ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(1):84-96
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.831 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_84

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЯЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РАЗРАБОТКИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ОСВОЕНИЯ ПОДКАРЬЕРНЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

М.И. Потапчук[1], И.Ю. Рассказов[2], А.В. Сидляр[1], М.А. Ломов[1], М.И. Рассказов[1]

[1] Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН,
Хабаровск, Россия, e-mail: potapchuk-igd@mail.ru
[2] Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия

Аннотация: В последние годы во многих горнодобывающих районах в условиях непрерывного повышения трудоемкости и увеличения себестоимости добычи полезных ископаемых прослеживается тенденция усложнения условий освоения месторождений по мере истощения запасов, расположенных на небольших глубинах и в неблагоприятной горно-геологической обстановке. Особенно это касается изменения геомеханического и геодинамического состояния разрабатываемого массива горных пород и прилегающих участков земной коры, где в результате горных работ могут инициироваться динамические проявления горного давления, существенно влияющие на безопасность горных работ и их экономические показатели. Для снижения затрат и увеличения производительности добычи рудных месторождений возникает необходимость внесения корректировок в схемы вскрытия и технологические решения по их разработке. Так, на золоторудных месторождениях «Пионер» и «Маломыр», где перспективы дальнейшего освоения связаны с переходом на подземный способ отработки, и были предложены различные вариации камерной системы разработки, была выполнена комплексная оценка напряженно-деформированного состояния в районе очистных блоков и в конструктивных элементах систем разработки с выделением зон повышенных напряжений для обеспечения геодинамической безопасности на объектах. Результаты исследования показали, что в условиях значительной глубины разработки на участке «Кварцитовом» применение камерной системы разработки при мощности рудного тела до 4,5 м может привести к разрушению краевой части массива рудного подэтажа при отработке более 50% объема очистного блока, на участках рудной залежи «Андреевская» и СВ-Бахмута в условиях меньшей глубины отработки все элементы горных конструкций сохранят свою устойчивость на всех этапах отработки.

Ключевые слова: золоторудное месторождение, горный массив, геодинамика, карьерная выемка, система разработки, вмещающий массив, устойчивость, геомеханическая безопасность.

Благодарность: Исследования проведены 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.

Для цитирования: *Потапчук М. И., Рассказов И. Ю., Сидляр А. В., Ломов М. А., Рассказов М. И.* Геомеханическая оценка применяемых технологий разработки для обеспечения безопасных условий освоения подкарьерных рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 1. – С. 84–96. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_84.

© М.И. Потапчук, И.Ю. Рассказов, А.В. Сидляр, М.А. Ломов, М.И. Рассказов. 2022.

Geomechanical assessment of safe technologies for underground mining beneath open pit mines

M.I. Potapchuk[1], I.Yu. Rasskazov[2], A.V. Sidlyar[1], M.A. Lomov[1], M.I. Rasskazov[1]

[1] Mining Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia, e-mail: potapchuk-igd@mail.ru

[2] Khabarovsk Federal Research Center of Far Eastern branch of Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

Abstract: In many mineral mining regions, against the background of persistently elevating labor and money input, there is a trend of complication of mining conditions and depletion of ore reserves at shallow depths and in unfavorable geological conditions. Specific emphasis is laid on the geomechanics and geodynamics in the earth crust areas susceptible to dynamic events induced by confining pressure, which greatly affect mining safety and economic performance. The cost reduction and productivity boosting in ore mining requires adjustment of accessing and extraction flow charts. In this regard, at gold-bearing deposits Pioner and Malomyr which are intended for further operation with transition to underground mining using various room-and-pillar systems proposed, the integrated stress–strain behavior assessment was implemented in the mine and adjacent rock mass with identification of increased stress concentrations zones toward improved geodynamic safety of mining. The studies show that at the great depth of Quartzite Site, given the ore body thickness up to 4.5 m, the use of the room-and-pillar mining system can result in failure of the edge area of rock mass after extraction of 50% of ore reserves from a sublevel stoping block, while in Andreevskaya and SV-Bakhmut Sites at a shallower depth, all mine structures preserve stability at all stages of mining.

Key words: gold-bearing ore deposit, rock mass, geodynamics, open pit mining, mining system, enclosing rock mass, stability, geomechanical safety.

Acknowledgements: The study was assisted by the Shared-Use Center for Scientific Data Processing and Storage, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, and supported by the Ministry of Science and Education of Russia, Agreement No. 075-15-2021-663.

For citation: Potapchuk M. I., Rasskazov I. Yu., Sidlyar A. V., Lomov M. A., Rasskazov M. I. Geomechanical assessment of safe technologies for underground mining beneath open pit mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(1):84-96. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_84.

Введение

В России в последние десятилетия непрерывно повышаются трудоемкость и себестоимость добычи многих видов минерального сырья, расход всех видов ресурсов [1]. Для снижения затрат и увеличения производительности добычи создаются и совершенствуются уже имеющиеся системы разработки месторождений. Выбор системы разработки целесообразно производить методом исключения с учетом возможности применения на данном месторождении в зависимости от свойств руд и пород, особенностей залегания полезных ископаемых, а также обеспечения наиболее высоких технико-экономических показателей [2]. Но при этом большое внимание необходимо уделять обеспечению безопасных условий освоения месторождения посредством геомеханической оценки предлагаемых систем

разработки с позиции удароопасности [3, 4].

