

Моделирование полей напряжений и оценка удароопасности конструктивных элементов системы разработки Южно-Хинганского месторождения марганцевых руд

М.И. Рассказов²✉, И.Ю. Рассказов¹, М.И. Потапчук², Д.И. Цой², А.А. Терёшкин²

¹Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация

²Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация

✉ rasm.max@mail.ru

Резюме: Крупномасштабная и интенсивная техногенная деятельность, к которой относятся выемка и перемещение больших объёмов горных пород при разработке месторождений твёрдых полезных ископаемых, оказывает значительное влияние на естественное напряжённо-деформированное состояние горного массива и часто приводит к активизации геодинамических процессов. Проявлением геодинамической активизации являются горно-тектонические удары, техногенная и наведённая сейсмичность, а также другие опасные геодинамические явления, прогнозирование которых представляет собой актуальную и одновременно весьма сложную проблему. В статье приведены геомеханические исследования по оценке потенциальной удароопасности массива горных пород Южно-Хинганского месторождения марганцевых руд. Изучены горно-геологические, горнотехнические условия разработки месторождения, определены параметры физико-механических свойств вмещающих пород и руд, определена степень удароопасности образцов горных пород при трёхосном сжатии и выполнена оценка склонности горных пород к динамическим разрушениям по критерию А.Н. Ставрогина. Методами численного моделирования произведена оценка удароопасности конструктивных элементов системы разработки месторождения.

Ключевые слова: горные породы, рудоносный блок, физико-механические свойства, трёхосное сжатие, удароопасность, система разработки, математическое моделирование, напряжённо-деформированное состояние

Благодарности: Исследования проводились с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных Дальневосточного отделения Российской академии наук», финансируемого Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования РФ по проекту №075-15-2021-663.

Для цитирования: Рассказов М.И., Рассказов И.Ю., Потапчук М.И., Цой Д.И., Терёшкин А.А. Моделирование полей напряжений и оценка удароопасности конструктивных элементов системы разработки Южно-Хинганского месторождения марганцевых руд. *Горная промышленность*. 2023;(5S):72–79. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-72-79>

Modeling of stress fields and estimation of the impact hazard of structural elements of the mining system of the Yuzhno-Khingansk manganese ore deposit

M.I. Rasskazov²✉, I.Yu. Rasskazov¹, M.I. Potapchuk², D.I. Tsoi², A.A. Tereshkin²

¹Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation

²Mining Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation

✉ rasm.max@mail.ru

Abstract: Large-scale and intensive anthropogenic activity, which includes excavation and transportation of large volumes of rocks during the development of solid minerals deposits, has a significant impact on the natural stress-strain state of the rock massif and often leads to activation of geodynamic processes. The forecast of geodynamic activation, which is manifested through rock-tectonic bursts, man-made and induced seismicity and other hazard geodynamic phenomena, is an urgent and a very difficult problem. Geomechanical studies to assess the potential impact hazard of the rock mass at the Yuzhno-Khingansk manganese ore deposit are presented in the article. The mining, geological and technical conditions of the deposit development were studied, the parameters of the physical and mechanical properties of the host rocks and ores were determined. The degree of impact hazard of the rock samples under triaxial compression was determined as well as susceptibility of rocks to dynamic fractures was assessed according to the Stavrogin's criterion. Numerical modeling methods were used to assess the impact hazard of structural elements of the field mining system.

Keywords: rocks, ore-bearing block, physical and mechanical properties, triaxial compression, impact hazard, mining system, mathematical modeling, stress-strain state

Acknowledgments: The studies were carried out using the resources of the Center for Shared Use of Scientific Equipment "Center for Processing and Storage of Scientific Data of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences", funded by the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under project No.075-15-2021-663.

For citation: Rasskazov M.I., Rasskazov I.Yu., Potapchuk M.I., Tsoi D.I., Tereshkin A.A. Modeling of stress fields and estimation of the impact hazard of structural elements of the mining system of the Yuzhno-Khingansk manganese ore deposit. *Russian Mining Industry*. 2023;(5S):72–79. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-72-79>

Введение

Одними из наиболее сложных проблем подземной разработки месторождений полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях и на больших глубинах являются прогноз и предотвращение опасных проявлений горного давления, нередко приводящих к катастрофическим последствиям [1–6]. Достаточно остро проблема безопасности стоит на Дальнем Востоке России, где действует целый ряд крупных и средних рудников, на которых наблюдается весь спектр динамических форм проявления горного давления вплоть до сильных с тяжелыми последствиями горных и горно-тектонических ударов.

Проявлением геодинамической активизации являются горно-тектонические удары, техногенная и наведённая сейсмичность, а также другие опасные геодинамические явления, прогнозирование которых представляет собой актуальную и одновременно весьма сложную проблему [7–16]. Это обусловлено многофакторностью условий и причин этих опасных явлений, многообразием горнотехнических и горно-геологических характеристик исследуемых объектов, неоднородностью напряжённо-деформированного состояния и значительными вариациями физико-механических свойств массивов горных пород, изменяющихся при интенсивном техногенном воздействии. Надёжный прогноз таких катастрофических событий затруднён ещё и потому, что поведение предельно напряжённого массива горных пород, рассечённого тектоническими нарушениями, породными контактами и содержащего горные выработки различных форм и размеров, далеко не всегда может быть описано с помощью известных классических подходов.

