## **РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК** СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2023

№ 2

# ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.831

## ОЦЕНКА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДРАБОТАННЫХ ПОРОД МАССИВА ПРИ ВЫЕМКЕ СЛЕПОГО РУДНОГО ТЕЛА НА ТАШТАГОЛЬСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

## А. А. Еременко<sup>1</sup>, А. Г. Гаврилов<sup>2</sup>, В. А. Штирц<sup>3</sup>, В. С. Писарев<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: eremenko@ngs.ru, Красный проспект, 54, 630091, Новосибирск, Россия <sup>2</sup>Филиал-сегмент "Горнорудные активы" АО "ЕВРАЗ ЗСМК", E-mail: Aleksey.Gavrilov@evraz.com, Кондомское шоссе, 39, 654018, г. Новокузнецк, Россия <sup>3</sup>Филиал-сегмент "Горнорудные активы" АО "ЕВРАЗ ЗСМК", E-mail: Vladimir.Shtirts@evraz.com, ул. Советская, 1 "А", 652971, п. г. т. Шерегеш, Россия <sup>4</sup>Сибирский государственный университет геосистем и технологий, E-mail: v.s.pisarev@sgugit.ru, ул. Плахотного, 10, 630108, г. Новосибирск, Россия

Рассмотрено состояние породного целика при отработке слепого рудного тела участка Юго-Восточный Таштагольского месторождения. Проведен анализ геомеханической и геодинамической обстановки при отработке рудных участков данного месторождения. Представлены результаты расчетов напряжений и неупругих деформаций, зоны возможных разрушений в окрестности выработанного пространства при отработке блоков на участке Юго-Восточный до и в период образования провала на земной поверхности. Приведены данные по определению толщины породного целика между сводом выработанного пространства и земной поверхностью геофизическими методами. С помощью гравиметрических измерений и аэрофотосъемки определены площади и периметры провала в ходе ведения очистных работ.

Породный целик, выработанное пространство, рудное тело, гравиметрическая съемка, система разработки, руда, горная порода, толчки, месторождение

DOI: 10.15372/FTPRPI20230205

На Таштагольском железорудном месторождении подземные горные работы ведутся на горизонтах  $-70 \dots -350$  м по четырем участкам на глубине 450-900 м и более; добывается более 2.5 млн т руды в год (рис. 1) [1-2]. Рудное тело участка Юго-Восточный является слепым, длина по падению составляет 260-830 м, по простиранию 60-1200 м [3, 4]. Рудное тело и породы разбиты густой сетью трещин. Имеются горизонтальные тектонические нарушения с амплитудой смещения более 120 м. Сопровождаются они зонами смятия, наличием вдоль тектонических контактов карбонатных и кварцевых жил, даек сиенитового и диоритового состава [4, 5]. Основная часть запасов руды (более 30 млн т) расположена в интервале гор.  $+200 \dots -350$  м, коэффициент крепости руды по М. М. Протодьяконову 12-18.

Исследование выполнено в рамках проекта НИР (номер гос. регистрации № 121051900145-1).



Рис. 1. Вертикальный разрез Таштагольского месторождения

Установлено, что на Таштагольском месторождении вне зоны влияния очистных работ максимальные сжимающие напряжения  $\sigma_1$  действуют в северо-западном направлении по азимуту  $320\pm20^\circ$  и составляют  $\sigma_3 = -2.5\gamma H$ , а напряжения  $\sigma_2 = -1.3\gamma H$  и  $\sigma_1 = -\gamma H$  ( $\gamma$  — объемный вес породы; H — глубина от земной поверхности). В зоне влияния очистных работ напряжения  $\sigma_2 = -3.5\gamma H$ ,  $\sigma_3 = -5\gamma H$  и  $\sigma_1 = -\gamma H$  [6–8].

Геодинамические явления на Таштагольском месторождении отмечаются с глубины 300 м, а с глубины 600 м — толчки, микроудары, горные удары и горно-тектонические удары разрушительной силы. С 1959 по 2022 г. зарегистрировано более 6000 динамических проявлений горного давления, в том числе 21 горный удар и 79 микроударов. Отметим, что в течение 2014-2022 гг. зафиксирован только один микроудар, сейсмическая энергия остальных толчков составляла  $10^1 - 10^6$  Дж, что связано с переходом на систему разработки с закладкой выработанного пространства, уточнением критериев удароопасности горных пород различных методов и применением профилактических мероприятий (бурение разгрузочных скважин, камуфлетное взрывание, снижение массы ВВ при отбойке и др.) [8].