В Дальневосточном регионе столкнулись с необходимостью перевода значительной части золоторудных месторождений с открытого на подземный способ разработки. Характерной особенностью комбинированного способа разработки является наличие карьерного и подземного очистных пространств, находящихся в непосредственной близости относительно друг друга. Благодаря практике и анализу отработки месторождений таким способом становятся очевидными определенные геомеханические проблемы выбора технологических схем и параметров разработки. Это связано с тем, что выемка полезного ископаемого открытым способом оказывает значительное геомеханическое воздействие на подземные горные выработки, и наоборот [5 — 8]. Кроме этого, под дном карьера и в прибортовой его части формируются охранные целики, испытывающие значительные нагрузки и повышающие риск проявлений горного давления в динамической форме.

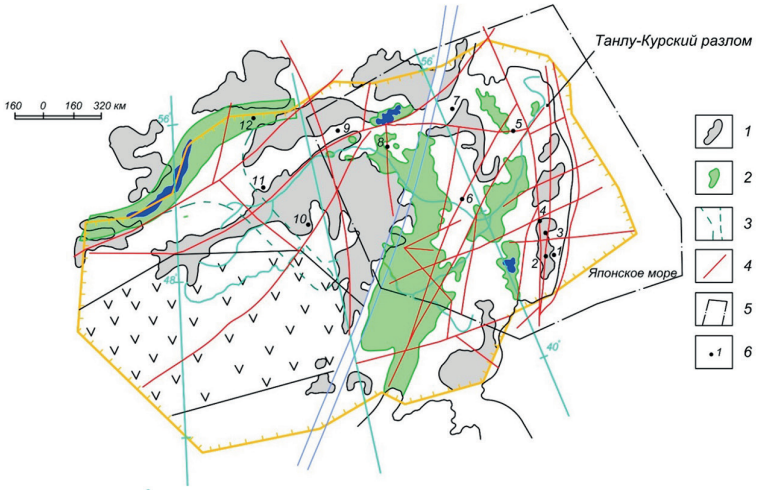
К золоторудным месторождениям, где перспективы дальнейшего освоения связаны с переходом на подземный способ относятся «Пионер» и «Маломыр», расположенные на территории Амурской области. К настоящему времени верхняя часть месторождения «Пионер» в значительной степени отработана карьерами, глубинную часть, включая рудные залежи «Андреевская», «Николаевская», а также «Бахмут-2», «Бахмут-3» рудной залежи «СВ-Бахмут», планируется разрабатывать подземным способом. На месторождении «Маломыр» в 2010 г. были начаты открытие горные работы, в 2016 г. приступили к геологоразведочным работам для подземного освоения в районе участка «Кварцитового». В различных горно-геологических и геомеханических условиях планируемых разработок были предложены различные вариации систем разработки, что в свою очередь потребовало дополнительных специализированых исследований для снижения возможного геодинамического риска.

Методы исследования

Исследования и оценка изменения напряженно-деформированного состояния горного массива и элементов горных конструкций выполнялись с использованием метода конечных элементов, широко применяемого для решения различных геомеханических задач [9, 10]. Моделирование проводили в объемной постановке задач с использованием современного автоматизированного программного комплекса FEM [11]. Численные конечно-элементные модели были разработаны с учетом геологического строения рудо-породного массива и конфигурации выработанных пространств, формируемых в условиях применения различных систем разработки. Это позволило с наибольшей достоверностью определить пространственное расположение и параметры формируемых в процессе отработки рудных блоков потенциально удароопасных зон [12].

При обосновании граничных условий были использованы результаты комплексных исследований, включающие анализ геодинамической позиции месторождений (рис. 1), оценку напряженного состояния, уточнение физико-механических свойств пород, слагающих массив (таблица), позволяющие наиболее корректно смоделировать возникающие в процессе отработки геомеханические процессы в массиве.

Согласно схеме современного напряженно-деформированного состояния верхней части земной коры Амурской плиты [13], месторождения «Маломырское» и «Пионер» располагаются в об-



1 – области интенсивного современного сжатия верхней части земной коры (прогнозируемая интенсивность более 50 МПа), проявленные в материалах радарной спутниковой съемки в виде повышенной плотности мини-мальных линеаментов рельефа земной поверхности (штрихов); 2 – основные мезо-кайнозойские и современные рифтогенные системы (сдвиговый континентальный рифтогенез); 3 – контур зарождающейся зоны растяжения, интерпретируемой как эшелонированная лестничная структура растяжения в верхней части Байкальского тектонического потока (по Саксину 2015 г.); 4 – преимущественно межблоковые неотектонические разломы; 5 – контур схемы новейших структур и активных разломов (ИТиГ ДВО РАН, 2011 г.); 6 – рудные месторождения, опасные и склонные к горным ударам: 1 – «Николаевское», 2 – «Южное», 3 – «Забытое», 4 – «Восток-2», 5 – «Перевальное», 6 – «Хинганское», 7 – «Маломырское», 8 – «Пионер», 9 – «Березитовое», 10 – «Антей», 11 – «Дарасун», 12 – «Ирокин-Динское»

Рис. 1. Обзорная информационная модель, отражающая современное напряженно-деформированное состояние приповерхностной части земной коры Амурской литосферной плиты

Fig. 1. General information model of modern stress–strain behavior in shallow lithosphere of Amur Plate

Основные свойства горных пород, используемые в моделировании при оценке удароопасности конструктивных элементов применяемых систем разработки на месторождениях «Пионер» и «Маломыр»

Properties of rocks in modeling rockburst hazard in structural elements of mining systems at Pioner and Malomyr Deposits