Объектом исследований является Южно-Хинганское месторождение марганцевых руд, расположенное на территории Октябрьского района Еврейской автономной области. Его геодинамическая позиция и приуроченность к тектонически активным структурам в южной части Буреинского срединного массива на стыке крупных современных морфологических элементов региона: Средне-Амурской рифтогенной впадины и Буреинского хребта [17], что часто предопределяет склонность месторождения к горным ударам при ведении подземных горных работ, послужили основанием для постановки геомеханических исследований.

Методы и результаты исследований

Мировая практика показывает, что обоснование наиболее рациональной системы разработки месторождения возможно только после комплексного и детального изучения и определения физико-механических свойств горных пород [18–23]. В геологическом разрезе Южно-Хинганского

месторождения выделяется более 20 литолого-петрографических разновидностей пород. Анализ геолого-структурной ситуации показал, что для обоснованного выполнения работ по геодинамическому районированию месторождения наиболее важно получить усредненные физико-механические параметры надрудного F_3 , рудного F_2 и подрудного F_1 горизонтов, а также перекрывающего их горизонта L_1 и подстилающих горизонтов M_2 и M_1 ¹.

Южно-Хинганское месторождение сложено известняками, карбонатными породами доломитового состава и сланцами верхнепротерозойской хинганской толщи, а также нижнекембрийскими известняками лондоковской свиты [24; 25], прорванными дайками основных пород. Осадочные породы собраны в изоклинальную складку, опрокинутую на восток. К востоку от месторождения Поперечного, на правом берегу р. Самары картируется массив, сложенный гранитоидами биробиджанского комплекса. Пегматоиды и гранит-порфиры в истоках р. Столбухи, левый берег, в пределах рудного поля, актинолитизированы и березитизированы. Основным породам восточного фланга участка Поперечного характерен кайнотипный облик, мелкозернистое строение. Они относятся к габбро, габбро-диоритам. Габбро-диориты слагают довольно протяженные дайкообразные тела субмеридиональной ориентировки, отстоящие от рудного тела, северное на 50 м, южное – на 100–150 м. Породы, слагающие северную дайку, слабо карбонатизированы и хлоритизированы. Породы южной дайки на отдельных участках существенно пропилитизированы.

Основные запасы Южно-Хинганского месторождения сосредоточены на участке «Поперечный», который представляет собой линейный рудоносный блок шириной от 40 до 80 м (в среднем – 50 м) и длиной 240 м, содержащий крутопадающий рудовмещающий горизонт, разбитый поперечными и продольными разломами на блоки более высокого ранга. Рудные тела представлены крутопадающими маломощными пластообразными залежами, которые прослеживаются по простиранию на сотни метров [26].

Месторождение разрабатывается подземным способом. Для выемки запасов применяются система разработки с магазинированием руды (при мощности рудного тела до 3 м) на горизонтах +210 м и +100 м и система с поэтажными штреками (при мощности рудного тела 3,0–4,0 м и выше) со шпуровой или скважинной отбойкой на горизонтах +160 м и +40 м. Предусматриваются следующие параметры систем разработки: 1 – длина выемочных блоков – 50 м; 2 – высота выемочных блоков определяется высотой этажей и составляет 50–60 м; 3 – ширина выемочных блоков определяется мощностью рудного тела, но не менее 1,0 м.

¹ Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000. Лист М-52: Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ; 2012.

Для получения образцов горных пород вдоль расположенного в центральной части участка «Поперечный» в профиле XLII был пробурен ряд наклонных скважин (глубиной 30–85 м) общей длиной 280 м и произведен отбор керна (рис. 1). Полученный керн диаметром 63 мм позволил изготовить для дальнейших исследований образцы и получить статистически представительный материал по маломощному рудному горизонту, дважды вскрытый скважинами на разных глубинах.

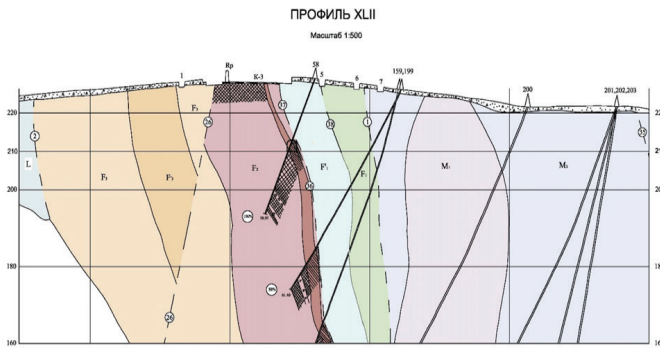


Рис. 1
Профиль XLII Южно-Хинганского месторождения, масштаб 1–500

Fig. 1
Profile XLII of the Yuzhno-Khingansk field, scale 1-500

Анализ физико-механических свойств пород и руд Южно-Хинганского месторождения показал, что практически все они (за исключением слоистых и сланцеватых доломитов) являются достаточно прочными (предел прочности на одноосное сжатие изменяется от 82,3 до 174 МПа) и высокоупругими (модуль Юнга лежит в диапазоне 72,5–98,6 ГПа). Результаты исследований показывают, что большинство горных пород, которые встречаются на участке «Поперечный» Южно-Хинганского месторождения, относятся к породам с высокой прочностью и жесткостью. Негативным фактором также является и то, что все горные породы (F_1, F_2, F_3), в пределах которых планируется

очистная выемка, являются почти в 2 раза более прочными нежели окружающие их M_2 и L . Это будет способствовать более высокому уровню напряжений в участках массива горных пород, где будут вестись основные горные работы (табл. 1).

