

УДК 622.831

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ПАРАМЕТРОВ КАМЕРНОЙ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ
ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА ПОДЗЕМНЫЙ СПОСОБ ДОБЫЧИ РУД**

**А. Б. Макаров¹, И. Ю. Рассказов², Б. Г. Саксин²,
И. С. Ливинский¹, М. И. Потапчук²**

¹*SRK Consulting (Russia) Ltd,
ул. Кузнецкий мост, д. 4/3, стр. 1, 125009, г. Москва, Россия*
²*Институт горного дела ДВО РАН, E-mail: rasskazov@igd.khv.ru,
ул. Тургенева, 51, 680000, г. Хабаровск, Россия*

Приведены результаты исследований по оценке геомеханических условий разработки Березитового золото-полиметаллического месторождения на стадии перехода с открытого на подземный способ добычи полезных ископаемых. Выполнено геодинамическое районирование и обоснованы параметры современного поля напряжений. С использованием рейтинговых показателей качества горных пород оценены их физико-механические свойства. Методами численного моделирования исследовано напряженное состояние массива горных пород на различных стадиях отработки месторождения и с использованием методики Мэтьюза и аналитических зависимостей обоснованы параметры системы разработки для выемки запасов подземной части Березитового месторождения.

Горно-геологические условия разработки, геодинамическое районирование, горные породы, напряженно-деформированное состояние, рейтинговые показатели, физико-механические свойства, математическое моделирование, параметры системы разработки

Для обоснования эффективных технологических решений при переходе с открытого на подземный способ добычи полезных ископаемых определяющее значение имеет оценка геомеханических условий разработки месторождений. Необходимо определить и учесть влияние карьерной выемки на состояние формирующихся подземных горных выработок и предохранительных целиков, оценить устойчивость бортов и дна карьера при отработке нижней части месторождения, обосновать порядок и параметры системы его подземной разработки [1 – 4].

К числу залежей, отработку которых планируется производить с применением открыто-подземного способа добычи, относится Березитовое золото-полиметаллическое месторождение, находящееся на территории Тындинского района Амурской области. Современная неотектоническая позиция месторождения определяется его расположением в северной части Забайкальского блока Амурской литосферной плиты на южных отрогах хребта Джелтулинский становик в непосредственной близости от ее сейсмически активной границы с Сибирской платформой. Березитовое является комплексным Au-Ag-Pb-Zn месторождением, представленным локализованной

среди раннепротерозойских порфиroidных гранодиоритов крупной зоной рудно-метасоматических пород кварц-серицитового состава, с включением различно ориентированных коротких кварцево-сульфидных прожилков мощностью от нескольких сантиметров до первых метров [5, 6]. В плане рудная зона имеет линзовидную форму, субмеридианальное простирание и крутое падение ($70-75^\circ$) в юго-западном направлении (рис. 1). Длина ее на поверхности достигает 950 м, мощность меняется от 10–15 до 110 м. Зона объединяет два крутопадающих воронкообразных тела, сопряженных вблизи земной поверхности и выклинивающихся с глубиной.

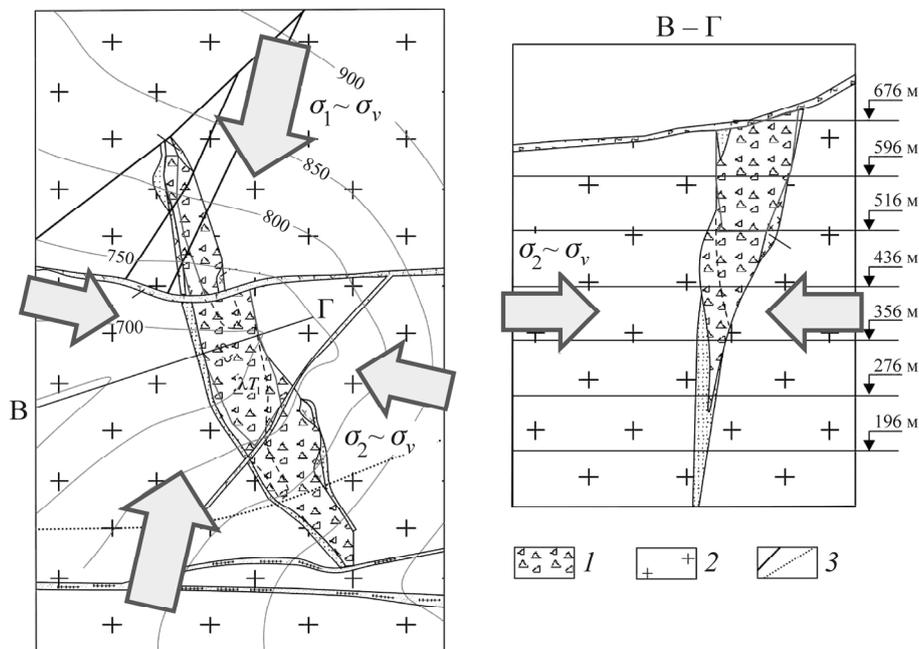


Рис. 1. Геологический план и разрез Березитового месторождения: 1 — взрывные рудные тела; 2 — гранодиориты; 3 — тектонические нарушения; σ_1 , σ_2 — горизонтальные компоненты природного поля напряжений; σ_v — литостатическое давление

Верхняя часть месторождения обрабатывается открытым способом до отметки +480 м (глубина от поверхности 350–400 м). Наиболее перспективным для подземной разработки является рудное тело мощностью до 30 м в южной части месторождения, залегающее в отметках +335... +240 м, с размерами: по падению — 90 м, по простиранию — 135 м.

