

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМ КРЕПЛЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ПЕРЕХОДЕ К ОТРАБОТКЕ ОЛИМПИАДИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ

В.К. Бушков¹, Р.С. Шеметов¹

¹ ООО «Полюс Проект», Красноярск, Россия, e-mail: shemetovrs@polyus.com

Аннотация: Рассмотрен порядок и принципы выбора систем крепления горизонтальных и наклонных подземных горных выработок при последовательном переходе от открытых к подземным горным работам в условиях Олимпиадинского месторождения, в Красноярском крае. Особенностью данного исследования является то, что оно выполнено на базе информации о массиве горных пород, полученной на стадии ведения открытых горных работ. В качестве основных критериев использованы показатели рейтинговых типизаций массива горных пород Олимпиадинского месторождения, полученные в процессе эксплуатации карьера «Восточный». Для оценки устойчивости подземных горных выработок и времени их стояния без установленной крепи применена классификация RMR З. Бенявского, для определения типов крепления использован Q-индекс Н. Бартона. Разработана трехмерная блочная модель, позволяющая в оперативном режиме определять необходимые условия для обеспечения устойчивости системы крепления подземных горных выработок на стадии проектирования рудника. С помощью методов трехмерного численного моделирования осуществлена оценка вероятности проявления динамических явлений в виде горных ударов на контактах подземных горных выработок с разломными зонами, присутствующими в массиве горных пород Олимпиадинского месторождения.

Ключевые слова: крепление подземных горных выработок, устойчивость, массив горных пород, рейтинговая типизация массива горных пород, трехмерное численное моделирование, трехмерное блочное моделирование, напряженно-деформированное состояние.

Для цитирования: Бушков В.К., Шеметов Р.С. Определение устойчивости и обоснование систем крепления горных выработок при переходе к отработке Олимпиадинского месторождения подземным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 9. – С. 40–54. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-40-54.

Stability estimation and justification of support systems in transition to underground mining in the Olimpiada deposit

V.K. Bushkov¹, R.S. Shemetov¹

¹ LLC «Polyus Project», Krasnoyarsk, Russia, e-mail: shemetovrs@polyus.com

Abstract: The article discusses the procedure and principles of support system designs for horizontal and inclined excavations in coherent transition from open to underground mining in terms

of the Olimpiada deposit in the Krasnoyarsk Krai. This study is specific for using the information on rock mass obtained at the stage of opencast mining. The main criteria were the Olimpiada rock mass classification indexes determined during operation of the Vostochny open pit mine. Stability and service life of underground excavations without support were estimated using Bieniawski's *RMR* system, and support designs were selected using *Q*-index introduced by Barton. A 3D block model is developed for the on-line determination of mine support stability at the stage of mine planning. Three-dimensional numerical modeling methods are used to assess probability of seismic events in the form of rock bursts on approach of underground excavations and fault zones in the Olimpiada deposit.

Key words: underground mine support, stability, rock mass, rock mass classification systems, three-dimensional numerical modeling, three-dimensional block modeling, stress-strain behavior.

For citation: Bushkov V. K., Shemetov R. S. Stability estimation and justification of support systems in transition to underground mining in the Olimpiada deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(9):40-54. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-40-54.

Введение

В результате проведения подземных выработок равновесно-напряженное состояние горных пород нарушается. Вокруг выработок формируется перераспределенное поле напряжений, при этом происходит воздействие горного давления на окружающий массив, целики и крепь [1 – 2].

Величина и характер горного давления зависят от многих факторов. Одни из них определяются природными условиями, другие создаются в процессе разработки месторождений [3]. Если не предпринимать мер по адекватному выбору типа крепления выработок в соответствии с действующими нагрузками, то со временем может произойти нарушение устойчивости и разрушение окружающего выработку массива [4]. С другой стороны, выбор более дорогого типа крепления не всегда экономически целесообразен, так как устойчивость массива может быть обеспечена при креплении более дешевыми системами крепи.

Особые трудности при выборе систем крепления подземных горных выработок возникают при переходе от открытых горных работ к подземным. Основной сложностью при этом является

недостаточная изученность характера поведения массива горных пород на глубине [5].

Для рационального выбора типа крепления горных выработок необходим тщательный анализ условий, в которых они будут пройдены. К этим факторам относятся как горно-геологические условия Олимпиадинского месторождения, включающие в себя структурное строение, гидрогеологические условия, напряженно-деформированное состояние массива горных пород, качество породного массива, так и технологические решения по отработке рудной залежи.

Оценка устойчивости подземных горных выработок и выбор крепи в соответствии с показателями качества и рейтинговой классификацией массива горных пород

В основу оценки устойчивости подземных горных выработок положена блочная геомеханическая модель, в которой заложены такие параметры, как предел прочности на одноосное сжатие в образце, показатель частоты трещин (трещин/м), показатель качества массива *RQD*, индекс геологической проч-

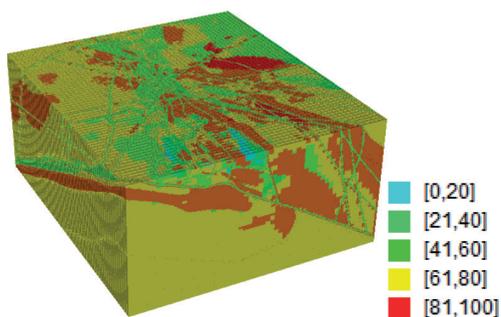


Рис. 1. Общий вид блочной геомеханической модели Олимпиадинского месторождения (с распределением параметра GSI в массиве горных пород)
 Fig. 1. General view of geomechanical block model of the Olimpiada deposit (with GSI patterns in rock mass)

ности GSI , рейтинговые классификации массива RMR З. Бенявского, RMR Д. Лобшера, и др. (рис. 1).

При определении устойчивости и типа крепления подземных горных выработок применены зарубежные системы классификации RMR и Q , основанные на эмпирическом опыте строительства подземных тоннелей и горных выработок [6–7] и имеющие широкую степень использования в международной и отечественной практике [8–9].