Также неблагоприятным фактором является большая вариация прочностных и упругих параметров пород внутри групп, связанная с разнообразием их литологического состава. Например, увеличение предела прочности на растяжение закономерно коррелирует с обогащением горных пород кремнеземом (кварц и его модификации – горизонты F_2 и M_1), что характеризует эти породы как весьма хрупкие и способные разрушаться в динамической форме. Показатель хрупкости, который представляет собой отношение предела прочности пород на сжатие к пределу прочности на растяжение, для всех типов пород и руд месторождения превышает 15.

Плотность изученного разреза пород в целом превышает соответствующие справочные характеристики аналогичных метаморфизованных разновидностей. Это обстоятельство объясняется аномальной сульфидизацией пород всего разреза, визуально наблюдаемой нами при просмотре коллекции.

Таким образом, результаты выполненных исследований дают основания считать горные породы и руды Южно-Хинганского месторождения потенциально удароопасными.

В ходе данной работы проводились исследования горных пород (браунитовая руда) на трёхосное сжатие. Подготовленные образцы имели форму цилиндра с отношением высоты к диаметру равным 2, а их количество составляло 6 шт. (рис. 2). Данные образцы были разделены на три группы, которые были испытаны с разным боковым давлением – 30, 45 и 60 МПа.

Оценку склонности горных пород к динамическим разрушениям выполняли по критерию А.Н. Ставрогина [27] на основании сопоставления модуля упругости и модуля спада. В том случае, когда отношение этих величин (коэффициент удароопасности K_1) меньше или равно единице ($K_1 \leq 1$), порода считается склонной к динамическому разрушению. Если же величина коэффициента удароопасно-

Таблица 1
Параметры физико-механических свойств пород участка «Поперечный» Южно-Хинганского месторождения

Table 1
Parameters of physical and mechanical properties of rocks of the Poperechny area of the Yuzhno-Khingansk deposit

Группа пород по стратотипу	Тип пород	Предел прочности при одноосном сжатии, МПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Коэффициент Пуассона	Модуль Юнга, ГПа
L (Лондоковская свита)	Черные битуминозные массивные и плитчатые известняки	$\frac{24,9 + 120,9}{82,3}$	$\frac{0,23 + 1,28}{0,74}$	$\frac{0,30 + 0,54}{0,43}$	$\frac{60,9 + 89,9}{72,5}$
F_3 (нерудный – F_3')	Углисто-глинистые и кремнисто-глинистые сланцы с доломитовыми песчаниками	$\frac{29,4 + 248,1}{112,1}$	$\frac{1,41 + 3,36}{2,39}$	$\frac{0,21 + 0,37}{0,28}$	$\frac{41,5 + 106,1}{74,6}$
F_2 (рудный – железорудный)	Руда с магнетитовыми микрокварцитами и хлорит-доломитовыми брекчиями	$\frac{25,1 + 120,6}{98,4}$	$\frac{2,93 + 5,06}{4,26}$	$\frac{0,13 + 0,47}{0,28}$	$\frac{39,2 + 111,2}{75,3}$
F_1 (нерудный F_1')	Кремнистые и углисто-глинистые сланцы, доломитовые брекчии и песчаники с прослоями	$\frac{28,6 + 222,1}{121,0}$	$\frac{1,15 + 3,88}{2,53}$	$\frac{0,19 + 0,33}{0,26}$	$\frac{52,5 + 98,8}{74,4}$
M_1 (Мурандовская свита – нижний слой)	Кремнистые доломиты и плотные доломиты	$\frac{48,9 + 274,1}{174,0}$	$\frac{3,67 + 6,01}{4,94}$	$\frac{0,19 + 0,43}{0,31}$	$\frac{54,2 + 134,4}{98,6}$



Рис. 2
Образцы исследуемых
скальных пород (браунитовая
руда) на трёхосное сжатие

Fig. 2
Samples of rocks (brownite
ore) for triaxial compression
tests

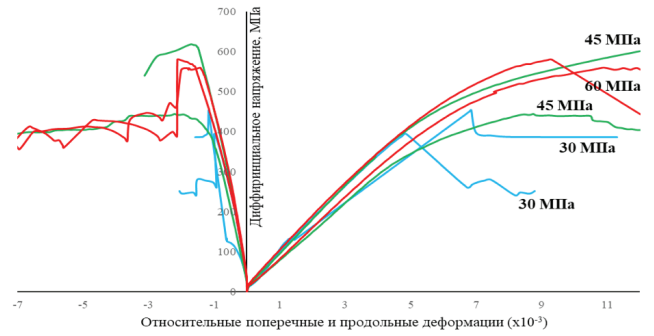


Рис. 3
Графики деформирования
образцов браунитовой руды
в условиях трёхосного сжатия

Fig. 3
Deformation graphs
of the brownite ore samples
under triaxial compression

сти больше единицы ($K_1 > 1$), то порода считается не склонной к динамическим видам разрушения (табл. 2):

$$K_1 = E/M, \tag{1}$$

где E – модуль упругости, МПа; M – модуль спада, МПа.

Графики деформирования образцов браунитовой руды до предела прочности имеют выпуклую форму, а на пределе прочности образуется площадка с постепенным снижением величин дифференциального напряжения и последующим достаточно резким обрывом (рис. 3). Подобный характер деформирования соответствует хрупким породам. Разрушение всех образцов происходило в ярко выраженном динамическом режиме с сильным звуком. При этом образовывалась чётко выраженная плоскость разрушения.