Основные вмещающие породы — гранодиориты. По данным испытаний образцов их прочность при одноосном сжатии распределяется по нормальному закону со средним значением (с округлением) 160 МПа и стандартным отклонением 40 МПа (коэффициент вариации 25 %). Руды имеют более низкую прочность: 107–132 МПа. В дальнейших расчетах прочность руды при одноосном сжатии образцов принималась равной 110 МПа.

На стадии геологической разведки месторождения достаточно детально изучалась трещиноватость массива. В разведочных штольнях на горизонтах 676 и 596 м замерены элементы залегания 4752 трещин. Среди них доминируют крутопадающие трещины с углами падения $65-85^\circ$. На разных участках и горизонтах месторождения выделено по 4–6 систем трещин. Границы систем трещин весьма “размыты” (до 30°), но проявляется тенденция к объединению максимумов плотности и формированию структуры, связанной с конусообразной формой месторождения, локализованного в двух (северной и южной) воронках выброса (эксплозии), смыкающихся в центре.

На стадии открытых горных работ трещиноватость массива изучалась в карьерных откосах методом площадного картирования массива с помощью цифровой фотограмметрической съемки по технологии Sirovision. По стереопаре из двух цифровых фотоизображений одного и того же участка массива, полученного с различных ракурсов, получается детальное трехмерное изображение с привязкой к используемой на руднике системе координат. На рис. 2 приведено трехмерное изображение уступа в лежачем боку месторождения. В результате фотограмметрической съемки получены угловые (азимуты и углы падения) и линейные характеристики (длины трещин, расстояния между ними) структурных нарушений массива и параметры наблюдающихся на практике деформаций уступов. Данные о трещиноватости массива необходимы для дальнейших расчетов устойчивости уступов и бортов карьеров.

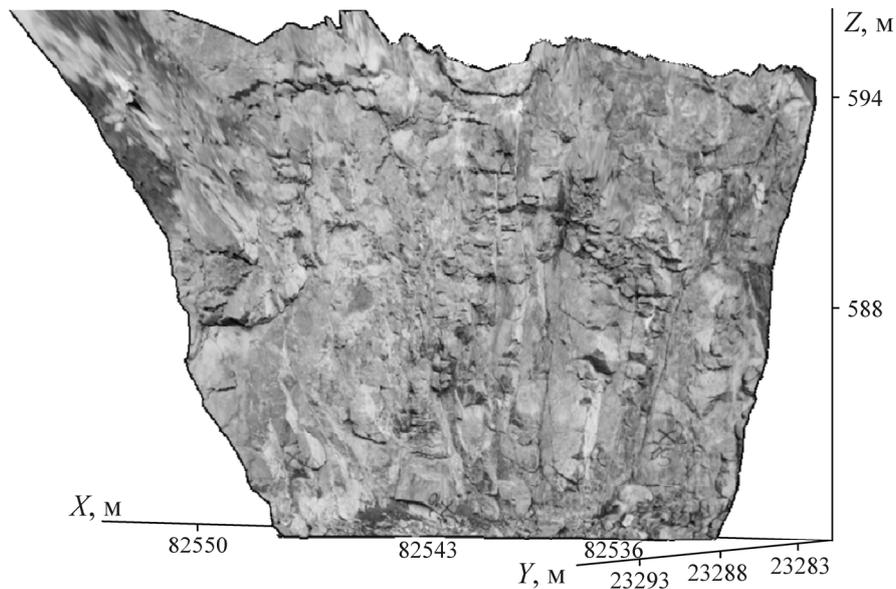


Рис. 2. Трехмерное изображение карьерного откоса, полученное цифровой стереофотограмметрической съемкой

Компьютерной обработкой стереопар фотографий бортов карьера зафиксировано 2223 структурных нарушения породного массива. Азимуты и углы падения трещин, полученные фотограмметрической съемкой, нанесены на стереографическую полярную диаграмму Шмидта. Результаты показывают, что в массиве присутствует шесть основных систем трещин (J1 – J6). В табл. 1. приведены средние значения элементов залегания систем трещин, их параметры, а также длины трещин и расстояния между ними при перцентилях 25, 50 и 75.