В табл. 1 приведен перечень параметров, используемых в классификациях массива горных пород.

Учитывая то, что на сегодняшний день ведется выбор вариантов систем разработки, было принято решение о создании

Таблица 1

Параметры, используемые в системах классификации массива пород
Parameters of rock mass classification systems

Система RMR	Q -система
Прочность монолитных пород при одноосном сжатии	Маркировка качества пород (RQD)
Маркировка качества пород (RQD)	Число систем трещин
Расстояние между трещинами	Шероховатость трещин
Состояние трещин (шероховатость, заполнение, прочность и т.д.)	Заполнение, степень выветрелости, материал заполнителя трещин
Состояние подземных вод	Приток воды
Ориентация трещин	Напряженное состояние

универсального инструмента по определению устойчивости и выбору типа крепления массива горных пород на основе блочной геомеханической модели.

Для определения типов крепления подземных горных выработок в соответствии с рейтинговой классификацией рассмотрены подготовительные и капитальные выработки с пролетом 5 и 6 м, а также их сопряжения.

Использование разработанной модели позволит оперативно решать задачи по выбору типа крепления ПГВ в процессе проектирования и эксплуатации рудника, а также сократит время для сбора исходных данных и расчетов параметров их крепления.

Оценка устойчивости подземных горных выработок в соответствии с рейтинговой классификацией RMR З. Бенявского

Рейтинг RMR , согласно [10], представляет собой совокупность параметров (формула (1)), оцененных в баллах в зависимости от степени их влияния на качество породного массива:

$$RMR = J_{A1} + J_{A2} + J_{A3} + J_{A4} + J_{A5} + J_B, \quad (1)$$

где J_{A1} — рейтинг, характеризующий прочность пород на одноосное сжатие

Таблица 2

Показатель рейтинга массива горных пород
Index of rock mass rating

Рейтинг RMR	Класс (категория)	Описание массива	Степень устойчивости массива
от 100 до 81	1	очень хороший	весьма устойчивый
от 80 до 61	2	хороший	устойчивый
от 60 до 41	3	добротный	средней устойчивости
от 40 до 21	4	плохой (низкого качества)	неустойчивый
менее 20	5	очень плохой (очень не качественный)	весьма неустойчивый

(в пределах от 0 до 15 баллов в зависимости от прочности пород в образце); J_{A2} — рейтинг, характеризующий показатель качества породы (RQD) по Диру (в пределах от 3 до 20 баллов в зависимости от показателя RQD); J_{A3} — рейтинг, характеризующий расстояние между трещинами (в пределах от 5 до 20 баллов); J_{A4} — рейтинг, характеризующий трещины:

$$J_{A4} = J_{A41} + J_{A42} + J_{A43} + J_{A44} + J_{A45}, \quad (2)$$

где J_{A41} — рейтинг, характеризующий шероховатость трещин (в пределах от 3 до 6 баллов); J_{A42} — рейтинг, характеризующий длину трещин (в пределах от 3 до 6 баллов); J_{A43} — рейтинг, характеризующий раскрытие трещин (в пределах от 0 до 6 баллов); J_{A44} — рейтинг, характеризующий заполнение трещин (в пре-

делах от 0 до 6 баллов); J_{A45} — рейтинг, характеризующий выветренность стенок трещин (в пределах от 3 до 6 баллов); J_{A5} — рейтинг, характеризующий условия обводненности выработки (в пределах от 0 до 15 баллов); J_B — рейтинг, характеризующий направление трещин относительно оси выработки и угол их падения (в пределах от 0 до 12 баллов).

Для оценки устойчивости подземных горных выработок использован показатель рейтинга массива горных пород, зависящий от значения RMR (табл. 2).

Вид построенной модели, отображающей степень устойчивости массива пород Олимпиадинского месторождения, представлен на рис. 2.

Согласно рейтинговой классификации 3. Бенявского установлено, что

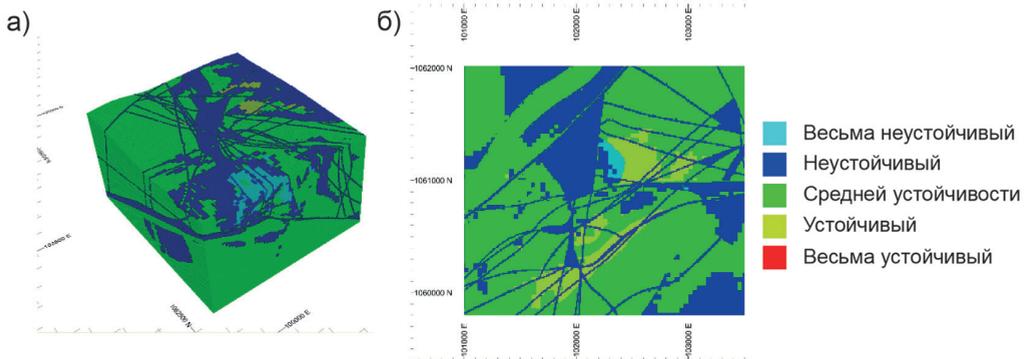


Рис. 2. Вид блочной модели с отображением степени устойчивости массива по RMR: общий вид модели (а); сечение на горизонте -40 м (б)

Fig. 2. Block model with rock mass stability by RMR: a — general view; b — cross-section of level -40 m