В связи с повышением интенсивности возникновения геодинамических явлений участки Восточный и Северо-Западный с гор. – 70 м и ниже и участки Юго-Восточный и Западный с гор. + 70 м и ниже отнесены к опасным по горным ударам. Вовлечение в эксплуатацию слепого рудного тела участка Юго-Восточный обусловлено необходимостью поддержания производственной мощности рудника.

#### ТЕХНОЛОГИЯ ВЕДЕНИЯ ОЧИСТНЫХ РАБОТ

Разработка запасов руды на участке Юго-Восточный начата этажно-камерной системой с разбивкой рудного тела по простиранию на четыре блока (рис. 2): в этаже + 70 ... + 140 м блоки разделялись на слои, в этаже ±0 ... + 140 м — на секции, в этаже - 70 ... ±0 м — на панели.



Рис. 2. Схема расположения блоков при выемке рудного тела участка Юго-Восточный. Вертикальная проекция по простиранию: *1* — зоны сдвижения горных пород; *2* — технологические блоки; *3* — тектонические нарушения; *4* — горная порода; 560 … – 140 м — горизонты

Отработка руды в этаже  $+70 \dots +140$  м проводилась на компенсационные камеры и обрушенные породы предыдущего слоя. Выпуск руды из компенсационных камер (слоев и секций) этажа  $+70 \dots +140$  м осуществлялся через перепускные щели на гор.  $\pm 0$  м с применением вибродоставочных установок ВДПУ-4ТМ. Далее предполагался частичный выпуск горной массы на гор.  $\pm 0$  м и окончательный на гор. -70 м в вагоны. Запасы руды в этаже  $-70 \dots \pm 0$  м отрабатывались системой этажного принудительного обрушения.

Длина слоя в блоке равна мощности рудного тела. В каждом блоке создавались компенсационные камеры (перепускные) вкрест простирания рудного тела высотой в два этажа  $\pm 0 \dots + 70 \dots + 140$  м, шириной 8 м и длиной 12.5 - 32 м. Взрывание блока осуществлялось на компенсационную камеру восходящими, нисходящими и горизонтальными пучковыми сближенными скважинными зарядами ВВ диаметром 105 мм, удельный расход ВВ на отбойку колебался от 0.5 до 0.7 кг/т.

В результате выемки запасов руды в слепом рудном теле в этажах +140...-70 м образовалось выработанное пространство размером более 300 × 80 × 210 м, при этом толща породного целика над очистным пространством составила 390-450 м. Для обеспечения безопасности работ далее дана оценка геомеханического состояния вмещающего массива горных пород.

### ОЦЕНКА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В ОКРЕСТНОСТИ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА

Напряженно-деформированное состояние (НДС) массива горных пород оценивалось с помощью метода граничных интегральных уравнений (задача теории упругости) при отработке блоков в этажах – 70 ... + 140 м на участке Юго-Восточный [9–15]. Исходные вертикальные напряжения  $\sigma_z^0 = -\gamma H$ , горизонтальные  $\sigma_x^0 = -\lambda_x \gamma$ ,  $\sigma_y^0 = -\lambda_y \gamma$  (*H* — глубина,  $\gamma$  — объемный вес пород);  $\lambda_x$  и  $\lambda_y$  — коэффициенты бокового распора в направлениях *OX* и *OY* в системе координат *X*0*Y*. Критическая величина растягивающих напряжений для слабых пород принята равной 3 МПа, для крепких пород 12 МПа.

Напряженное состояние во вмещающем массиве после отработки ряда слоев характеризуется действием значительных горизонтальных напряжений (до – 30 МПа; в кровле и днище выработанного пространства до – 50 ... – 70 МПа); зоны разрушений охватывают весь контур выработанного пространства (рис. 3).



Рис. 3. Горизонтальная по простиранию  $\sigma_x(a)$ , вертикальная  $\sigma_z(\delta)$  компоненты тензора напряжений (МПа) и зоны разрушений (в) для малопрочных (I) и прочных (II) пород при отработке слепого рудного тела

Определение перемещений контура кровли в породном целике над выработанным пространством проводилось различными геофизическими методами. В качестве источников сейсмических волн использовались заряды ВВ массой 1.5–3.0 кг, помещенные в ранее обуренные геологические скважины на глубину 40 м. На различных расстояниях от заряда ВВ размещались мобильные сейсмоприемники. Исследования участка Юго-Восточный при отработке блоков с 2014 по 2018 г. показали, что граница контура кровли в породном целике периодически смещалась в сторону земной поверхности.