ТАБЛИЦА 1. Параметры систем трещин в массиве Берзитового месторождения

Система трещин	Угол падения, град	Азимут падения, град	Расстояние между трещинами, м				Длины трещин, м			
			25 %	50 %	75 %	Среднее	25 %	50 %	75 %	Среднее
J1	72	269	0.17	0.46	1.63	1.25	1.29	2.26	4.51	4.21
J2	70	360	0.31	0.75	1.99	1.42	1.53	2.95	5.44	5.12
J3	60	160	0.57	1.35	3.31	2.40	1.44	2.95	6.72	8.16
J4	88	306	0.20	0.45	1.52	1.29	1.24	2.03	3.58	3.20
J5	87	224	0.34	1.20	2.63	2.08	0.99	1.59	3.64	3.15
J6	49	34	0.92	2.17	4.13	2.91	1.60	3.43	7.14	10.33

Для заверки площадной съемки трещиноватости проведена линейная съемка с помощью горного компаса. В ходе съемки измерялись азимуты и углы падения крупных трещин (длиной не менее 4 м) и небольших тектонических разломов, в которых наблюдается гинка трения. Фиксировались также видимые длины нарушений и расстояние по нормали до соседних нарушений той же системы. Проведено сравнение результатов двух видов съемок трещиноватости. Все системы трещин, зафиксированные фотограмметрическим методом, подтверждены линейным документированием с помощью горного компаса с большой долей совпадения. Таким образом, можно говорить о достоверности собранных данных двумя методами картирования.

Для стадии подземной разработки глубоких горизонтов трещиноватость массива оценивалась по керну геомеханических и разведочных скважин. По керну геомеханических скважин № 1И–4И наблюдается уменьшение нарушенности массива трещинами с увеличением глубины залегания пород (рис. 3). Вблизи земной поверхности в зоне выветривания нарушенность массива достаточно сильная с показателем качества породы RQD (Rock Quality Designation), характеризующим нарушенность массива трещинами, в диапазоне 20–50 %. С ростом глубины залегания нарушенность пород снижается и начиная с глубин 100–120 м RQD пород изменяется в пределах 70–90 %.

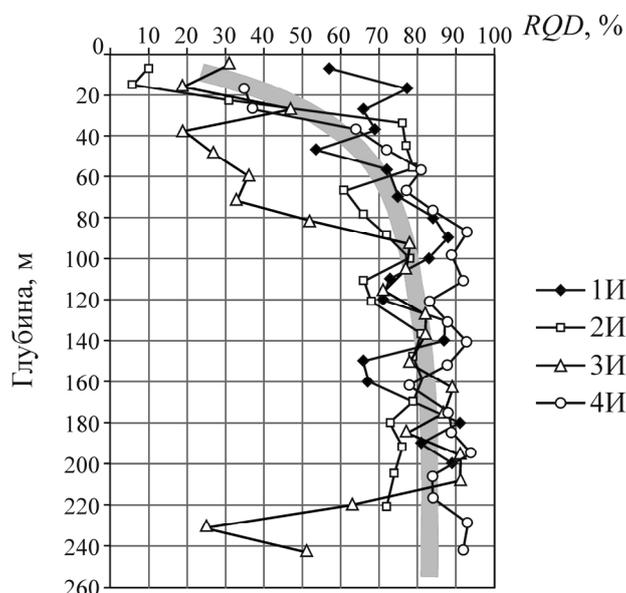


Рис. 3. Увеличение RQD с глубиной залегания

На основе геомеханического описания керна 20 геологоразведочных скважин общей длиной около 8 км (рис. 4) по фотографиям с применением программного обеспечения Core-Profiler рассчитаны показатель RQD и рейтинг качества массивов горных пород RMR (Rock Mass Rating) [7–9]. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Анализ полученной базы данных по рейтинговым показателям массивов показал следующее. Нарушенность массива трещинами с увеличением глубины залегания снижается: RQD увеличивается, частота трещин на 1 пог. м снижается. Следовательно, качество и прочность массива с глубиной увеличиваются. Этот весьма позитивный факт можно использовать для оптимизации конструкции бортов карьера, а именно: с увеличением глубины разработки увеличивать угол наклона откосов, формируя выпуклый профиль борта. Геомеханические предпосылки для этого выявлены проведенными исследованиями.

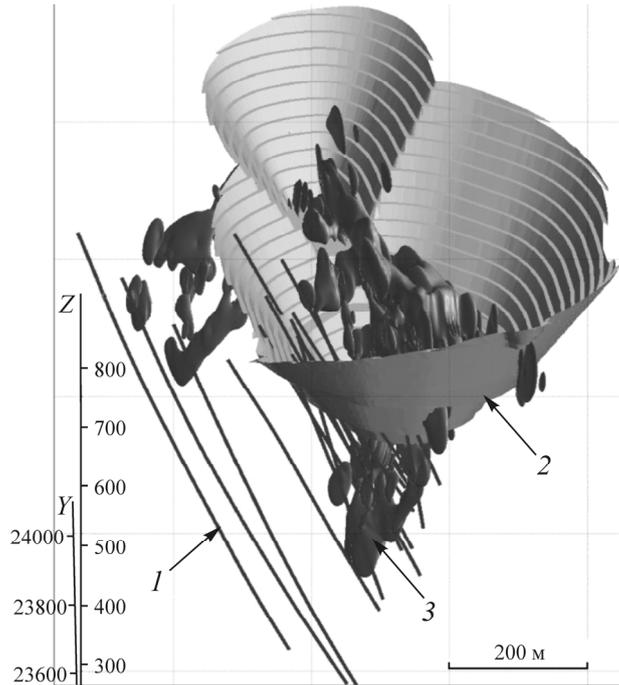


Рис. 4. Расположение скважин (1), для которых выполнено геомеханическое описание керна; 2 — проектный контур обрабатываемого карьера; 3 — рудное тело, перспективное для подземной разработки