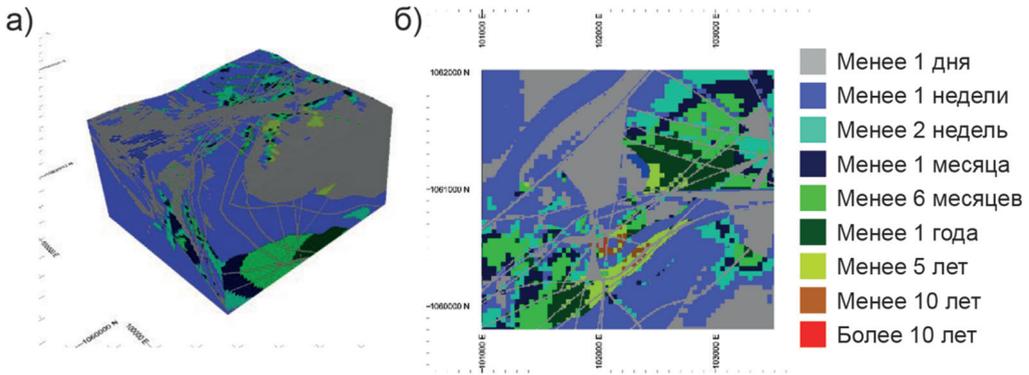


Рис. 3. Вид блочной модели с отображением времени устойчивого стояния выработки с пролетом 5 м: общий вид модели (а); сечение на горизонте –40 м (б)

Fig. 3. Block model with stable service life of mine excavation span of 5 m: a-general view; b-cross-section of level –40 m

большая часть массива пород Олимпиадинского месторождения относится к породам средней устойчивости. Зоны тектонических разломов относятся к неустойчивым породам.

В зависимости от значения RMR и пролета выработки рассчитано время устойчивого стояния выработки без крепления в массиве горных пород Олимпиадинского месторождения. Результаты расчета для пролета 5 м отображены на рис. 3, для их выполнения использовалась номограмма на рис. 4.

Анализ модели (см. рис. 3) показал, что большая часть массива горных по-

род Олимпиадинского месторождения будет сохранять свою устойчивость после проходки не больше одной недели. Зоны тектонических разломов будут неустойчивыми, в них вероятны обрушения в течение дня после проходки.

Определение типа крепления подземных горных выработок в соответствии с Q -индексом Н. Бартона

Численное значение Q определяется по формуле (2).

$$Q = RQD/J_n \times (J_r/J_a) \times (J_w/SRF), \quad (3)$$

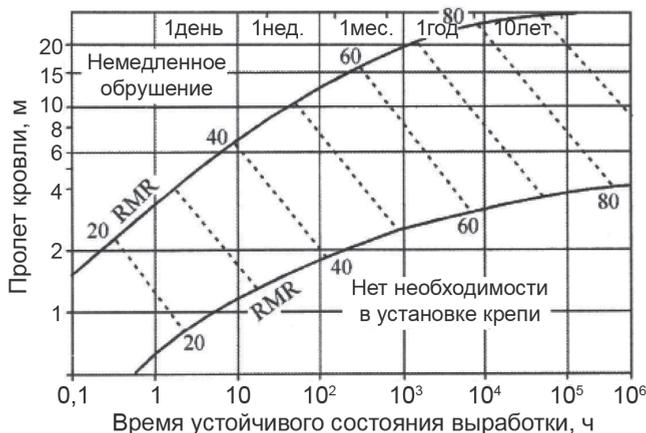


Рис. 4. Номограмма величины пролета и времени стояния выработки [11]

Fig. 4. Nomogram of span and service life of mine excavation [11]

Таблица 3

Классификация пород по устойчивости в зависимости от Q [12]
Rock mass quality by Q -index [12]

Q	Описание горного массива	Категория в соответствии с правилами технической эксплуатации	Степень устойчивости
0,01 – 0,001	исключительно слабый	V	весьма неустойчивый
0,01 – 0,1	крайне слабый		
0,1 – 1,0	очень слабый		
1 – 4	слабый	IV	неустойчивый
4 – 10	средний	III	средней устойчивости
10 – 40	крепкий	II	устойчивый
40 – 100	очень крепкий	I	весьма устойчивый
100 – 400	чрезвычайно крепкий		
400 – 1000	исключительно крепкий		

где RQD – показатель качества породы; J_n – показатель количества систем трещин; J_r – показатель шероховатости поверхности трещин; J_a – показатель изменчивости трещин; J_w – водный фактор; SRF – фактор снижения напряжений.

Для получения значений Q -индекса был использован переход от RMR через формулу (3), предложенный З. Бенявским в 1989 г. [11].

$$RMR = 9 \ln Q + 44 \quad (4)$$

Степень устойчивости массива пород Олимпиадинского месторождения в зависимости от показателя Q опреде-

лена в соответствии с табл. 3 (рис. 5). Анализ модели (см. рис. 5) показал, что большая часть массива горных пород Олимпиадинского месторождения относится к неустойчивым и среднеустойчивым. Зоны тектонических нарушений относятся к весьма неустойчивым.

Аналогично, по табл. 3, построена модель с описанием массива в зависимости от Q (рис. 6).

По описанию в соответствии с Q -индексом большая часть массива горных пород относится к слабому, среднему и крепкому типу. Зоны тектонических

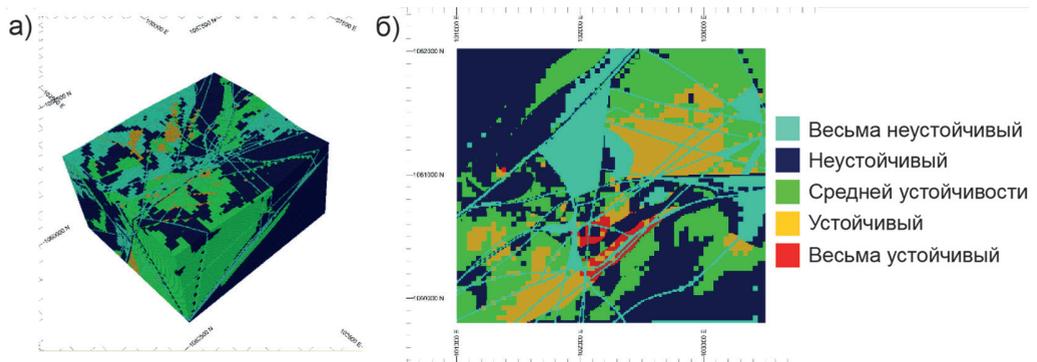


Рис. 5. Вид блочной модели с отображением степени устойчивости массива по ПТЭ: общий вид модели (а); сечение на горизонте -40 м (б)