Наименование пород	Плотность, кг/м^3	Модуль деформации, МПа	Коэффициент Пуассона	Прочность на растяжение, МПа	Угол внутреннего трения, град	Сцепление, МПа
Месторождение «Маломыр»						
Кварц-биотитовые сланцы с полевым шпатом	2677	37 610	0,2	1,9	40	15
Разрушенная вмещающая порода	2677	376	0,45	0	10	0,5
Тонкозернистые массивные и полосчатые березиты (руда)	2691	49 770	0,18	3,2	41	11,5
Месторождение «Пионер», рудная зона «Андреевская»						
Гранит-порфиры	2623	44 310	0,16	5,93	36	9,5
Песчаники с прослоями алевролитов	2644	21 890	0,21	2,07	40	4,85
Рудные тела	2700	3000	0,2	5	39,8	4,5

ласти с относительно тектонически нарушенной земной поверхностью, где прогнозируемые сжимающие напряжения могут варьировать от 10 до 50 МПа. Кроме этого, учитывая, что «Маломырское» месторождение находится в гористой местности (Селемджинский хребет), его структурную позицию и расположенность в узком промежутке между двумя крупными областями сжимающих напряжений, последние здесь могут достигать верхнего из указанных пределов.

Используя материалы изучения геомеханических особенностей пород и руд месторождений «Хинганское» и «Березитовое», которые размещены в такой же зоне, вероятное соотношение главных напряжений на месторождениях ожидаются следующими — $\sigma_1:\sigma_2:\sigma_3$ = = 2,0:1:1. С другой стороны, согласно карте «Современная геодинамика Азии» [14], район месторождения попадает в область современного сжатия со сдвигом. Область имеет отчетливую северо-западную вытянутость и, по мнению авторов, характеризуется следующим соотношением главных напряжений: $\sigma_x >> \sigma_y = \sigma_z$. Но тем не менее необходимы будут уточнения в процессе дальнейших исследований.

При задании нагрузок по границам конечно-элементных моделей были использованы результаты экспериментальной оценки параметров напряженного состояния массива с использованием акустико-эмиссионного эффекта памяти. Установлено, что в верхней части месторождений действует гравитационное поле напряжений, в котором вертикальные и горизонтальные компоненты тензора напряжений зависят от глубины и плотности горных пород. Начальные напряжения являются функцией одной вертикальной координаты. Горизонтальные напряжения отличаются от вертикальных на величину бокового распора [15—17]. В массиве нижней части месторождений поле напряжений будет усложняться за счет действия тектонических сил, в котором преобладают горизонтальные сжимающие напряжения, наибольшее из них ориентировано в направлении ЮЗ3 и в 2,0 раза превышает гравитационную составляющую от веса налегающей толщи пород.

Физико-механические свойства литологических разностей, слагающих прибортовой и подземный горный массив, были получены в результате лабораторных исследований, выполненных силами ООО НПГФ «Регис» и ИГД ДВО РАН, и приведены в таблице.

Результаты расчетов представляются в виде изолиний средних нормальных напряжений и интенсивности касательных напряжений при объемной постановке задачи, а также первых главных нормальных напряжений и нормальных напряжений в проекции на оси *X*, *Y*, *Z*.

Особенности применяемых технологий разработки месторождений и схемы для расчета

Исходя из горно-геологических условий и особенностей залегания рудных тел на исследуемых объектах на рудных зонах месторождения «Пионер» и «Кварцитовом» участке месторождения «Маломыр» рассматривается целесообразность применения в качестве основной камерной системы разработки по простиранию рудного тела в восходящем порядке отработки, которая широко применяется на многих месторождения и параметры которой подробно описаны в источнике [18].

На участке «Кварцитовом» горизонтальная мощность рудного тела в среднем не превышает 4,0 м, схема камерной системы разработки стандартная, и суть ее заключается в отработке рудных тел подэтажами с отбойкой руды рядами