ТАБЛИЦА 2. Рейтинговые показатели массивов Березитового месторождения

Рейтинговые показатели	Статистические параметры			
	Количество значений в выборке	Среднее значение	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %
Вмещающие породы (гранодиориты, граниты — GR, GRP, DB)				
<i>RQD</i>	3071	90	15.1	17
<i>RMR</i>		78	4.3	5
<i>GSI</i>		80	7.5	9
Руда (метасоматиты — MS, MSQ)				
<i>RQD</i>	690	87	15.8	18
<i>RMR</i>		76	4.2	5
<i>GSI</i>		78	7.9	10

Для расчета прочностных и упругих свойств трещиноватых массивов руды и вмещающих пород с помощью обобщенного критерия Хука–Брауна [8] использовался геологический индекс прочности массива *GSI*. Он является аналогом коэффициента структурного ослабления массива трещинами, используемым в геомеханике. Для его определения взяты известные соотношения [8]:

$$GSI = RMR - 5; \quad (1)$$

$$GSI = 1.5 \left(JCond_{89} + \frac{RQD}{2} \right), \quad (2)$$

где $JCond_{89}$ — рейтинг характеристик трещин (Joint Conditions) по Бенявскому (1989), учитывающий их длину, раскрытие, шероховатость, заполнитель и степень выветривания. Расчеты проводились по формулам (1), (2), сопоставлялись между собой и выводилось среднее значение *GSI*.

Для определения коэффициента m_i , входящего в критерий прочности Хука – Брауна и характеризующего тип породы, в лаборатории Санкт-Петербургского горного института проведены испытания гранодиоритов. Параметр m_i является аналогом угла внутреннего трения в критерии Кулона – Мора. Он характеризует прирост прочности породы при увеличении бокового давления. По результатам обработки 170 испытаний (140 — на одноосное сжатие и 30 — при двухосном сжатии) с помощью программы RockData параметр m_i для гранидиоритов оказался равным 20. Ориентировочное среднее значение параметра m_i , которое Хук рекомендует использовать при отсутствии необходимых экспериментальных данных, равно $m_i = 29 \pm 2$. Упругие и прочностные свойства трещиноватых массивов месторождения Березитовое, которые рассчитаны в программе RockData и применялись при численном моделировании, приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Механические свойства трещиноватых массивов горных пород

Показатели свойств	Порода	Руда
Удельный вес, т/м ³	2.61	2.87
Свойства пород в образцах		
Прочность образца при одноосном сжатии, МПа	160	110
Коэффициент, характеризующий тип породы m_i	20	20
Степень нарушения массива взрывными работами D	0	0
Модуль упругости E_i , ГПа	68	47
Коэффициент Пуассона	0.20	0.20
Параметры критерия Хука – Брауна		
Геологический индекс прочности GSI	80	78
m_b	9.8	9.1
s	0.10	0.09
a	0.501	0.501
Параметры критерия Кулона – Мора		
Сцепление, МПа	31	20
Угол внутреннего трения, град	36	36
Свойства трещиноватых массивов		
Прочность на растяжение, МПа	1.8	1.0
Прочность на сжатие, МПа	77	50
Модуль деформации E_{tm} , ГПа	60	40

Для численного моделирования необходимо оценить природное напряженное состояние массива. В результате геодинамического районирования определена региональная позиция Березитового месторождения в современной структуре Амурской тектонической плиты (рис. 5), которая отличается достаточной сложностью, обусловленной его близостью к сейсмически активной границе плиты [10, 11]. По сейсмологическим данным международного проекта World Stress Map (WSM Rel. 2008) этот регион характеризуется тектоническим режимом TF (Thrust Faulting — образования взбросов) [12]. В данном режиме горизонтальные тектонические напряжения (σ_1) являются максимальными, а вертикальные (гравитационные $\sigma_3 \sim \sigma_v$) — минимальными. Согласно базе данных WSM, ближайшие сейсмические события RUS42 (1976 г., 54.1° с.ш., 122° в.д.) и RUS85 (1978 г., 55.2° с.ш., 124.8° в.д.) показывают направления действия максимальных горизонтальных напряжений в массиве σ_1 по азимутам 9 и 22°.