Fig. 5. Block model with stability quality based on maintenance rules: (a) general view; (b) cross-section of level -40 m

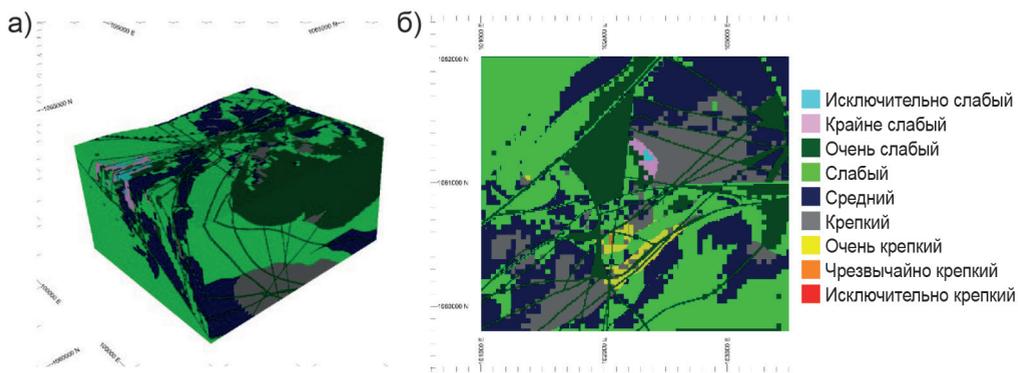


Рис. 6. Вид блочной модели с отображением описания массива по Q: общий вид модели (а); сечение на горизонте -40 м (б)

Fig. 6. Block model with rock mass description based on Q-index: a-general view; b-cross-section of level -40 m

разломов относятся к очень слабым массивам горных пород.

Для определения качества массива горных пород и выбора типа крепления подземных горных выработок используется номограмма (рис. 7).

Тип крепления зависит от отношения пролета выработки к коэффициенту типа выработки, а также от значения Q-индекса.

Цифры от 1 до 9 на номограмме показывают рекомендованный тип крепления для данных условий.

Им соответствуют виды крепи:

- 1 – незакрепленная или локальное анкерное крепление (АК);
- 2 – локальное АК;
- 3 – систематическое АК, дисперсно-армированный набрызгбетон толщиной 5–6 см (АК + НБ 5–6 см);
- 4 – дисперсно-армированный набрызгбетон толщиной 6–9 см и анкерное крепление (АК + НБ 6–9 см);
- 5 – дисперсно-армированный набрызгбетон толщиной 9–12 см и анкерное крепление (АК + НБ 9–12 см);



Рис. 7. Номограмма для определения качества массива и типа крепления по Q [13]

Fig. 7. Nomogram of rock mass quality and support design by Q-system [13]

6 – дисперсно-армированный набрызгбетон толщиной 12 – 15 см, армированные (гибкая или жесткая арматура) набрызгбетонные ребра и анкерное крепление (АК + НБ 12 – 15 см + АНР);

7 – дисперсно-армированный набрызгбетон толщиной более 15 см, армированные (гибкая или жесткая арматура) набрызгбетонные ребра и анкерное крепление (АК + НБ > 15 см + АНР);

8 – монолитная железобетонная крепь или дисперсно-армированная набрызгбетонная крепь совместно с армированными (гибкая или жесткая арматура) набрызгбетонными ребрами и анкерным креплением (ЖБ или АК + НБ + АНР);

9 – данные условия требуют специального рассмотрения [14].

Для сокращения в модели используются аббревиатуры типов крепления, соответствующие: АК – анкерное крепление; НБ – набрызгбетон; АНР – армированные набрызгбетонные ребра; ЖБ – монолитная железобетонная крепь.

При креплении армированными набрызгбетонными ребрами рекомендуется использовать следующие варианты, обозначенные RRS I, RRS II и RRS III. Их параметры представлены ниже.

- RRS I:

Один слой из 6 арматур $\varnothing 16 – 20$ мм и 30 см набрызгбетона – для пролета до 10 м;

Два слоя из 6 и 2 арматур $\varnothing 16 – 20$ мм и 40 см набрызгбетона – для пролета до 20 м.

- RRS II:

Один слой из 6 арматур $\varnothing 16 – 20$ мм и 35 см набрызгбетона – для пролета до 5 м;

Два слоя из 6 и 2 арматур $\varnothing 16 – 20$ мм и 45 см набрызгбетона – для пролета до 10 м;

Два слоя из 6 и 4 арматур $\varnothing 20$ мм и 55 см набрызгбетона – для пролета до 20 м.

- RRS III:

Два слоя из 6 и 4 арматур $\varnothing 16 – 20$ мм и 40 см набрызгбетона – для пролета до 5 м;

Два слоя из 6 и 4 арматур $\varnothing 20$ мм и 55 см набрызгбетона – для пролета до 10 м;

Два слоя из 6 и 6 арматур $\varnothing 20$ мм и 70 см набрызгбетона – для пролета до 20 м.

RRS I, RRS II и RRS III рекомендуется использовать для выработок и сопряжений на участках, определенных в

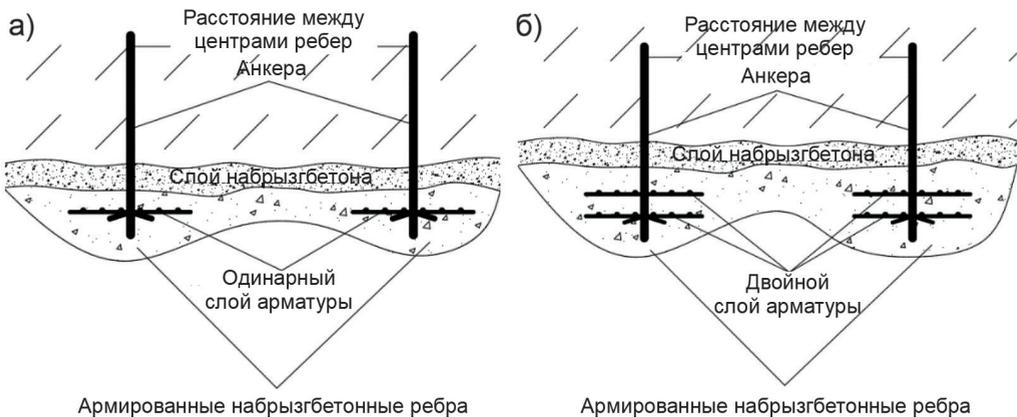


Рис. 8. Принципиальная схема конструкции армированных набрызгбетонных ребер: с оди́рным сло́ем из 6 арматур (а); с двойным сло́ем из 6 арматур (б)