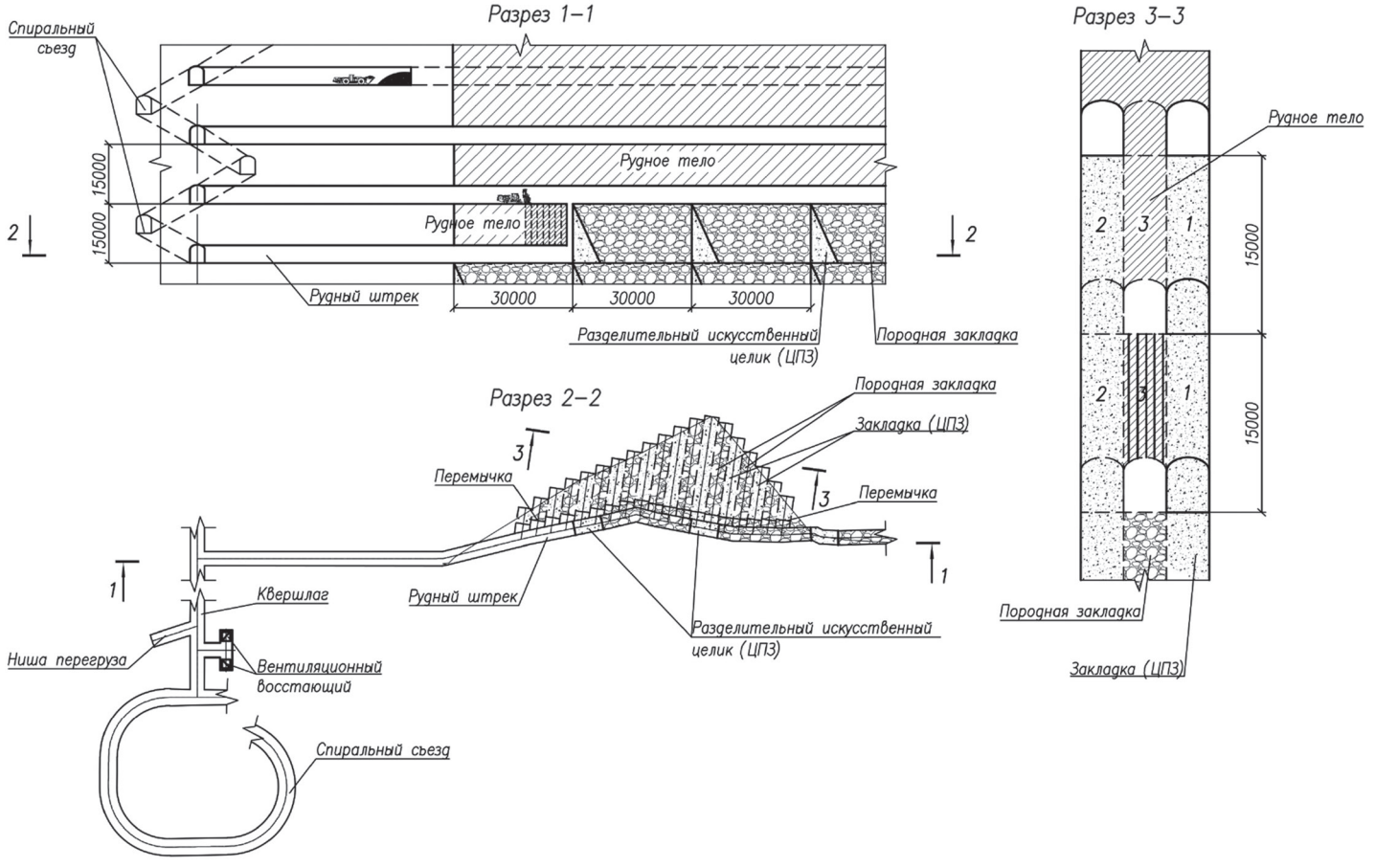


Рис. 2. Система разработки с камерами вкрест простирания рудного тела при мощности более 7,2 м в районе участка «Бахмут-2» месторождения «Пионер». Цифрами на разрезе 2 — 2 указана очередность отработки камер

Fig. 2. Room-and-pillar mining across the strike of ore body more than 7.2 m thick at Bakhmut 2 Site of Pioner Deposit. Figures in Section 2–2 mark the sequence of mining

скважин и последующей полной закладкой выработанного пространства. Из полевых подэтажных штреков (верхнего и нижнего) проходятся два подэтажных орта, а затем между ними — рудные подэтажные штреки.

Имеющиеся особенности горно-геологических условий при отработке подкарьерных рудных запасов в районе участка «СВ-Бахмут» предопредили внесение корректировок основных параметров системы разработки. Так, в случае горизонтальной мощности рудного тела в пределах от 3,6 — 7,2 м отработка очистной камеры производится по простиранию, но при этом камера разделяется на две очереди и отрабатывается прямым порядком, начиная с лежачего бока рудного тела. Первая очередь отрабатывается с твердеющей закладкой, вторая — с сухой. Порядок отработки вторичных очередей в подэтажах принят с отставанием от первых на подэтаж, то есть отработка второй очереди в данном подэтаже начинается тогда, когда заложена первая в вышележащем подэтаже. Закладочные работы ведутся последовательно, без совмещения операций. После формирования камеры длиной по простиранию менее 30 м, производится ее закладка в 2 стадии. В первую стадию формируется треугольник из цементно-породной закладки (ЦПЗ), который предотвращает вывал сухой породной закладки за границы секции. Затем сухой закладкой заполняется остаточный объем отработанной камеры.

При мощности рудных тел более 7,2 м рассматривается применение камерной системы разработки с расположением камер вкрест простирания рудного тела. Порядок отработки в пределах рудного тела подробно представлен на рис. 2, вначале отрабатываются первичные камеры с ЦПЗ, затем вторичные камеры с породной закладкой (ПЗ). В последнюю очередь отрабатывается камера рудного штрека. При отработке камер вкрест простирания, так как длина камер не превышает величины предельного пролета, формирование искусственного целика не требуется.

Выемка подкарьерных запасов руды, осуществляется в две очереди по камерно-целиковой схеме. Отставание первой очереди от второй в пространстве по вертикали составляет один подэтаж. Выработанное пространство камер первой очереди закладывается твердеющей породной закладкой, второй очереди — породой. Расположение камер — вкрест простирания рудной зоны.

Результаты

Моделирование напряженно-деформированного состояния массива на участке «Кварцитовом» (месторождение «Маломыр») в условиях применения камерной системы разработки выполнялось в 7 этапов последовательной отработки рудных запасов. Результаты моделирования показали, что до начала очистной выемки после прохождения горно-подготовительных выработок, подэтажных штреков напряжения распределяются равномерно в массиве подэтажей, значения их не высоки, и максимальные сжимающие напряжения составляют 21 МПа. Уровень среднего давления и интенсивности касательных напряжений составляет соответственно 20 и 9,5 МПа. Отработка части нижнего подэтажа приводит к росту напряжений в кровле формирующейся камеры. Напряжения при этом возрастают до 32 МПа.