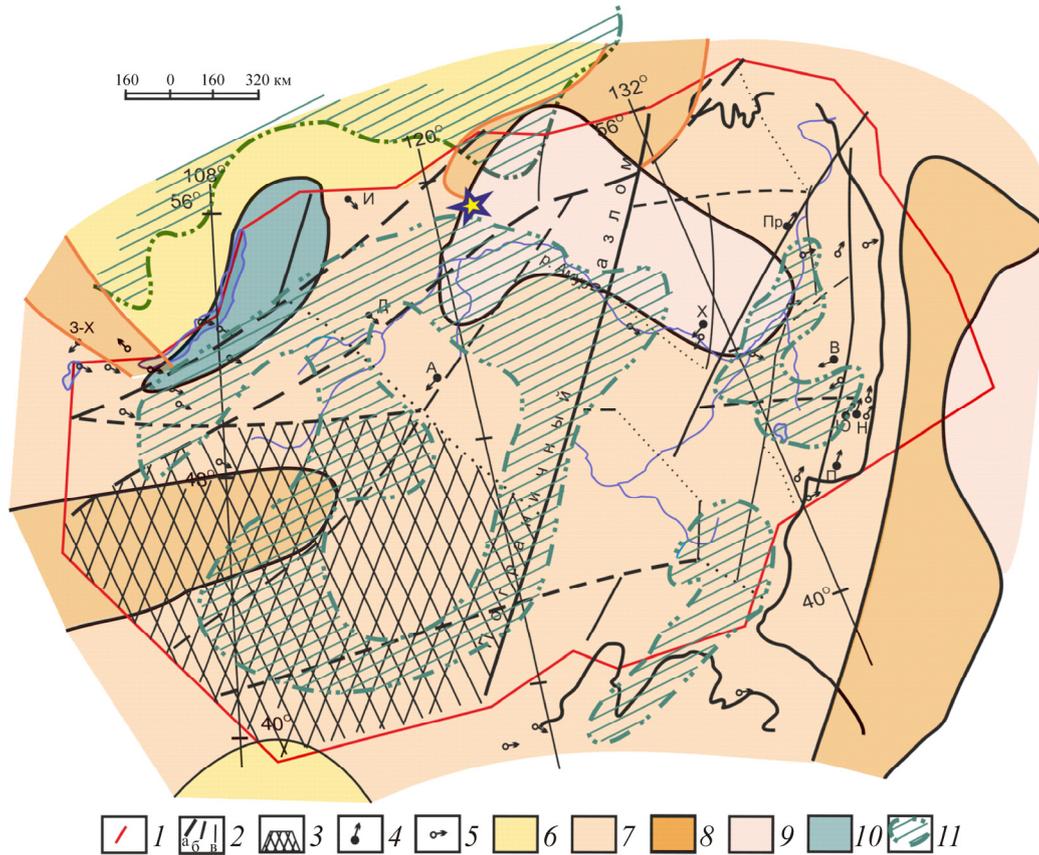


Рис. 5. Современная структура Амурского геоблока: 1 — сейсмогенерирующие разломы, ограничивающие Амурский геоблок; 2 — разломы, ограничивающие внутренние блоки литосферной плиты, ранжированные по порядку: а — первый порядок, б — второй порядок, в — третий порядок; 3 — жесткая часть Западного блока с относительно спокойным современным тектоническим режимом; 4 — направление вектора главного горизонтального напряжения, установленного в разработках удароопасных месторождений: Н — Николаевское, Ю — Южное, З — Забытое, П — Партизанское, В — Восток-2, Пр — Перевальное, Х — Хинганское, А — Антей, Д — Дарасунское, И — Ирокиндинское, З-Х — Зун-Холбинское; 5 — направление вектора современных горизонтальных перемещений поверхности земной коры, установленное по данным GPS-измерений; 6 – 10 — области с разным геодинамическим режимом (по Леви, Шерману, 2007): 6 — области тектонически нейтрального напряженного состояния; 7 — области сжатия; 8 — области сдвига; 9 — области сжатия со сдвигом; 10 — области растяжения; 11 — области сжатия литосферного слоя, прогнозируемые по геофизическим данным (по Б. Ф. Шевченко); месторождение Березитовое обозначено звездочкой

Месторождение Березитовое попадает в область, которая характеризуется преобладанием современного сжатия со сдвигом ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$). По результатам численного моделирования [2, 13] месторождение располагается непосредственно у западной границы расчетной области у границы между блоками второго порядка. Расчетное направление максимального горизонтального сжимающего напряжения σ_1 варьирует от 15 до 50°, а соотношения главных горизонтальных напряжений σ_1/σ_2 изменяется в пределах 1.13 – 1.26.

По морфоструктурному анализу топографических карт построена карта современных деформаций земной поверхности и обновленные схемы тектонических блоков [14]. Выполненное дешифрирование результатов радарных спутниковых съемок земной поверхности Амурской плиты [11, 15] позволило с новых позиций представить ее современное напряженно-деформи-

рованное состояние. По этим данным месторождение Березитовое локализуется у восточной границы Байкальского тектонического потока, который в настоящее время перемещается в юго-восточном направлении.