Fig. 8. Basic diagram of reinforced shotcrete ribs: (a) one layer reinforcement using 6 bars; (b) double layer reinforcement using 6 bars

Таблица 4

Значения параметра ESR
ESR parameter

№	Тип выработки	ESR
1	Подготовительные выработки	3–5
2	Вертикальные выработки:	
	а) круглого сечения	2,5
	б) прямоугольного/квадратного сечения	2,0
3	Капитальные горные выработки, дренажные горные выработки	1,6
4	Подходные выработки	1,3
5	Подземные склады, водоочистные сооружения, порталы, сопряжения и т.д.	1,0

соответствии с распределением параметра Q в блочной модели (рис. 9–13).

Принципиальные схемы конструкции армированных набрызгбетонных ребер приведены на рис. 8.

Значение коэффициента типа выработки ESR зависит от срока службы и назначения выработки и определяется по табл. 4. Рассмотрены 2 варианта величины пролета капитальных и под-

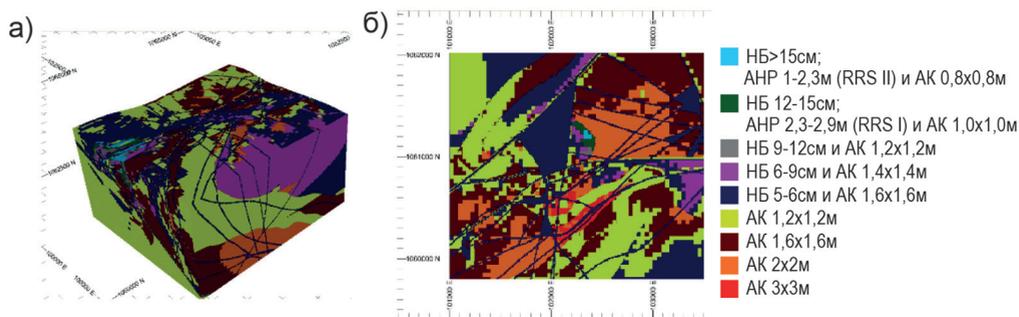


Рис. 9. Вид блочной модели с отображением типа крепления капитальных горных выработок пролетом 5 м: общий вид модели (а); сечение на горизонте –40 м (б)

Fig. 9. Block model with support system types for permanent excavations with span of 5 m: (a) general view; (b) cross-section of level -40 m

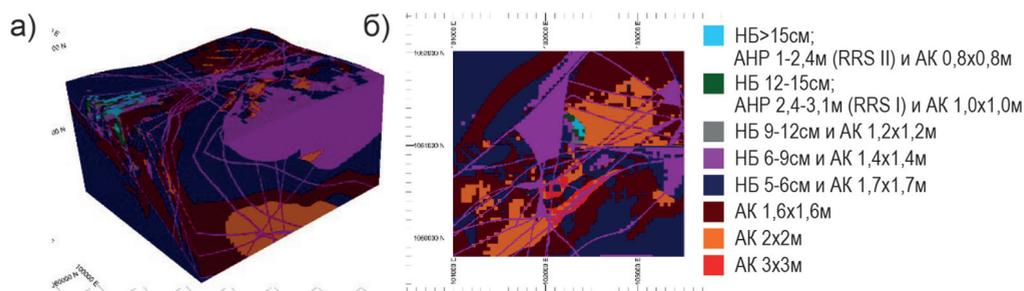


Рис. 10. Вид блочной модели с отображением типа крепления капитальных горных выработок пролетом 6 м: общий вид модели (а); сечение на горизонте –40 м (б)

Fig. 10. Block model with support system types for permanent excavations with span of 6 m: (a) general view; (b) cross-section of level -40 m

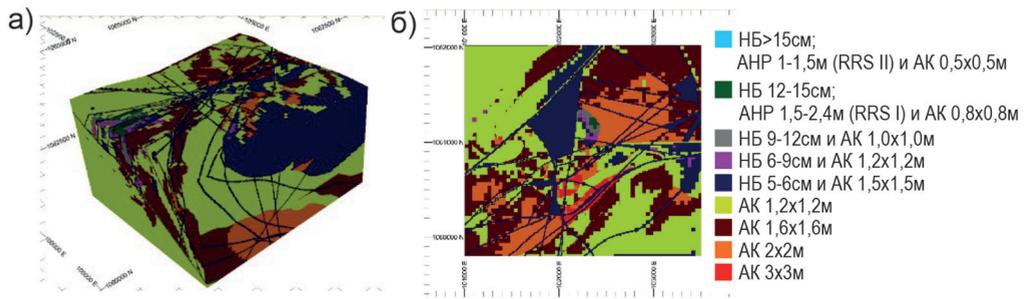


Рис. 11. Вид блочной модели с отображением типа крепления подготовительных горных выработок пролетом 5 м: общий вид модели (а); сечение на горизонте -40 м (б)

Fig. 11. Block model with support system types for development headings with span of 5 m: (a) general view; (b) cross-section of level -40 m