На третьем этапе при отработке двух нижних подэтажей уровень максимальных напряжений возрастает в 2,5 раза от исходных. На рис. 3 представлена картина распределения первых главных напряжений, на которой видно, что области повышенных напряжений формируются в краевой части рудного массива подэтажа, планируемого к даль-

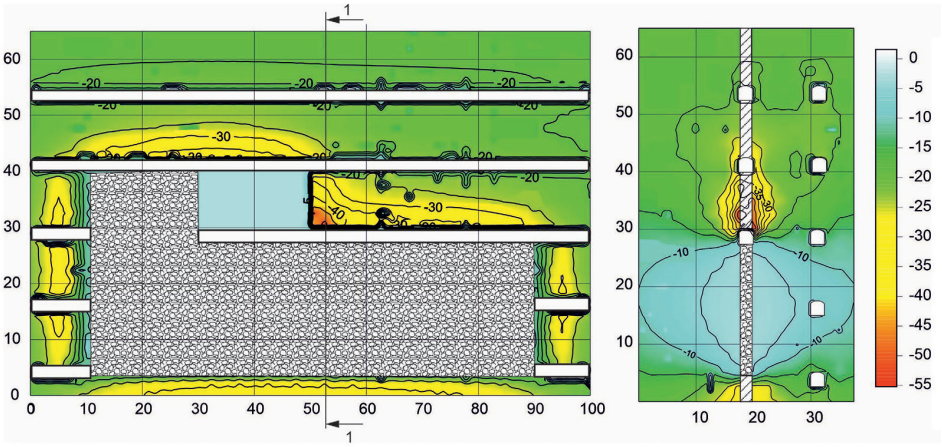


Рис. 3. Распределение первых главных напряжений σ_1 в массиве горных пород в проекции на вертикальную плоскость рудного тела и в разрезе 1 — 1 на третьем этапе отработки блока

Fig. 3. Distribution of principal stresses σ_1 in rock mass in projection to vertical plane of ore body and in Section 1–1 at mining stage 2 in extraction block

нейшей отработке (σ_1 = 55 МПа, $\tau_{инт}$ = = 20 МПа), в массиве над выработанным пространством и в межблочных целиках (σ_1 = 35 МПа, $\tau_{инт}$ = 16 МПа).

Дальнейшая очистная выемка верхних подэтажей приводит к перераспределению напряжений. В краевой части рудного массива верхнего подэтажа наблюдается рост напряжений, величина максимальных сжимающих напряжений достигает σ_1 = 65 МПа, интенсивности касательных до $\tau_{инт}$ = 23 МПа, в массиве межблочных целиков σ_1 = 35 МПа и $\tau_{инт}$ = 16 МПа соответственно (рис. 4). Полная отработка очистного блока с применением камерной системы разработки приводит к разгрузке окружающего массива вдоль отработанного рудного тела, заложенного закладкой, но при этом выделяются незначитель-

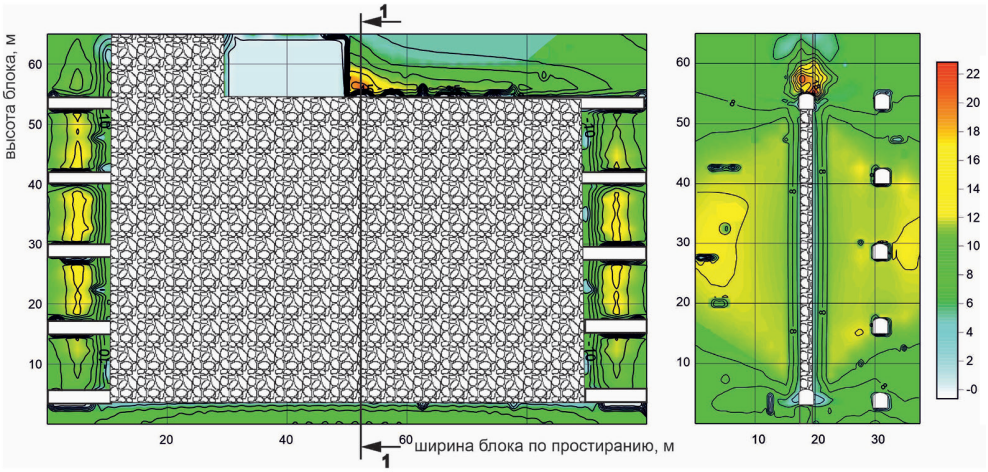


Рис. 4. Распределение первых главных напряжений σ_1 в массиве горных пород в проекции на вертикальную плоскость рудного тела и в разрезе 1 — 1 на четвертом этапе отработки блока

Fig. 4. Distribution of principal stresses σ_1 in rock mass in projection to vertical plane of ore body and in Section 1–1 at mining stage 4 in extraction block

ные зоны повышенных напряжений в междукамерных целиках, значения максимальных сжимающих напряжений не превышают 40 МПа. Уровень среднего давления и интенсивности касательных напряжений составляет соответственно 22 и 15 МПа.