Для исследования закономерностей перераспределения исходных напряжений в массиве горных пород при разработке месторождений широко применяются расчетные методы, в том числе метод конечных элементов (МКЭ), разработанный для численного моделирования в плоской и объемной постановке задач [28–31].

Оценку напряженно-деформированного состояния массива горных пород Южно-Хинганского месторождения выполняли в два этапа: вначале изучали изменение НДС

в массиве пород с глубиной по мере отработки месторождения и понижения горных работ, а затем более детально исследовали перераспределение напряжений в районе очистных блоков с выделением зон повышенных напряжений в элементах систем разработки.

По результатам выполненного анализа геомеханических условий Южно-Хинганского месторождения установлено, что в его верхней (нагорной) части действует гравитационное поле напряжений, в котором вертикальные и горизонтальные компоненты тензора напряжений зависят от глубины и плотности горных пород. Напряженное состояние массива верхней части может быть представлено, как

$$\begin{cases} \sigma_z = \rho g(z - z_0) \\ \sigma_x = K_p \sigma_z \\ \sigma_{xz} = 0. \end{cases} \tag{2}$$

Параметры основных конструктивных элементов систем разработки, использованные при моделировании, были приняты (табл. 3) в соответствии с обоснованными на предпроектной стадии технологическими решениями².

Расположение основных горных выработок было принято в соответствии с геологическим строением месторождения и параметрами принимаемых технологий.

Таблица 2
Результаты определения прочности горных пород при
трёхосном сжатии (боковое давление 30, 45, 60 МПа)

Table 2
The results of determining the strength of rocks under triaxial
compression (the lateral pressure of 30, 45, 60 MPa)

Номер образца	Литотип	Модуль деформации*, $\times 10^{-3}$ МПа		Модуль спада, $\times 10^{-3}$ МПа		Коэффициент поперечной деформации*		Коэффициент удароопасности K_1		Степень удароопасности
		образца	пробы	образца	пробы	образца	пробы	образца	пробы	
1–30	Руда браунитовая	85,10	86,24	132,05	283,87	0,17	0,20	0,64	0,60	Удароопасная
2–30		117,65		601,68		0,28		0,19		
1–45		83,61		704,52		0,18		0,12		
2–45		71,65		77,94		0,19		0,92		
1–60		82,96		98,25		0,21		0,84		
2–60		76,47		88,81		0,18		0,86		

² Обоснование параметров системы разработки Южно-Хинганского месторождения марганцевых руд на предпроектной стадии его освоения: Отчет о НИР ИГД ДВО РАН. Рук. И.Ю. Рассказов. Хабаровск: ИГД ДВО РАН, 2008. 27 с.

Таблица 3
Основные параметры конструктивных элементов систем разработок

Table 3
Main parameters of structural elements of mining systems

Вариант системы разработки	Значения параметров конструктивных элементов системы разработки	
	Мощность надштрекового целика, м	Мощность подштрекового целика (потолочины), м
С магазинированием руды	5–6	3–4
Подэтажными штреками	5	5–6

Для оценки напряжений в конструктивных элементах предлагаемых систем разработки (подэтажными штреками и с магазинированием руды) было выполнено объемное моделирование постадийной отработки очистного блока в этаже 20–100 м.

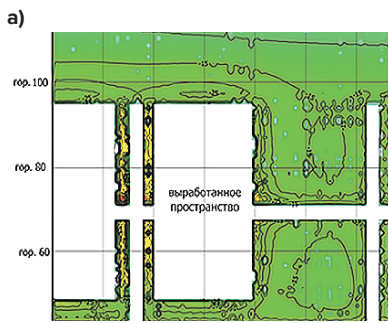


Рис. 4
Распределение первых главных напряжений в массиве горных пород:
а – при отработке 50% очистного блока;
б – при полной отработке очистного блока в этаже 20–100 м (в проекции на наклонную плоскость)

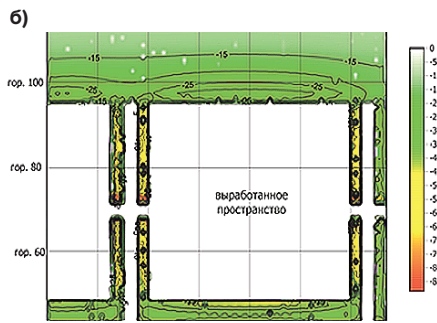


Fig. 4
Distribution of the first principal stresses in the rock mass:
а – during mining of 50% of the stope;
б – when the stope is mined completely at the level of 20–100 m (in projection onto an inclined plane)

Анализ результатов численного моделирования НДС на различных стадиях отработки очистного блока показал, что отработка месторождения системой подэтажными штреками приводит к формированию сложного техногенного поля напряжений. Наиболее высокий уровень напряжений отмечен в междукамерных целиках, преимущественно в краевых частях со стороны подэтажного штрека с отм. +70 м. По мере отработки очистного блока происходит прямо пропорциональный рост величины максимальных сжимающих и касательных напряжений, величина которых достигает максимума (до 85 и 40 МПа соответственно) при полной отработке блока (рис. 4, 5, 7). Полная отработка очистного блока приводит к формированию области повышенных напряжений в центральной части надштрекового целика гор. +40 м со стороны отработанной камеры (главные нормальные и касательные напряжения достигают 65 и 35 МПа соответственно), что повышает вероятность