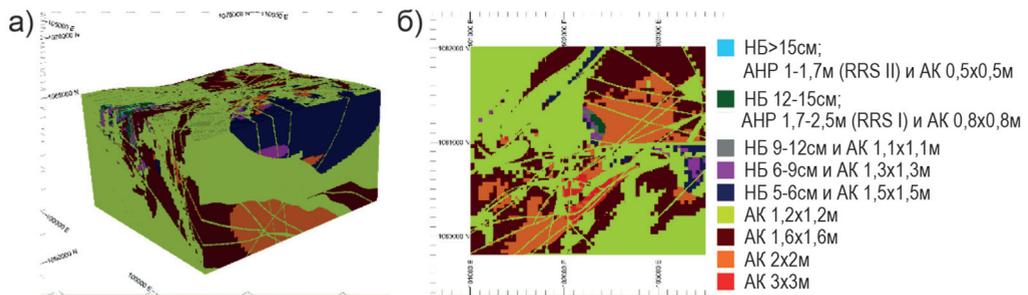


Рис. 12. Вид блочной модели с отображением типа крепления подготовительных горных выработок пролетом 6 м: общий вид модели (а); сечение на горизонте -40 м (б)

Fig. 12. Block model with support system types for development headings with span of 6 m: (a) general view; (b) cross-section of level -40 m

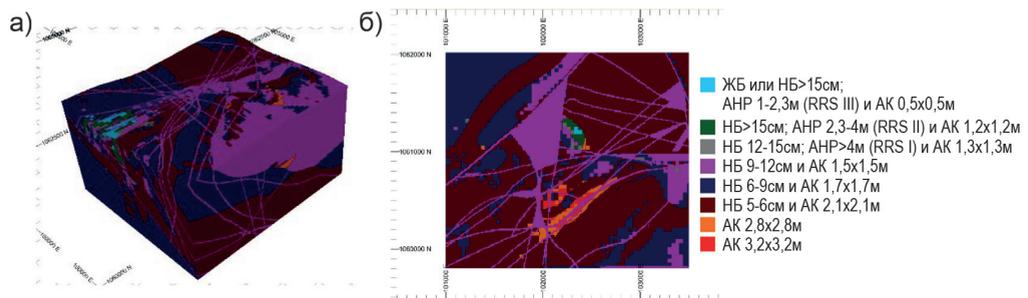


Рис. 13. Вид блочной модели с отображением типа крепления сопряжений горных выработок пролетом 10 м: общий вид модели (а); сечение на горизонте -40 м (б)

Fig. 13. Block model with mine support system types for junctions of excavations with span of 10 m: (a) general view; (b) cross-section of level -40 m

Таблица 5

**Значения параметра Пролет/ESR
Span/ESR ratio**

Назначение выработки	Капитальные выработки		Подготовительные выработки		Сопряжение горных выработок
	5 м	6 м	5 м	6 м	
Пролет	5 м	6 м	5 м	6 м	10
Пролет/ESR	3,1	3,8	1,7	2	10

готовительных выработок — 5 и 6 м, а также сопряжения пролетом 10 м. Получившиеся значения Пролет/ESR сведены в табл. 5.

Рассчитанные типы крепления для капитальных выработок пролетом 5 и 6 м отображены на рис. 9 и 10 соответственно.

Для подготовительных выработок пролетом 5 и 6 м — на рис. 11 и 12.

Модель определения типов крепления для сопряжений горных выработок шириной 10 м отображена на рис. 13.

Результаты анализа численного моделирования динамических форм проявления горного давления на контактах с разломными зонами

Влияние тектонических нарушений на перераспределение напряжений и, как следствие, на вероятность возникно-

вения горных ударов в массиве горных пород активно исследуется отечественными и зарубежными исследователями [15 – 16].

Методы численного моделирования позволяют определить возможность возникновения динамических явлений в окрестностях горных выработок, расположенных в контактной с тектоническими разломами зоне.

Для решения этой задачи построена трехмерная численная модель месторождения, вмещающая в себя горные выработки и выработанное пространство в соответствии с одной из потенциальных к применению систем разработки (с подэтажным обрушением и торцовым выпуском руды), а также тектонический разлом, расположенный в лежачем боку рудного тела. Расположение разлома в лежачем боку — это наиболее пессимистичный вариант для подземных горных

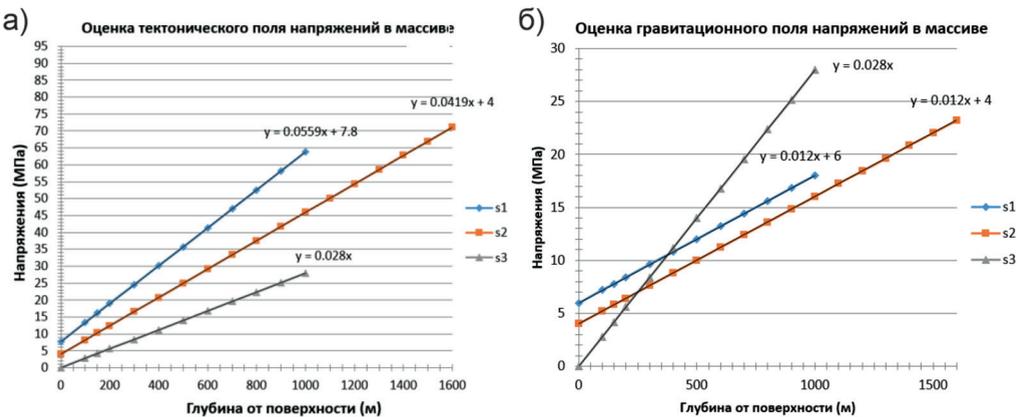


Рис. 14. График распределения главных напряжений в массиве: при тектоническом типе напряжений (а); при гравитационном типе напряжений (б)

Fig. 14. Plot of principal stresses in rock mass: (a) tectonic stresses; (b) gravitational stresses

Таблица 6

Сопоставление моментной магнитуды со шкалой Рихтера [17]
Comparison of the moment magnitude scale and the Richter scale [17]

Наименование	Значения			
	Новый Мадрид, 1812	Сан-Франциско, 1906	Аляска, 1964	Нортридж, 1994
Землетрясение				
Шкала Рихтера	8,7	8,3	8,4	6,4
Моментная магнитуда	8,1	7,7	9,2	6,7

выработок, так как в лежачем боку их концентрация является наибольшей.