На рис. 4 показано расположение зарядов ВВ, подземная полость, прямые и отраженные волны. С учетом разницы во времени затухания прямых и отраженных волн оценивалась глубина расположения кровли, которая составила 250–305 м.



Рис. 4. Схема проведения эксперимента: *1* — взрывной источник; *2* — земная поверхность; *3* — выработанное пространство; *4*, *5* — прямые и отраженные волны

В связи с увеличением выработанного пространства с течением времени и установленным уменьшением породного целика между этим пространством и земной поверхностью приняты меры по переносу расположенной здесь горнолыжной трассы и демонтированию оборудования подъемника бугельно-канатной дороги.

### АНАЛИЗ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ ПРОСЕДАНИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ЮГО-ЗАПАДНОМ СКЛОНЕ ГОРЫ БУЛАНЖЕ

В ноябре 2018 г. обнаружено локальное проседание земной поверхности с образованием воронки обрушения на юго-восточном склоне горы Буланже над Юго-Восточным участком и падением пятой опоры бугельно-канатной дороги. Глубина воронки колебалась от 10 до 30 м. В плане размер воронки равен  $110 \times 130$  м. Проседание земной поверхности произошло в районе контакта пород первой (подрудной) и второй (рудовмещающей) подсвит Мундыбашской свиты. Породы первой подсвиты представлены порфиритами и туфами, туфолавобрекчиями с преобладанием грубообломочных пироклистических разностей пород. Породы второй подствиты выполнены карбонитными породами: песчаниковыми и моргелистыми известняками, мергелями, которые в верхней части раздела сменяются туффитами с карбонатным цементом или карбонатными обломками, а на глубину — терригенно-вулканогенными породами с прослойками, обогащенными гематитом и магнетитом. Отметим, что алевролитовые сланцы способны разлагаться под воздействием воздуха и воды.

Рассмотрена геодинамическая обстановка при выемке Юго-Восточного участка. За период отработки данного участка с 2004 по 2017 г. проведено более 100 технологических и массовых взрывов с зарядами взрывчатых веществ 22–294 т.

Анализ геодинамической обстановки на Таштагольском месторождении в период с июля по ноябрь 2018 г. показал, что 09.07.2018 г. за 12 ч зарегистрировано 8 событий в районе Юго-Восточного участка, затем через 20 ч в массиве произошли толчки энергетических классов 4.1–7.1. В это же время в районе Горного Алтая наблюдалось землетрясение класса 9.2. При осмотре выработок на гор. –140...–350 м нарушений не обнаружено; категория удароопасности "опасно" не установлена.

Однако по данным сейсмостанции "Таштагол" за этот период в массиве горных пород Юго-Восточного участка зарегистрировано значительно большее количество низкочастотных событий (24-55 в сутки), которые можно классифицировать как обрушения в выработанном пространстве и связать образование воронки с этими событиями. Так, 28.04.2022 г. был проведен массовый взрыв по обрушению камеры блока № 2 с массой ВВ 120 т на Юго-Восточном участке в этаже  $-70 \dots \pm 0$  м. После взрыва кроме толчков проявились низкочастотные события — обрушения горных пород в выработанном пространстве, что подтверждает образование провала над Юго-Восточным участком под влиянием горных работ.

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ВМЕЩАЮЩЕГО МАССИВА И ПОРОДНОГО ЦЕЛИКА

Выполнена оценка НДС вмещающего массива и породного целика в окрестности выработанного пространства при образовании провала. Граница земной поверхности представляется в предположении, что под дном провала на глубине 80-120 м (отм. + 500 ... + 540 м) имеется карстовое образование, заполняемое вышележащими уплотненными горными породами. Над выработанным пространством в отм. -70...+490 м происходит куполообразование (разуплотнение), развивающееся, как показали экспериментальные геофизические исследования, в направлении земной поверхности. С развитием куполообразования сжимающие горизонтальные напряжения между дном карстовой полости и разуплотненным массивом над выработанным пространством значительно возрастают от -5 до -55 МПа (рис. 5).



Рис. 5. Распределение горизонтальных компонент тензора напряжений ( $\sigma_x$ ) по простиранию при куполообразовании в породном целике до отм. 280 м (I), 380 м (II), 400 м (III), 450 м (IV), 465 м (V). – 140... 560 м — отметки; – 5... – 55 МПа — напряжения; *а* — породный целик; *б* — карстовая полость

При достижении отметки более 450 м горизонтальные напряжения  $\sigma_x$  между кровлей и основанием карста увеличиваются. По геологическим данным в этом районе расположены вертикальные контакты горных пород. Проведена оценка напряженно-деформированного состояния массива при наличии контакта жесткого сцепления. В окрестности выработанного пространства НДС характеризуется концентрацией горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  в угловых областях, достигающих – 60 МПа (рис. 6). Зоны разрушений занимают значительную часть вглубь массива на 40–90 м.