Камерная система разработки с расположением камер вкрест простирания рудного тела в районе участка «Бахмут-2» (месторождение «Пионер»)

Как было описано выше, часть рудных запасов, прилегающих ко дну ка-

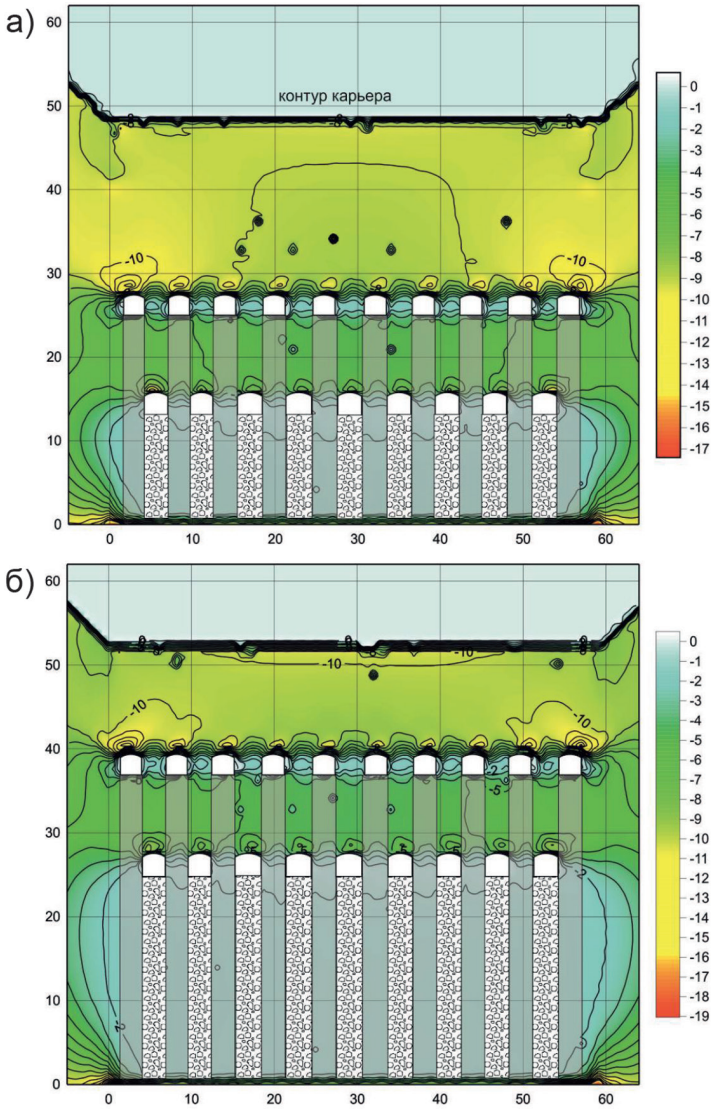


Рис. 5. Распределение максимальных сжимающих напряжений в массиве горных пород в условиях применения камерной системы разработки с расположением камер вкрест простирания рудного тела при мощности предохранительного целика верхнего подэтажа: 20 м (а); 12 м (б)

Fig. 5. Distribution of maximum compression stresses in rock mass during room-and-pillar mining across the strike of the ore body at the upper sublevel crown pillar thickness of: 20 m (a); 12 m (b)

рьера, предусматривается отрабатывать с применением камерной системы разработки вкрест простирания камеры, но при этом технология закладочных работ не позволяет произвести полную закладку камер под кровлю, чтобы передать нагрузку от целика непосредственно на искусственные целики. В то же время, пролет обнажения целика, так же, как и пролет кровли камеры, исходя из физико-механических свойств массива руды, не может превышать 5 м. Поэтому кровли камер верхнего и нижнего подэтажа должны быть на разных уровнях.

Для оценки геотехнического состояния подкарьерного целика было выполнено объемное моделирование различных вариантов отработки с изменением мощности верхнего целика от 10 до 20 м с шагом 5 м с учетом карьерной выемки.

Результаты моделирования показали, что чередование породной и твердеющей породной закладки приводят к формированию концентраций напряжений в кровле подъездных выработок верхнего подэтажа, а также к зонам разгрузки между этими же выработками.

Как видно из рис. 5, в случае расположения камер вкрест простирания рудного тела в подкарьерной части массива и достижения целиков между дном карьера и камерами первой очереди 12 м, а камерами второй очереди 22 м, максимальные сжимающие напряжения и интенсивность касательных напряжений не превышает 19 и 6 МПа соответственно, и указывают на обеспечение достаточной устойчивости горных конструкций в условиях предлагаемой системы разработки, и разрушений в динамической форме не прогнозируется.

Оценка устойчивости основных элементов горных конструкций предлагаемых систем разработки была выполнена по критериям хрупкого и сдвигового разрушения [19, 20].

Хрупкое разрушение обусловлено превышением максимальных прочностных характеристик пород в массиве, сдвиговое характеризуется превышением касательных напряжений сил сцепления и трения.

Заключение

В результате было установлено, что на участке «Кварцитовом» возможно разрушение краевой части массива рудного подэтажа уже на промежуточном этапе отработки (до 50% очистного блока) по критерию хрупкого разрушения, на участке же рудной зоны «Андреевская» в условиях меньшей глубины отработки все элементы горных конструкций сохранят свою устойчивость на всех этапах отработки.

Применение камерной системы разработки по простиранию рудного тела в условиях «СВ-Бахмута» (при мощности рудных тел 3,6—7,2 м) также не приводит к значительным концентрациям напряжений на отдельных ее участках, в связи с этим потенциально удароопасных ситуаций не прогнозируется.

Результаты исследования геотехнических и деформационных процессов, формирующихся в районе очистной выемки рудных подкарьерных запасов участка «Бахмут-2» при мощности рудных тел более 7,2 м, показали, что применение предложенной технологии и порядка отработки также обеспечивает достаточную устойчивость всех элементов горных конструкций.

По результатам проведенных исследований были разработаны рекомендации по рациональному порядку и очередности отработки рудных тел, эффективным способам охраны и поддержания горных выработок, а также обоснованы параметры целиков и других конструктивных элементов системы разработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Саканцев Г. Г.* Ресурсосберегающие технологии при разработке рудных месторождений с использованием выработанного пространства // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 2. — С. 29–37.