В связи с тем, что на данной стадии изучения Олимпиадинского месторождения нет однозначного представления о типе и параметрах напряженно-деформированного состояния массива горных пород, на этапе численного моделирования рассмотрено 2 варианта природного поля напряжений: 1 – гравитационно-тектоническое с преобладанием гравитационной составляющей (далее гравитационное); 2 – гравитационно-тектоническое с преобладанием тектонической составляющей (далее тектоническое) (рис. 14).

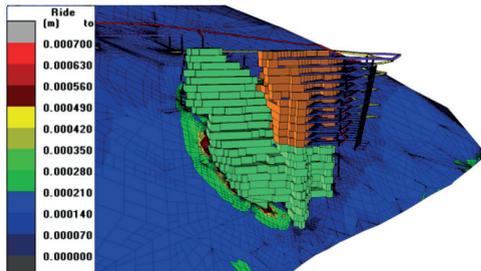
Для оценки возможности проявления динамических воздействий горного давления в ПО Мар3D определены значения смещений по тектоническому разлому. В соответствии с полученными значениями смещений выявлены моментные магнитуды, по которым уже

определялась вероятность возникновения динамических проявлений горного давления.

Моментная магнитуда при оценке динамических проявлений в массиве широко используется на Западе. Она хорошо коррелирует с магнитудами шкалы Рихтера, используемыми при оценке силы действия землетрясений (табл. 6).

При разработке месторождений, как правило, возникающие горные удары не достигают значений магнитуд, сопоставимых с магнитудами, действующими при разрушительных землетрясениях. Проявление динамических явлений в массиве горных пород обычно начинается при значениях моментных магнитуд 1 – 2. Поэтому для решения нашей задачи использованы значения моментных магнитуд (ММ) из табл. 7 [17]. Результаты расчета НДС при гравитационном и тектоническом типах напряжений показаны на рис. 15.

а)



б)

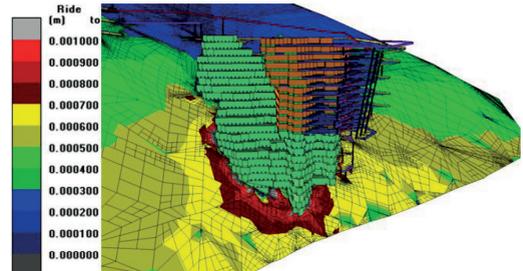


Рис. 15. Значения смещений по разлому в модели с подэтажным обрушением после отработки рудной зоны при гравитационном (а) и тектоническом типе НДС (б)

Fig. 15. Displacements along faulting in the model of completed sublevel caving: a–gravitational stresses; b–tectonic stresses

Таблица 7

Связь ММ с радиусом обрушения и со смещениями в массиве
Relationship of moment magnitude, hydraulic radius and displacements in rock mass

Наименование показателя	Значения						
	-2	-1	0	1	2	3	4
Моментная магнитуда							
Радиус обрушения (м)	0,75	1,25	5	12,5	25	75	125
Средние смещения (см)	0,002	0,02	0,04	0,18	1,5	5,08	57,9

Результаты анализа показали, что максимальные значения смещений массива в окрестностях горных выработок на контакте с тектоническим разломом при гравитационном типе НДС составляют порядка 0,07 см, что соответствует значениям моментной магнитуды между 0 и 1 (см. табл. 7).

В таком случае при гравитационном типе НДС вероятность возникновения динамических проявлений горного давления в окрестностях горных выработок на границах с разломами отсутствует. Необходимость в устройстве динамического крепления подземных горных выработок отпадает.

Максимальные значения смещений массива в окрестностях горных выработок на контакте с тектоническим разломом при тектоническом типе НДС составляют порядка 0,3 см, что соответствует значениям моментной магнитуды выше 1 (см. табл. 7). Критические значения смещений, соответствующие данным значениям моментных магнитуд, появляются в окрестностях подземных горных выработок ниже горизонта –315 м. Таким образом, откаточные штреки, по-

левые заезды и орты, расположенные ниже горизонта –315 м, рекомендуется крепить с помощью динамических типов крепления.

Заключение

В работе показана возможность использования методов трехмерного блочного и численного моделирования при определении необходимых систем и параметров крепления подземных горных выработок, а также при оценке вероятности проявления горного давления в динамической форме.

Полученные результаты предполагается использовать для определения систем крепления подземных горных выработок различного назначения на стадии проектирования.

Для получения более качественных результатов данного вида исследований необходимо дальнейшее изучение горно-геологических условий Олимпиадинского месторождения.

В перспективе, при строительстве подземных горных выработок необходима заверка и корректировка разработанной трехмерной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Земляной М. А. Анализ влияния горного давления на горнотехническое сооружение в условиях подготовки запасов минерального сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 4. – С. 25 – 26.
2. Брагин Е. П., Виткалов В. Г., Фам Чунг Нгуени Давление горных пород на механизированную крепь очистного забоя // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 10. – С. 37 – 40.
3. Ремезов А. В., Климов В. В. Исследование влияния опорного давления от очистного забоя и зон ПГД на горные выработки // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2011. – № 4 (86). – С. 40 – 43.