Рис. 6. Распределение горизонтальной компоненты тензора напряжений  $\sigma_x$  по простиранию: *a* — при отсутствии проскальзывания по контакту; *б* — зоны разрушений для слабых (светлые области) и крепких (темные области) пород

Расчеты показали, что горные породы, представляющие собой сланцевые алевролиты, находятся в зоне разупрочнения массива. В дальнейшем при ведении горных работ (особенно взрывов) на Юго-Восточном участке наблюдалось расширение воронки обрушения и проседание провала на земной поверхности.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНТУРА ПРОВАЛА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Изменение контура провала земной поверхности оценивалось с помощью гравиметрических измерений и аэрофотосъемки с апреля 2018 по август 2022 г. Для гравиметрических измерений имелось более 20 пунктов, отвечающих требованиям, предъявляемым к центрам геодинамического измерения, с определением координат высокоточным приемником Trimble R8 и электронным тахеометром Leica TSR405.

При проведении гравиметрической оценки в районе провала использовалась методика с повторением наблюдений в обратном ходе с включением в рейс пункта с соседнего профиля [16, 17]. Измерения по этой методике выполнялись прибором CG-5; основным методом измерения вертикального градиента служил косвенный метод — определение силы тяжести (рис. 7) [18].

На участке Юго-Восточный выполнена аэрофотосъемка территории исследования с беспилотного летательного аппарата квадрокоптера DJL Phanton IV PRO. В результате аэрофотосъемки, состоящей из 21 маршрута, получено более 300 цифровых изображений с пространственным разрешением около 3 см/пикс [19–25]. Фотограмметрическая обработка результатов плановой аэрофотосъемки осуществлена с помощью программных комплексов Agisoft MetaShape.



Рис. 7. Распределение изоаномал силы тяжести в редукции Буге:  $\gamma_0 = 2.67 \text{ г/см}^2$  — отсчетный уровень; l — воронка обрушения; кружочками обозначены пункты измерений

В таблице представлен прирост геометрических размеров провала, отражающий динамику его развития в течение пяти лет. На рис. 8 показан фрагмент ортофотоплана провала, полученный по результатам аэрофотосъемки. Отметим, что в заданной части контура провала обнаружены трещины значительных размеров (более 1 м). Площадь и периметр провала за 5 лет увеличились соответственно в 1.89 и 12 раз.

Дата съемки	Увеличение			
	площади, м <sup>2</sup>	по периметрам	по долготе $N$	по широте Е
26.04.2018		_	_	_
12.10.2019	3288	2	13	1
05.09.2020	3895	4	22	3
20.08.2021	4078	8	24	5
10.08.2022	6202	24	29	12

Прирост геометрических размеров провала на горе Буланже, м



Рис. 8. Фрагменты ортофотоплана провала над участком Юго-Восточный в 2022 г.: *1* — границы провала; *2* — трещина

#### выводы

Для обеспечения безопасности и эффективности очистных работ на Юго-Восточном участке Таштагольского месторождения дальнейшую выемку слепого рудного тела ниже гор. – 70 м следует вести с переходом от систем этажно-камерной и этажного принудительного обрушения на подэтажное обрушение. В ноябре 2018 г. над Юго-Восточным участком в районе расположения контактов горных пород обнаружено локальное проседание земной поверхности с образованием воронки обрушения глубиной 10-30 м, размером  $110 \times 130$  м. Уменьшение мощности подработанного массива с 400 до 140 м из-за производства горных пород в 2014-2022 гг. привело к формированию состояния породного целика, близкого к одноосному сжатию, что отрицательно сказывается на его устойчивости и ведет к дальнейшему увеличению провала на дневной поверхности. В результате исследований по определению состояния контура провала земной поверхности над Юго-Восточным участком посредством гравиметрических измерений и аэрофотосъемки установлено, что площадь и периметр провала увеличились в период с 2018 по 2022 г. соответственно в 1.89 и 12 раз.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Еременко А. А., Шапошник Ю. Н., Филиппов В. Н., Конурин А. И. Развитие научных основ безопасной и эффективной геотехнологии при освоении удароопасных месторождений Западной Сибири и Крайнего Севера // Горн. журн. 2019. № 10. С. 33–39.
- **2. Еременко А. А., Еременко В. А., Гайдин А. П.** Горно-геологические и геомеханические условия разработки железорудных месторождений в Алтае-Саянской складчатой области. Новосибирск: Наука, 2009. 224 с.
- **3.** Калугин А. С., Калугина Т. С., Иванов В. И. и др. Железорудные месторождения Сибири. Новосибирск: Наука, 1981. 238 с.