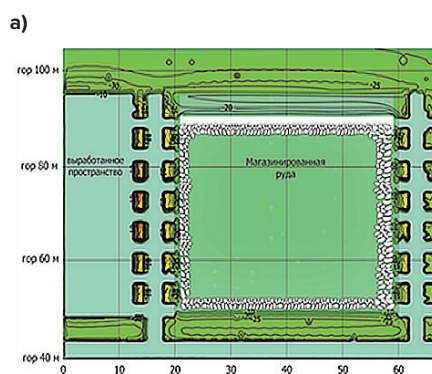


Рис. 6
Распределение первых главных напряжений в массиве горных пород при высоте магазина 40 м: а – проекция на наклонную плоскость;
б – разрез вкрест простираения рудного тела по линии междукамерного целика

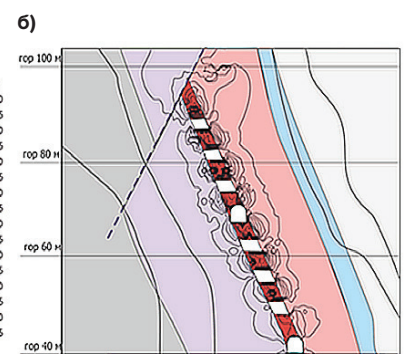


Fig. 6
Distribution of the first principal stresses in a rock mass with a shrink stope height of 40 m: а – projection onto an inclined plane;
б – cross section of the ore body along the line of the inter-chamber pillar

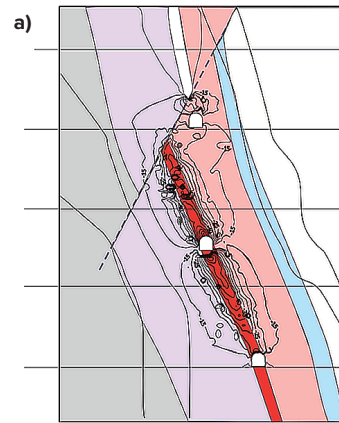


Рис. 5
Распределение максимальных сжимающих напряжений в массиве горных пород (разрез вкрест простираения рудного тела по линии междукамерного целика) при: а – $L = 20$ м, б – $L = 40$ м

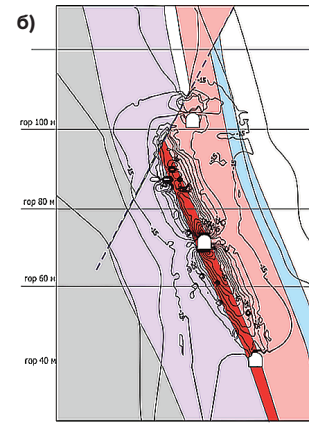


Fig. 5
Distribution of the maximum compressive stresses in the rock mass (cross section of the ore body along the strike of the ore body along the line of the inter-chamber pillar) at: а – $L = 20$ м, б – $L = 40$ м

динамических проявлений горного давления при его погашении.

С использованием системы с магазинированием руды концентрация напряжений наблюдается в междукамерных целиках, а также в краевых частях рудного блока, еще на промежуточной стадии отработки очистного блока (при высоте магазина 20 м). Увеличение высоты магазина приводит к росту первых главных σ_1 и касательных напряжений в целиках на 20–25%, значения которых достигают 70 и 45 МПа (рис. 6, 7) соответственно. Кроме этого, наиболее нагруженными являются междукамерные целики со стороны отработанного очистного блока.

Повышение удароопасности в районе междукамерных целиков прогнозируется при полной отработке блока (полном выпуске магазинированной руды из очистного блока), когда значения первых главных σ_1 (85 МПа) приближаются

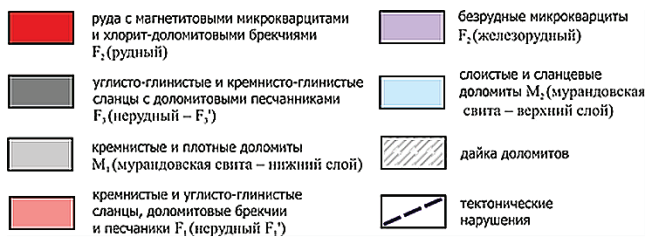


Рис. 7
Условные обозначения горных пород

Fig. 7
Legend of rocks

к пределу прочности на сжатие, касательных напряжений (55 МПа) – к пределу прочности на сдвиг. Увеличение глубины отработки приведет к повышению потенциальной удароопасности этих элементов системы разработки.

Исходя из анализа полученных результатов численного моделирования НДС и опыта отработки месторождений, имеющих схожие горно-геологические условия отработки, можно сделать вывод, что менее удароопасной является система подэтажных штреков, так как при ее применении нагруженными являются лишь краевые части междукамерных целиков. Отработка рудных запасов с использованием системы разработки с магазинированием руды приводит к формированию большого количества потенциально удароопасных рудных междукамерных целиков, что создает условия для динамических проявлений горного давления.

Таким образом, по результатам моделирования установлено, что при отработке месторождения до гор. –20 м наиболее напряженными элементами системы разработки являются рудные (междукамерные и междуэтажные) целики, а также породные участки и области вдоль тектонических разломов. При этом максимальные значения первых

главных σ_1 напряжений в рудных междуэтажных целиках составляют 50–55 МПа, на породных участках массива – 65 МПа, что не превышает предельных значений. Величина касательных напряжений на этих участках не превышает 30 МПа при предельных значениях: для руды – 58,3 МПа, для породного массива – 55,6 МПа. Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии условий для динамических проявлений горного давления и в целом неудароопасных условиях ведения горных работ.