4. Сидоров Д. В. Геомеханическое обоснование безопасных параметров целиков между буродоставочными выработками в зонах повышенного горного давления // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2011. — № 1. — С. 374–378.
5. Сашурин А. Д., Коноваленко В. Я. Проблемы сдвижения горных пород и охраны сооружений при переходе к подземной разработке трубки «Удачная» // Горный журнал. — 2011. — № 8. — С. 77–79.
6. Gregory Paul Dyke. A quantitative correlation between the mining rock mass rating and in-situ rock mass rating classification systems. Johannesburg, 2006. 128 p.
7. Barton N. Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. Taylor & Francis Group, London, UK, 2007. 756 p.
8. Yetkin M. E., Ozfirat M. K., Yenice H., Simsir F., Kahraman B. Examining the relation between rock mass cuttability index and rock drilling properties // Journal of African Earth Sciences. 2016. Vol. 124. Pp. 151–158. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2016.09.025.
9. Meshram V. M., Dahale P. P., Tiwari M. S., Ramteke S. B. Advancement of support system for underground drift excavation – a review // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. No 6. Pp. 332–339.
10. Bieniawski Z. T. Engineering rock mass classifications. New York: Wiley, 1989, 251 p.
11. Аксой С. О. Системы классификации массивов горных пород: историческое развитие, области применения, ограничения // ФТПРПИ. — 2008. — № 1. — С. 56–68.
12. Методические указания по выбору типа и параметров крепи горных выработок в условиях Орловского рудника. — Усть-Каменогорск: ТОО «Корпорация Казахмыс», 2012. — 85 с.
13. Using the Q-system: Rock mass classification and support design, Handbook. Norwegian Geotechnical Institute (NGI), Oslo, 2015, 57 p.
14. Протосеня А. Г. Геомеханика: методические указания к курсовому проектированию. — СПб.: СПГУ, 2017. — 59 с.
15. Pham C., Chang C., Jang Y., Kutty A., Jeong J. Effect of faults and rock physical properties on in situ stress within highly heterogeneous carbonate reservoirs // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019. Vol. 185. Article 106601. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106601.
16. Naji A. M., Rehman H., Yoo H., Emad M. Z., Ahmad S., Kim J. J. Static and dynamic influence of the shear zone on rockburst occurrence in the headrace tunnel of the Neelum Jhelum hydropower project, Pakistan // Energies. 2019. Vol. 12. No 11. Article 2124. DOI: 10.3390/en12112124.
17. Loushnikov V. N. Practical aspects of geotechnical engineering in underground mining // KarGTU MEngSc — 2012. **МИАБ**

REFERENCES

1. Zemlyanoy M. A. Analysis of strata pressure effect on mine structure in the time of mineral mining preparation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no 4, pp. 25–26. [In Russ]
2. Bragin E. P., Vitkalov V. G., Fam Chung Ngueni Strata pressure on powered roof support in longwall face. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no 10, pp. 37–40. [In Russ]
3. Remezov A. V., Klimov V. V. Influence of abutment pressure and higher strata pressure zones on longwalls. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2011, no 4 (86), pp. 40–43. [In Russ]
4. Sidorov D. V. Geomechanical justification of safe design for pillars between drilling and haulage roadways in the zones of higher strata pressure. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta, Nauki o zemle.* 2011, no 1, pp. 374–378. [In Russ]
5. Sashurin A. D., Konvalenko V. Ya. Displacement of rocks and protection of structures in transition to underground mining at the Udachnaya pipe. *Gornyi Zhurnal.* 2011, no 8, pp. 77–79. [In Russ].

6. Gregory Paul Dyke. *A quantitative correlation between the mining rock mass rating and in-situ rock mass rating classification systems*. Johannesburg, 2006. 128 p.
7. Barton N. *Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy*. Taylor & Francis Group, London, UK, 2007. 756 p.
8. Yetkin M. E., Ozfirat M. K., Yenice H., Simsir F., Kahraman B. Examining the relation between rock mass cuttability index and rock drilling properties. *Journal of African Earth Sciences*. 2016. Vol. 124. Pp. 151 – 158. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2016.09.025.
9. Meshram V. M., Dahale P. P., Tiwari M. S., Ramteke S. B. Advancement of support system for underground drift excavation – a review. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018. Vol. 9. No 6. Pp. 332 – 339.
10. Bieniawski Z. T. *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley, 1989, 251 p.
11. Aksoy S. O. Rock mass classification systems: history, ranges of application, constraints. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2008, no 1, pp. 56 – 68. [In Russ].
12. *Metodicheskie ukazaniya po vyboru tipa i parametrov krepki gornykh vyrabotok v usloviyakh Orlovskogo rudnika* [Guidelines on support system design in the Orlovsky Mine, Kazakhmys PLC], Ust'-Kamenogorsk, TOO «Korporatsiya Kazakhmys», 2012. 85 p. [In Russ]
13. *Using the Q-system: Rock mass classification and support design*, Handbook. Norwegian Geotechnical Institute (NGI), Oslo, 2015, 57 p.
14. Protosenya A. G. *Geomekhanika: metodicheskie ukazaniya k kursovomu proektirovaniyu* [Geomechanics: Guidelines on engineering design], Saint-Petersburg, SPGU, 2017, 59 p.
15. Pham C., Chang C., Jang Y., Kutty A., Jeong J. Effect of faults and rock physical properties on in situ stress within highly heterogeneous carbonate reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. Vol. 185. Article 106601. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106601.
16. Naji A. M., Rehman H., Yoo H., Emad M. Z., Ahmad S., Kim J. J. Static and dynamic influence of the shear zone on rockburst occurrence in the headrace tunnel of the Neelum Jhelum hydropower project, Pakistan. *Energies*. 2019. Vol. 12. No 11. Article 2124. DOI: 10.3390/en12112124.
17. Loushnikov V. N. Practical aspects of geotechnical engineering in underground mining. KarGTU MEngSc – 2012.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Бушков Владимир Кириллович*¹ – канд. техн. наук, доцент, горный инженер, зав. лабораторией, e-mail: bushkovvk@polyus.com,

*Шеметов Роман Сергеевич*¹ – горный инженер, ведущий инженер, e-mail: shemetovrs@polyus.com, ¹ ООО «Полюс Проект».

Для контактов: Шеметов Р.С., e-mail: shemetovrs@polyus.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.K. Bushkov*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Mining Engineer, Head of Laboratory, e-mail: bushkovvk@polyus.com,

*R.S. Shemetov*¹, Mining Engineer, Leading Engineer, e-mail: shemetovrs@polyus.com,

¹ LLC «Polyus Project», 660041, Krasnoyarsk, Russia.

Corresponding author: R.S. Shemetov, e-mail: shemetovrs@polyus.com.

Получена редакцией 03.02.2020; получена после рецензии 10.04.2020; принята к печати 20.08.2020.

Received by the editors 03.02.2020; received after the review 10.04.2020; accepted for printing 20.08.2020.