- 4. Кузнецов В. А. Тектоническое районирование и основные черты эндогенной металлогенности Горного Алтая // Вопросы геологии и металлогении Горного Алтая. Новосибирск: ИГГ СО АН СССР, 1963. Вып. 13.
- **5.** Рудные месторождения СССР / под ред. В. И. Смирнова. 2-е изд., перераб. и доп. Т. 1. М.: Недра, 1978. 352 с.
- 6. Курленя М. В., Еременко А. А., Шрепп Б. В. Геомеханические проблемы разработки железорудных месторождений Сибири. — Новосибирск: Наука, 2001. — 184 с.
- 7. Кононов А. Н., Шрепп Б. В., Кононов О. А., Никитин В. Н., Крылова О. А. Явление пульсационного горизонтального напряжения в горных породах и рудах эксплуатируемых железорудных месторождений юга Сибири // Горн. журн. — 1995. — № 8. — С. 9–11.
- **8.** Указания по безопасному ведению горных работ на Таштагольском месторождении, склонном и опасном по горным ударам. Новосибирск; Новокузнецк, 2021. 74 с.
- 9. Khademian Z. and Ugur O. Computational framework for simulating rock burst in shear and compression, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 2018, Vol. 110. P. 279–290.
- **10.** Xia-Ting Feng, Jianpo Liu, Bingrui Chen, Yaxun Xiao, Guangliang Feng et al. Monitoring, warning, and control of rockburst in deep metal mines, Eng., 2017, Vol. 3, Issue 4. P. 538–545.
- 11. Anderson N. G. Information as a physical quantity, Inf. Sci., 2017, Vol. 415–416. P. 397–413.
- Yang Yu, Ka-zhong Deng, Yi Luo, Shen-en Chen, Hui-fu Zhuang. An improved method for long-term stability evaluation of strip mining and pillar design, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 2018, Vol. 107. P. 25-30.
- 13. Кочарян Г. Г., Золотухин С. Р., Калинин Э. В., Панасьян Л. Л., Спунгин В. Г. Напряженнодеформированное состояние массива горных пород Коробковского железорудного месторождения на участке зоны тектонических нарушений // ФТПРПИ. — 2018. — № 1. — С. 16–24.
- **14. Кропоткин П. Н.** Результаты измерений напряженного состояния горных пород в Скандинавии, в Западной Европе, в Исландии, Африке и Северной Америке. — М.: Наука, 1973. — 188 с.
- **15. Барышников В. Д., Гахова Л. Н.** Геомеханические условия применения слоевой системы разработки кимберлитовой трубки "Интернациональная" // ФТПРПИ. 2009. № 2. С. 46–55.
- 16. Маловичко А. К., Костицын В. И., Тарунина О. Л. Детальная гравиразведка на нефть и газ. М.: Недра, 1989. 224 с.
- 17. Инструкция по гравиметрической разведке. М.: Недра, 1975. 88 с.
- **18.** Гвоздарев Ю. К. Методика обнаружения эпицентра подземного ядерного взрыва по гравиметрическим данным // Горн. журн. — 2007. — № 4. — С. 121–127.
- **19.** ГКИНП-5. Инструкция по составлению технических отчетов о геодезических, астрономических, гравиметрических и топографических работах. 3-е изд. М.: Недра, 1971. 138 с.
- **20. Правила** закладки центров и реперов на пунктах геодезических и нивелирных сетей. М.: Картгеоцентр — Геодезиздат, 1993. — 104 с.
- **21. ПТБ-88**. Правила по технике безопасности на топографо-геодезических работах. М.: Недра, 1991. 303 с.
- **22.** ГКИНП-02-033-82. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500. М.: Недра, 1982. 98 с.
- 23. Правила закрепления центров пунктов спутниковой геодезической сети. М.: ЦНИИГАиК, 2001. 30 с.
- 24. ГКИНП (ГНТА)–04-0122-88. Инструкция по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России. 3-е изд., испр. и доп. М.: ЦНИИГАиК, 2004. 220 с.
- **25.** Писарев В. С. Исследование развития контура провала в районе горы Буланже // Вестн. СГУГиТ. 2021. Т. 26. № 2. С. 28–36.

Поступила в редакцию 27/II 2023 После доработки 01/III 2023 Принята к публикации 16/III 2023