По результатам исследований установлены следующие параметры современного природного напряженного состояния массива месторождения Березитовое: по простиранию рудного тела действуют максимальные напряжения $\sigma_1 = \sigma_v$; вертикальное и направленное вкрест простирания напряжения $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_v$ (см. рис. 1). Эти параметры применялись в дальнейших расчетах напряженно-деформированного состояния массива при комбинированной разработке месторождения.

В связи с тем что вскрытие нижних горизонтов месторождения планируется осуществить из карьера, одним из основных условий подземной разработки является сохранение устойчивости бортов карьера. Въездная траншея в карьер по условиям рельефа расположена висячем боку рудной залежи и в наибольшей мере подвержена подработке подземными горными работами. По этой причине на руднике Березитовый допустимы только системы с поддержанием выработанного пространства рудными целиками. Параметры очистных камер и целиков (междукамерных и междуэтажных) должны обеспечивать устойчивое состояние выработанного пространства и предотвратить обрушение и интенсивное сдвигание вмещающих пород и борта карьера висячего бока.

По принятым кондициям подземной разработки возможен вариант, по которому рудное тело будет единым большой мощности (порядка 20–30 м). При этом его отработку целесообразно вести системой подэтажных штреков (ортов) со скважинной отбойкой руды. В случае разделения рудной зоны на отдельные рудные тела меньшей мощности (порядка 4–7 м), но с более высоким содержанием металла, их параллельную (одновременную) разработку в камерах следует вести системой горизонтальных слоев в восходящем порядке с породной закладкой выработанного пространства. Роль закладки в этом случае будет заключаться не только в создании рабочих площадок для выемки вышележащего слоя, но и в поддержании в устойчивом состоянии породных междупластий между обрабатываемыми рудными телами. Их мощность должна быть не менее 5–7 м, чтобы не происходило их разрушение взрывом при шпуровой отбойке руды.

Существуют различные методические подходы к оценке устойчивости подземных горных выработок [16]. Для определения допустимых параметров очистных камер применялась широко известная в международной практике методика К. Мэтьюза, основанная на анализе практических данных о фактическом состоянии отработанных камер [17]. Показатель устойчивости обнажения висячего бока очистных камер N в методике К. Мэтьюза рассчитывается по модифицированной формуле Н. Бартона [17]:

$$N = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_\alpha} ABC, \quad (3)$$

где J_n — показатель, учитывающий количество систем трещин в массиве; J_r — показатель шероховатости трещин; J_α — показатель изменения поверхностей трещин, учитывающий прочностные свойства трещин на сдвиг; A — коэффициент, учитывающий прочность и напряженное состояние пород; B — коэффициент, учитывающий ориентацию трещин (нарушений) по отношению к обнажению висячего бока; C — коэффициент, учитывающий угол падения (наклон) α обнажения висячего бока. Детальное описание правил, по которым определяются данные показатели, приведено в работах [17, 18].

В методике К. Мэтьюза размер обнажений висячего бока камер характеризуется гидравлическим радиусом HR , аналогом которого в отечественной литературе является эквивалентный полупролет обнажения. Гидравлический радиус HR определяется как отношение площади обнажения висячего бока (или кровли) камеры к его периметру:

$$HR = \frac{wh}{2(w+h)}, \quad (4)$$

где h , w — пролеты камеры по падению и по простиранию, м.

Для определения допустимых параметров очистных камер на месторождении Березитовое использована диаграмма устойчивости (рис. 6), полученная SRK Consulting по методике К. Мэтьюза в условиях Риддер-Сокольского рудника [19]. Линия, разделяющая устойчивые и неустойчивые состояния очистных обнажений, имеет вид

$$HR = 0.32N + 4.3. \quad (5)$$

На рис. 6 область устойчивых состояний очистных камер находится левее и выше данной линии. Область полностью обрушенных выработанных пространств находится правее и ниже линии, которую описывает уравнение

$$HR = 0.29N + 10.0. \quad (6)$$

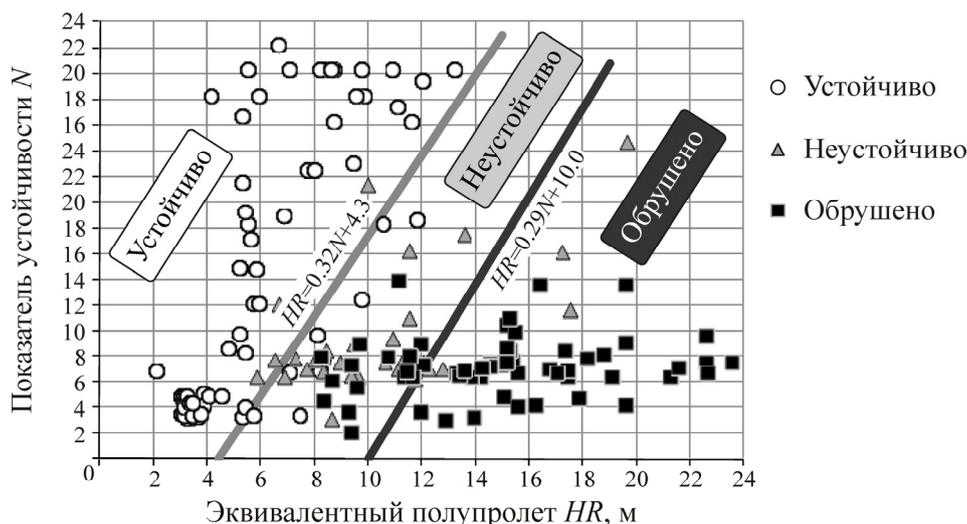


Рис. 6. Диаграмма условий устойчивого состояния и обрушений очистных выработок по методике К. Мэтьюза