При отработке нижней части месторождения (ниже гор. –20 м) величина напряжений в междукамерных, над- и подштрековых целиках, а также в отдельных безрудных участках массива достигает 100 МПа и более, что приближается (а в отдельных случаях превышает) к пределу прочности пород на сжатие и сдвиг, указывая на их потенциальную удароопасность и высокую вероятность разрушения в динамической форме конструктивных элементов систем разработки.

Заключение

Представленные в статье исследования позволяют сделать вывод, что геомеханические условия Южно-Хинганского месторождения и выявленные закономерности распределения напряжений в элементах систем разработки дают основания для его отнесения к склонным к горным ударам. В дальнейшем предполагается разработать комплекс организационно-технических мероприятий по предотвращению горных ударов и при достижении глубины отработки 300 м рекомендуется применение специальных технических средств для оценки удароопасности, включая автоматизированную сейсмоакустическую систему контроля горного давления «Prognoz-ADS» и локальный прибор «Prognoz L».

Список литературы

- Foulger G.R., Wilson V.P., Gluyas J.G., Julian B.R., Davies R.J. Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*. 2017;178:438–514. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008>
- Адушкин А.А. Развитие техногенно-тектонической сейсмичности в Кузбассе. *Геология и геофизика*. 2018;59(5):709–724. <https://doi.org/10.15372/GiG20180510>
- Marcak H., Mutke G. Seismic activation of tectonic stresses by mining. *Journal Seismology*. 2013;17(4):1139–1148. <https://doi.org/10.1007/s10950-013-9382-3>
- Liu J.-P., Feng X.-T., Van Aswegen G., Blake W., Srinivasan C., Rao M. V. M. S., Zembaty Z. Case histories of rockbursts at metal mines. In: Feng X.-T. (ed.) *Rockburst. Mechanisms, Monitoring, Warning, and Mitigation*. Elsevier Inc.; 2018. Chapter 3, pp. 47–92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805054-5.00003-2>
- He M., Ren F., Liu D. Rockburst mechanism research and its control. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018;28(5):829–837. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.09.002>
- Batugin A., Kolikov K., Ivannikov A., Ignatov Yu., Krasnoshtanov D. Transformation of the geodynamic hazard manifestation forms in mining areas. In: *19th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference SGEM 2019, 30 June – 6 July, 2019*;19(1.3):717–724. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/1.3/S03.091>
- Rasskazov M.I., Rasskazova A.V., Potapchuk M.I., Teryoshkin A.A. Geomechanical substantiation of measures of safety in the process of development of the Southern Hingansk deposit. In: *Rock mechanics for natural resources and infrastructure development: Proceedings of the 14th International congress on rock mechanics and rock engineering, Foz Do Igvasu, Brazil, September 13–18, 2019*. London: Taylor & Francis Group; 2020, pp. 793–799.
- Жукова С.А., Журавлева О.Г., Онуприенко В.С., Стрешнев А.А. Особенности сейсмического режима массива горных пород при отработке удароопасных месторождений Хибинского массива. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(7):5–17. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_7_0_5
- Salamon M.D.G. Rockburst hazard and the fight for its alleviation in South African gold mines. In: *Rockbursts: prediction and control*. London: Institution of Mining and Metallurgy; 1984, pp. 11–36.
- Петухов И.М., Егоров П.В., Винокур Б.Ш. Предотвращение горных ударов на рудниках. М.: Недра; 1984. 230 с.
- Рассказов И.Ю., Курсакин Г.А., Потапчук М.И., Рассказов М.И. Геомеханическая оценка технологических решений при проектировании горных работ в удароопасных условиях. *Записки Горного института*. 2012;198:80–85. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5919>
- Козырев А.А. Геомеханическое обоснование ведения горных работ на удароопасных месторождениях. *Горная промышленность*. 2023;(S1):4–13. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-04-13>
- Куранов А.Д., Багаутдинов И.И., Котиков Д.А., Зуев Б.Ю. Комплексный подход к прогнозу устойчивости предохранительно-