2. *Голик В. И.* Подземная разработка месторождений. — М., 2014.

3. *Кожаев Ж. Т.*, *Сарыбаев О. А.*, *Байгурин Ж. Д.*, *Тусупова Б. Х.* Анализ состояния горного массива при комбинированной отработке золоторудного месторождения // Известия научно-технического общества «КАХАК». — 2011. — № 3(33). — С. 76—78.

4. *Рассказов И. Ю.*, *Потапчук М. И.*, *Курсакин Г. А.*, *Болотин Ю. И.*, *Сидляр А. В.*, *Рассказов М. И.* Прогнозная оценка удароопасности массива горных пород при отработке глубоких горизонтов Николаевского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — № 4. — С. 96—102.

5. *Семенова И. Э.*, *Аветисян И. М.* Оценка параметров взаимного влияния открытых и подземных горных работ в сложных геомеханических условиях // Горный журнал. — 2021. — № 1. — С. 58—63. DOI: 10.17580/gzh.2021.01.10.

6. *Kaizong Xia, Congxin Chen, Hua Fu, Yucong Pan, Yangyang Deng* Mining-induced ground deformation in tectonic stress metal mines. A case study // Engineering Geology. 2016, vol. 210, pp. 212—230.

7. *Flores G., Catalan A.* A transition from a large open pit into a novel «macroblock variant» block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile // Journal of Bock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019, vol. 11, no. 3, pp. 549—561.

8. *Мажитов А. М.*, *Корнеев С. А.*, *Бондарь Е. А.*, *Шаронова А. А.* Оценка напряженно-деформированного состояния массива при отработке запасов в техногенно-осложненных условиях // Актуальные проблемы горного дела. — 2017. — № 2(4). — С. 19—26.

9. *Клованич С. Ф.* Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики. — Запорожье, 2009. — 400 с.

10. *Зотеев О. В.* Моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород численными методами // Известия вузов. Горный журнал. — 2003. — № 5. — С. 108—115.

11. *Lisjak A., Mahabadi O. K., He L. Tatone B., Kaifosh P., Haque S. A., Grasselli G.* Acceleration of a 2D/3D finite-discrete element code for geomechanical simulations using General Purpose GPU computing // Computers and Geotechnics. 2018, vol. 100, pp. 84—96.

12. *Рассказов И. Ю.*, *Потапчук М. И.*, *Осадчий С. П.*, *Потапчук Г. М.* Геомеханическая оценка применяемых технологий разработки удароопасных месторождений ОАО «ГМК «Дальполиметалл» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 7. — С. 137—145.

13. *Саксин Б. Г.*, *Рассказов И. Ю. Шевченко Б. Ф.* Принципы комплексного изучения современного напряженно-деформированного состояния верхних уровней земной коры Амурской литосферной плиты // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2015. — № 2. — С. 53—62.

14. *Леви К. Г.*, *Шерман С. И.*, *Саньков В. А.*, *Лунина О. В.*, *Лухнев А. В.* Карта современной геодинамики Азии. Масштаб 1:5 000 000. — Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007.

15. *Kaiser J.* Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Gerauschen bei Zugbeanspruchimg von metallischen Werkstoffen // Archiv fur das Eisenhuttenwesen. 1953, vol. 24, no. 1/2, pp. 43—45.

16. *Yoshikawa S., Mogi K.* A new method for estimation of the crustal stress from cored rock samples: laboratory study in the case of uniaxial compression // Tectonophysics. 1981, vol. 74, no. 3/4, pp. 323—339.

17. *Ямщиков В. С.*, *Шкуратник В. Л.*, *Лыков К. Г.* Измерение напряжений в массиве горных пород на основе эмиссионных эффектов памяти // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 1990. — № 2. — С. 23—28.

18. *Кологривко А. А.* Подземные горные работы: учебное пособие. — Минск: БНТУ, 2006. — 94 с.

19. *Макаров А. Б.*, *Рассказов И. Ю.*, *Саксин Б. Г.*, *Ливинский И. С.*, *Потапчук М. И.* Геомеханическое обоснование параметров камерной системы разработки при переходе на подземный способ добычи руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2016. — № 3. — С. 27—38.

20. *Фрейдин А. М.*, *Неверов С. А.*, *Неверов А. А.*, *Филиппов П. А.* Устойчивость горных выработок при системах подэтажного обрушения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2008. — № 1. — С. 90—100. ГИАБ

REFERENCES

1. Sakantsev G. G. Resource-saving technologies in the development of ore deposits using the developed space. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 2, pp. 29–37. [In Russ].

2. Golik V. I. *Podzemnaya razrabotka mestorozhdeniy* [Underground development of deposits], Moscow, 2014.

3. Kozhaev Zh. T., Sarybaev O. A., Baigurin Zh. D., Tusupova B. Kh. Analysis of the state of the mountain massif during combined mining of a gold deposit. *Izvestiya nauchno-tekhnicheskogo obshchestva «KAKhAK»*. 2011, no. 3(33), pp. 76—78. [In Russ].

4. Rasskazov I. Yu., Potapchuk M. I., Kursakin G. A., Bolotin Yu. I., Sidlyar A. V., Rasskazov M. I. Prognostic assessment of rock massif burs — hazard during the deep horizon mining of Nikolaevskoe deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2012, no. 4, pp. 96—102. [In Russ].