Полученный критерий предельно устойчивых обнажений в очистных выработках (5) сопоставлен с графическим критерием, полученным С. Мавдеслей на основе анализа почти 500 практических случаев [20]. Сопоставление показало, что в интервале значений $N = 2 \div 32$ они с точностью до ± 1 м эквивалентного полупролета HR совпадают между собой. Следовательно, критерий (5), определяющий предельные устойчивые обнажения в очистных камерах, может быть применен для любых месторождений, так как он опирается на практический опыт создания 650 очистных камер в самых разнообразных горно-геологических условиях.

По результатам численного моделирования установлено, что основная часть запасов нижних горизонтов Березитового месторождения в пределах рудного тела размером по падению 90 м и по простиранию 135 м может быть безопасно отработана двумя этажами камерами вы-

сотой 40 м. Между этажами оставляется междуэтажный целик (МЭЦ). Устойчивость МЭЦ, оформленного наклонно под углом 20° (по нормали к создаваемым обнажениям вмещающих пород), обеспечивается при его высоте 10 м.

При высоте камер 40 м и углах падения висячего бока 72° значения показателей и коэффициентов, входящих в формулу (3), в условиях Березитового месторождения составляют: $RQD = 90\%$; $J_n = 15$; $J_r = 2$; $J_\alpha = 1$; $A = 1$; $B = 0.2$; $C = 6.14$. Рассчитанный показатель устойчивости обнажений равен $N = 15$. При таком показателе устойчивости допустимый эквивалентный пролет камер HR_1 по формуле (5) составит 9.1 м.

Допустимые пролеты камер должны удовлетворять неравенству

$$HR_1 = \frac{wh}{2(w+h)} \leq 0.32N + 4.3. \quad (7)$$

При заданном пролете камер по падению $h = 40$ м допустимый пролет камер по простиранию $w = 30$ м.

Между очистными камерами с пролетами 40×30 м необходимо оставлять междукамерные целики (МКЦ) ленточной формы, ориентированные по падению рудного тела. Величину действующих напряжений σ_p в МКЦ ленточной формы можно определить по формуле:

$$\sigma_p = k (\cos^2 \alpha + \lambda \sin^2 \alpha) \frac{\rho g H}{1-r}, \quad (8)$$

где k — коэффициент концентрации горизонтальных напряжений под дном карьера; α — угол падения рудного тела, град; λ — коэффициент бокового давления в природном напряженном состоянии массива вкост простирания рудного тела; ρ — удельный вес толщи подрабатываемых пород; H — глубина разработки; r — коэффициент извлечения руды из недр (без учета руды в МЭЦ).

Условием прочности МКЦ является: $\sigma_p \leq \sigma_m / n$, где n — коэффициент запаса прочности МКЦ; σ_m — прочность трещиноватого массива руды при одноосном сжатии.

Допустимый коэффициент извлечения руды r находится из выражения

$$r = 1 - \frac{nk (\cos^2 \alpha + \lambda \sin^2 \alpha) \rho g H}{\sigma_m}. \quad (9)$$

Для условий Березитового месторождения: коэффициент запаса прочности МКЦ для камерной системы разработки без захода людей в выработанное пространство с учетом небольшого времени службы целиков (2–3 года) $n = 1.5$; коэффициент концентрации горизонтальных напряжений под дном карьера, определенный по результатам численного моделирования, $k = 1.25$; коэффициент бокового давления в природном поле напряжений $\lambda = 1.0$; удельный вес вмещающих пород $\rho = 2.61 \text{ т/м}^3$; $\sigma_m = 50 \text{ МПа}$.

При глубине разработки $H = 400$ и 450 м на отметках почвы верхнего и нижнего этажа допустимый коэффициент извлечения руды r , полученный по формуле (9), составляет соответственно 0.60 и 0.57.

Если принимать в расчет только ленточные МКЦ по падению рудного тела, при длине очистных камер $w = 30$ м по простиранию рудного тела необходимая ширина МКЦ должна быть равна

$$b = w \frac{1-r}{r}. \quad (10)$$

При допустимых коэффициентах извлечения руды на верхнем и нижнем этажах подземной разработки $r = 0.60$ и 0.57 необходимая ширина МКЦ равна $b = 20$ и 23 м соответственно.