- го целика при слоевой системе разработки запасов Яковлевского месторождения. *Горный журнал*. 2020;(1):115–119. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.23>
14. Козырев А.А., Панин В.И., Семенова И.Э., Рыбин В.В. Геомеханическое обеспечение горных работ на горнодобывающих предприятиях Мурманской области. *Горный журнал*. 2019;(6):45–50. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.06.05>
 15. Rasskazov M., Rasskazov I., Gladys A., Tereshkin A., Tsoi D., Rasskazova A. Research and assessment of the rock burst hazardous of the Kola Peninsula mineral deposits by seismic-acoustic monitoring data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;833:012126. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/833/1/012126>
 16. Лукичев С.В., Наговицын О.В. Информационная поддержка освоения и эксплуатации месторождений Хибинского горнорудного района. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2012;(6):98–105.
 17. Архипов Г.И. *Дальневосточная черная металлургия: железорудносырьевая база и возможности развития*. Хабаровск: Институт горного дела ДВО РАН; 2005. 234 с.
 18. Потапчук М.И., Терешкин А.А., Рассказов М.И. Оценка геомеханического состояния массива горных пород при отработке сложноструктурных рудных тел системой подэтажными штреками с управляемым обрушением кровли. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(12):39–45.
 19. Чебан А.Ю. Технология разработки крутопадающих рудных тел с применением дистанционно управляемого горного оборудования. *Маркшейдерский вестник*. 2019;(2):56–60.
 20. Рассказов М.И., Потапчук М.И., Цой Д.И., Терешкин А.А., Гладырь А.В. Изучение горно-геологических особенностей и определение физико-механических свойств горных пород золоторудного месторождения Делькен. *Проблемы недропользования*. 2020;(2):116–126. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2020.02.116>
 21. Козырев А.А., Каспарьян Э.В., Кузнецов Н.Н., Шоков А.Н. Анализ условий разрушения скальных горных пород в динамической форме при трёхосном сжатии. *Наукофера*. 2020;(11-2):77–85.
 22. Каспарьян Э.В., Кузнецов Н.Н., Шоков А.Н., Пак А.К. Исследование условий динамических разрушений в массивах скальных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(4):69–84. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-4-0-69-84>
 23. Cai M. Prediction and prevention of rockburst in metal mines – A case study of Sanshandao gold mine. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2016;8(2):204–211. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.11.002>
 24. Чеботарев М.В. Геологическое строение Южно-Хинганского марганцевого месторождения и вещественный состав его руд. *Советская геология*. 1958;(8):114–136.
 25. Запорожцев В.М., Пустовойтова И.В. Современные представления о стратиграфии Кимканского рудного района и геологическое строение Сугарского месторождения железистых кварцитов. *Разведка и охрана недр*. 2013;(11):69–76.
 26. Рассказов И.Ю., Саксин Б.Г., Потапчук М.И., Усиков В.И. Геомеханическая оценка условий разработки Южно-Хинганского месторождения марганцевых руд. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2014;(1):13–22.
 27. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. М.: Недра; 1985. 271 с.
 28. Фадеев А.Б. *Метод конечных элементов в геомеханике*. М.: Недра; 1987. 221 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/16260>
 29. Зотеев О.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород численными методами. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2003;(5).
 30. Бокий И.Б., Зотеев О.В., Пуль В.В., Пуль Э.К. Выбор исходных данных для численного моделирования напряженного состояния горного массива в районе Мирнинского ГОКа АК «Алроса». *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2017;4(3):38–42.
 31. Багаутдинов И.И., Беляков Н.А., Севрюков В.В., Рассказов М.И. Применение модели упрочняющегося грунта для прогноза зоны пластических деформаций массива слабоустойчивых пород Яковлевского железорудного месторождения. *Горный журнал*. 2022;(12):16–21. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.12.03>

References

1. Foulger G.R., Wilson V.P., Gluyas J.G., Julian B.R., Davies R.J. Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*. 2017;178:438–514. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008>
2. Adushkin V.V. Technogenic tectonic seismicity in Kuzbass. *Geologiya i Geofizika*. 2018;59(5):709–724. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG20180510>
3. Marcak H., Mutke G. Seismic activation of tectonic stresses by mining. *Journal Seismology*. 2013;17(4):1139–1148. <https://doi.org/10.1007/s10950-013-9382-3>
4. Liu J.-P., Feng X.-T., Van Aswegen G., Blake W., Srinivasan C., Rao M. V. M. S., Zembaty Z. Case histories of rockbursts at metal mines. In: Feng X.-T. (ed.) *Rockburst. Mechanisms, Monitoring, Warning, and Mitigation*. Elsevier Inc.; 2018. Chapter 3, pp. 47–92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805054-5.00003-2>
5. He M., Ren F., Liu D. Rockburst mechanism research and its control. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018;28(5):829–837. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.09.002>
6. Batugin A., Kolikov K., Ivannikov A., Ignatov Yu., Krasnoshtanov D. Transformation of the geodynamic hazard manifestation forms in mining areas. In: *19th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference SGEM 2019, 30 June – 6 July, 2019*. 2019;19(1.3):717–724. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/1.3/S03.091>
7. Rasskazov M.I., Rasskazova A.V., Potapchuk M.I., Teryoshkin A.A. Geomechanical substantiation of measures of safety in the process of development of the Southern Hingansk deposit. In: *Rock mechanics for natural resources and infrastructure development: Proceedings of the 14th International congress on rock mechanics and rock engineering, Foz Do Igvassu, Brazil, September 13–18, 2019*. London: Taylor & Francis Group; 2020. pp. 793–799.
8. Zhukova S.A., Zhuravleva O.G., Onuprienko V.S., Streshnev A.A. Seismic behavior of rock mass in mining rockburst-hazardous deposits in the Khibiny massif. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(7):5–17. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_7_0_5
9. Salamon M.D.G. Rockburst hazard and the fight for its alleviation in South African gold mines. In: *Rockbursts: prediction and control*. London: Institution of Mining and Metallurgy; 1984. pp. 11–36.
10. Petukhov I.M., Egorov P.V., Vinokur B.Sh. *Prevention of rock bursts in mines*. Moscow: Nedra; 1984. 230 p. (In Russ.)
11. Rasskazov I.Y., Kursakin G.A., Potapchuk M.I., Rasskazov M.I. Geomechanic assessment of technological decisions for designing mining operations in of burst hazardous conditions. *Journal of Mining Institute*. 2012;198:80–85. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5919>
12. Kozыrev A.A. Geomechanical justification for carrying out mining operations in rockburst hazardous ore deposits. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):4–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-04-13>