5. Semenova I. E., Avetisyan I. M. Estimation of open-pit / underground mining cross-effect in complicated geomechanical conditions. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 1, pp. 58—63. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.01.10.

6. Kaizong Xia, Congxin Chen, Hua Fu, Yucong Pan, Yangyang Deng Mining-induced ground deformation in tectonic stress metal mines. A case study. *Engineering Geology*. 2016, vol. 210, pp. 212—230.

7. Flores G., Catalan A. A transition from a large open pit into a novel «macroblock variant» block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile. *Journal of Bock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019, vol. 11, no. 3, pp. 549—561.

8. Mazhitov A. M., Korneev S. A., Bondar E. A., Sharonova A. A. Stress-strain analysis of rock mass under mining In anthropogenically complicated conditions. *Aktualnye problemy gornogo dela*. 2017, no. 2(4), pp. 119—26. [In Russ].

9. Klovanich S. F. *Metod konechnykh elementov v nelineynykh zadachakh inzhenernoy mekhaniki* [Finite element method in nonlinear problems of engineering mechanics], Zaporozh'e, 2009, 400 p.

10. Zoteev O. V. Modeling of the stress-strain state of the rock mass by numerical methods. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2003, no. 5, pp. 108—115. [In Russ].

11. Lisjak A., Mahabadi O. K., He L. Tatone B., Kaifosh P., Haque S. A., Grasselli G. Acceleration of a 2D/3D finite-discrete element code for geomechanical simulations using General Purpose GPU computing. *Computers and Geotechnics*. 2018, vol. 100, pp. 84—96.

12. Rasskazov I. Yu., Potapchuk M. I., Osadchiy S. P., Potapchuk G. M. Geomechanical estimation of applied technologies of shock vulnerable deposits development of GMK «Dalpolimetal» Public Corporation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no. 7, pp. 137—145. [In Russ].

13. Saksin B. G., Rasskazov I. Yu. Shevchenko B. F. Principles of a comprehensive study of the modern stress-strain state of the upper levels of the Earth's crust of the Amur lithospheric plate. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2015, no. 2, pp. 53—62. [In Russ].

14. Levi K. G., Sherman S. I., San'kov V. A., Lunina O. V., Lukhnev A. V. *Karta sovremennoy geodinamiki Azii*. Masshtab 1:5 000 000 [Map of modern geodynamics of Asia. — Scale 1:5 000 000], Irkutsk: IZK SO RAN, 2007.

15. Kaiser J. Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Gerauschen bei Zugbeanspruchimg von metallischen Werkstoffen. *Archiv fur das Eisenhuttenwesen*. 1953, vol. 24, no. 1/2, pp. 43 — 45.

16. Yoshikawa S., Mogi K. A new method for estimation of the crustal stress from cored rock samples: laboratory study in the case of uniaxial compression. *Tectonophysics*. 1981, vol. 74, no. 3/4, pp. 323 — 339.

17. Yamshchikov V. S., Shkuratnik V. L., Lykov K. G. Measurement of stresses in the rock mass on the basis of the emission of the memory effects. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 1990, no. 2, pp. 23 — 28. [In Russ].

18. Kologrivko A. A. *Podzemnye gornye raboty*: uchebnoe posobie [Underground mining: Educational aid], Minsk, BNTU, 2006, 94 p.

19. Makarov A. B., Rasskazov I. Yu., Saksin B. G., Livinskiy I. S., Potapchuk M. I.Geomechanical substantiation of the parameters of the chamber system of development during the transition to the underground method of ore extraction. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2016, no. 3, pp. 27 — 38. [In Russ].

20. Freydin A. M., Neverov S. A., Neverov A. A., Filippov P. A. Stability of mining workings in systems of sub-storey collapse. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2008, no. 1, pp. 90 — 100. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Потапчук Марина Игоревна[1] — канд. техн. наук,
ведущий научный сотрудник, e-mail: potapchuk-igd@mail.ru,
Рассказов Игорь Юрьевич — член-корр. РАН, д-р техн. наук,
врио директора, Хабаровский Федеральный исследовательский центр
ДВО РАН, e-mail: adm@igd.khv.ru,
Сидляр Александр Владимирович[1] — научный сотрудник,
e-mail: sidlyar.alex@gmail.com,
Ломов Михаил Андреевич[1] — младший научный сотрудник,
e-mail: 9241515400@mail.ru,
Рассказов Максим Игоревич[1] — научный сотрудник,
e-mail: rasm.max@mail.ru,
[1] Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН.
Для контактов: Потапчук М.И., e-mail: potapchuk-igd@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.I. Potapchuk[1], Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher, e-mail: potapchuk-igd@mail.ru,
I.Yu. Rasskazov, Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member
of Russian Academy of Sciences, Acting Director,
Khabarovsk Federal Research Center of Far Eastern branch
of Russian Academy of Sciences, 680000, Khabarovsk, Russia,
e-mail: adm@igd.khv.ru,
A.V. Sidlyar[1], Researcher, e-mail: sidlyar.alex@gmail.com,
M.A. Lomov[1], Junior Researcher, e-mail: 9241515400@mail.ru,
M.I. Rasskazov[1], Researcher, e-mail: rasm.max@mail.ru,
[1] Mining Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
680000, Khabarovsk, Russia.
Corresponding author: M.I. Potapchuk, e-mail: potapchuk-igd@mail.ru.

Получена редакцией 01.04.2021; получена после рецензии 21.10.2021; принята к печати 10.12.2021.
Received by the editors 01.04.2021; received after the review 21.10.2021; accepted for printing 10.12.2021.