ВЫВОДЫ

Изучение геомеханического состояния массива горных пород Березитового золото-полиметаллического месторождения с применением показателя качества породы, характеризующего нарушенность массива трещинами RQD , и обобщенного критерия Хука–Брауна с использованием геологического индекса прочности массива GSI дало возможность определить количественные значения основных прочностных и упругих свойств горных пород и их вариации с глубиной.

В результате геодинамического районирования определена региональная позиция Березитового месторождения в современной структуре Амурской тектонической плиты и с учетом сейсмологических данных международного проекта реконструированы параметры современного природного напряженного состояния массива залежи: по простиранию рудного тела максимальные напряжения $\sigma_1 = \sigma_v$, вертикальное и вкрест простирания напряжения $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_v$.

Численным моделированием установлено, что основная часть запасов нижних горизонтов месторождения в пределах рудного тела размером по падению 90 м и по простиранию 135 м может быть безопасно отработана двумя этажами камерами высотой 40 м. Между этажами остается междуэтажный целик, устойчивость которого обеспечивается при высоте 10 м, в случае его оформления наклонно под углом 20° . Для ленточных МКЦ по падению рудного тела, при длине очистных камер 30 м по простиранию рудного тела необходимая ширина целиков при допустимых коэффициентах извлечения руды на верхнем и нижнем этажах подземной разработки 0.60 и 0.57 составляет 20 и 23 м соответственно.

В целом рассмотренный методический подход дал возможность на предпроектной стадии оценить геомеханическое состояние массива горных пород Березитового золоторудного месторождения при переходе от открытых к подземным горным работам и предварительно обосновать параметры камер и целиков, обеспечивающие их устойчивость при ведении очистной выемки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров А. Б. Практическая геомеханика. — М.: Горная книга, 2006. — 391 с.
2. Рассказов И. Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона. — М.: Горная книга, 2008. — 329 с.
3. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В. Комбинированная разработка рудных месторождений. — М.: Горная книга, 2012. — 344 с.
4. Казикаев Д. М. Комбинированная разработка рудных месторождений. — М.: Горная книга, 2008. — 359 с.
5. Вах А. С., Моисеенко В. Г., Степанов В. А., Авченко О. В. Березитовое золото-полиметаллическое месторождение // ДАН. — 2009. — Т. 425. — № 2. — С. 204–207.
6. Эйриш Л. В. Металлогения золота Приамурья (Амурская область, Россия). — Владивосток: Дальнаука, 2002. — 194 с.
7. Bieniawski Z. T. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, Civil and Petroleum Engineering, John Wiley & Sons, 1989. — 251 p.

8. Hoek E., Carter T. G., Diederichs M. S. Quantification of the geological strength index chart, ARMA, 2013-672. — 8 p.
9. Laubscher D. H. A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design, JS Afr. Inst. Min. Metall, 1990, No. 90 (10). — P. 257–273.
10. Батугина И. М., Петухов И. М. Геодинамическое районирование месторождений при проектировании и эксплуатации рудников. — М.: Недра, 1988. — 166 с.
11. Рассказов И. Ю., Саксин Б. Г., Петров В. А., Шевченко Б. Ф., Усиков В. И., Гильманова Г. З. Современное напряженно-деформированное состояние верхних уровней земной коры Амурской литосферной плиты // Физика земли. — 2014. — № 3. — С. 104–113.
12. Леви К. Г., Шерман С. И., Саньков В. А. и др. Карта современной геодинамики Азии. — Масштаб 1: 5 000 000. — Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007.
13. Рассказов И. Ю. Численное моделирование современного поля тектонических напряжений в области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов // Тихоокеан. геология. — 2006. — № 5. — Т. 25. — С. 104–114.
14. Рассказов И. Ю., Саксин Б. Г. Обоснование расчетной модели для оценки напряженно-деформированного состояния верхней части земной коры Амурского геоблока // Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири. — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2010. — С. 96–101.
15. Усиков В. И. Динамика и строение тектонических потоков. Анализ 3D-моделей рельефа // Тектоника, магматизм и геодинамика Востока Азии: VII Косыгинские чтения: материалы Всерос. конф. — Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2011. — С. 328–331.
16. Курленя М. В., Барышников В. Д., Гахова Л. Н. Развитие экспериментально-аналитического метода оценки устойчивости горных выработок // ФТПРПИ. — 2012. — № 4. — С. 20–29.
17. Mathews K. E., Hoek E., Wyllie D. C., and Stewart S. B. Prediction of stable excavation spans for mining at depths below 1,000 meter's in hard rock, Golder Associates Report to Canada Centre for Mining and Energy Technology (CANMET), Department of Energy and Resources, Ottawa, Canada, 1980. — 445 p.
18. Nickson S. D. Cable support guidelines for underground hard rock mine operations, M. App. Sc. thesis, University of British Columbia, 1992. — P. 27–39.
19. Макаров А. Б. Обоснование допустимых параметров очистных камер и целиков // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2015. — № 2. — С. 261–267.
20. Mawdesley C. Predicting cave initiation and propagation in block caving mines. PhD thesis (unpublished), University of Queensland, Brisbane, 2002. — 255 p.

Поступила в редакцию 20/III 2016