13. Kuranov A.D., Bagautdinov I.I., Kotikov D.A., Zuev B.Yu. Integrated approach to safety pillar stability in slice mining in the Yakovlevo deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):115–119. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.23>
14. Kozyrev A.A., Panin V.I., Semenova I.E., Rybin V.V. Geomechanical support of mining operations in mines of the Murmansk Region. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(6):45–50. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.06.05>
15. Rasskazov M., Rasskazov I., Gladyr A., Tereshkin A., Tsoi D., Rasskazova A. Research and assessment of the rock burst hazardous of the Kola Peninsula mineral deposits by seismic-acoustic monitoring data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;833:012126. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/833/1/012126>
16. Lukichev S.V., Nagovitsin O.V. Information support of mineral mining and exploitation in the Khibiny mountains area. *Journal of Mining Science*. 2012;48(6):1025–1030. <https://doi.org/10.1134/S106273914806010X>
17. Arkhipov G.I. *Far east ferrous metallurgy: iron ore base and opportunities of development*. Khabarovsk: Mining Institute of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences; 2005. 234 p. (In Russ.)
18. Potapchuk M.I., Tereshkin A.A., Rasskazov M.I. Assessment of geomechanical condition of rock massif in the process of development of difficult-structured ore bodies by the sublevel drifts system with the controlled roof caving. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(12):39–45. (In Russ.)
19. Cheban A.Yu. Technology development steeply dipping ore bodies with the use of remote controlled mining equipment. *Mine Surveying Bulletin*. 2019;(2):56–60. (In Russ.)
20. Rasskazov M.I., Potapchuk M.I., Tsoi D.I., Tereshkin A.A., Gladyr A.V. Study of mining and geological features and definition of physical and mechanical properties of rocks of Delken gold deposits. *Problems of Subsoil Use*. 2020;(2):116–126. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2020.02.116>
21. Kozyrev A.A., Kasparyan E.V., Kuznetsov N.N., Shokov A.N. Analysis of the hard rock failure conditions in dynamic form under triaxial compression. *Naukosfera*. 2020;(11-2):77–85. (In Russ.)
22. Kasparyan E.E., Kuznetsov N.N., Shokov A.N., Pak A.K. Dynamic failure conditions in strong rock masses. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(4):69–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-4-0-69-84>
23. Cai M. Prediction and prevention of rockburst in metal mines – A case study of Sanshandao gold mine. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2016;8(2):204–211. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.11.002>
24. Chebotarev M.V. Geological structure of the South Khingan manganese deposit and the material composition of its ores. *Sovetskaya Geologiya*. 1958;(8):114–136. (In Russ.)
25. Zaporozhtsev V.M., Pustovoytova I.V. Modern concepts of stratigraphy of Kimkansk ore district and geological structure of Sutarsky ferruginous quartzites deposit. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2013;(11):69–76. (In Russ.)
26. Rasskazov I.Y., Saksin B.G., Potapchuk M.I., Usikov V.I. Geomechanical assessment of mining conditions in the Khingansk manganese ore body. *Journal of Mining Science*. 2014;50(1):10–17. <https://doi.org/10.1134/S1062739114010025>
27. Stavrogin A.N., Protosenya A.G. Strength of rocks and stability of workings at great depths. Moscow: Nedra; 1985. 271 p. (In Russ.)
28. Fadeev A.B. *Finite element method in geomechanics*. Moscow: Nedra; 1987. 221 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/books/16260>
29. Zoteev O.V. Simulation of the stress-strain state of a rock mass by numerical methods. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2003;(5). (In Russ.)
30. Bokiya I.B., Zoteev O.V., Pul V.V., Pul E.K. Selection of basic data for numerical modeling of rock mass stress state at the Mirny mining and processing works, Alrosa Group of Companies. *Fundamentalnye i Prikladnye Voprosy Gornykh Nauk*. 2017;4(3):38–42. (In Russ.)
31. Bagautdinov I.I., Belyakov N.A., Sevryukov V.V., Rasskazov M.I. Hardening soil model in prediction of plastic deformation zone in soft rock mass of Yakovlevo iron ore deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2022;(12):16–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.12.03>

Информация об авторах

Рассказов Максим Игоревич – научный сотрудник, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация; e-mail: rasm.max@mail.ru

Рассказов Игорь Юрьевич – доктор технических наук, член-корреспондент, директор, Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация; e-mail: adm@igd.khv.ru

Потапчук Марина Игоревна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация; e-mail: potapchuk-igd@mail.ru

Цой Денис Игоревич – научный сотрудник, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация; e-mail: denis.tsoi@mail.ru

Терёшкин Андрей Александрович – научный сотрудник, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация; e-mail: andrey.tereshkin@bk.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 25.09.2023

Поступила после рецензирования: 07.11.2023

Принята к публикации: 13.11.2023

Information about the authors

Maksim I. Rasskazov – Researcher, Mining Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation, e-mail: rasm.max@mail.ru

Igor Yu. Rasskazov – Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Director, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation; e-mail: adm@igd.khv.ru

Marina I. Potapchuk – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Mining Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation, rasm.max@mail.ru; e-mail: potapchuk-igd@mail.ru

Denis I. Tsoi – Researcher, Mining Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation, rasm.max@mail.ru; e-mail: denis.tsoi@mail.ru

Andrey A. Tereshkin – Researcher, Mining Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation, rasm.max@mail.ru; e-mail: andrey.tereshkin@bk.ru

Article info

Received: 25.09.2023

Revised: 07.11.2023

Accepted: 13.11.2023