005>
Aleksandr M. Pavlov,
D.Sc. in Engineering,
Professor of the Department of Mineral Deposits Development,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
go_gor@estu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-6239-7005>



Болотнев Александр Юрьевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
abolotnev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4250-6216>
Aleksandr Yu. Bolotnev,
Ph.D. in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Mineral Deposits Development,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
abolotnev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4250-6216>



Олзоев Борис Николаевич,
кандидат географических наук, доцент,
доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
✉ bnozoev@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7105-6341>
Boris N. Olzoev,
Ph.D. in Geography, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Mine Surveying and Geodesy,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
✉ bnozoev@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7105-6341>

**Вклад авторов / Contribution of the authors**

А.М. Павлов – научное руководство, курирование данных, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

А.Ю. Болотнев – разработка концепции, разработка методологии, проведение исследования.

Б.Н. Олзоев – разработка концепции, написание черновика рукописи.

Aleksandr M. Pavlov – supervision, data curation, writing – original draft, writing – editing.

Aleksandr Yu. Bolotnev – conceptualization, methodology, investigation.

Boris N. Olzoev – conceptualization, writing – original draft.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 10.07.2026; одобрена после рецензирования 22.07.2026; принята к публикации 29.07.2026.

The article was submitted 10.07.2026; approved after reviewing 22.07.2026; accepted for publication 29.07.2026.