

УДК 622.831

**ОЦЕНКА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
НАЛЕГАЮЩЕЙ ТОЛЩИ ПОРОД ПРИ ОТРАБОТКЕ СЛЕПОГО РУДНОГО ТЕЛА  
НА ШЕРЕГЕШЕВСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ**

**А. А. Еременко<sup>1</sup>, В. А. Штирц<sup>2</sup>, В. С. Писарев<sup>3</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>*АО Филиал-сегмент “Горнорудные активы” ЕВРАЗ ЗСМК,  
E-mail: Vladimir.Shirts@evraz.com, ул. Советская, 1 “А”, 652971,  
п. г. т. Шерегеш, Россия*

<sup>3</sup>*Сибирский государственный университет геосистем и технологий,  
E-mail: v.s.pisarev@sgugit.ru, ул. Плеханова, 10, 630108, г. Новосибирск, Россия*

Дана геомеханическая оценка состояния подработанной толщи пород до и после образования провала на земной поверхности при выемке слепого рудного тела на участке Подрусловый. С помощью геофизических методов проведены экспериментальные исследования по установлению динамики размеров породного целика над выработанным пространством. Гравиметрической съемкой, совмещенной с ортофотопланом, и с помощью измерительных скважин определены контуры подземного пространства и параметры провала. Методом математического моделирования оценены зоны концентраций напряжений и разрушений во вмещающем массиве в районе измерительных скважин. Разработаны профилактические мероприятия по обеспечению безопасности дальнейшего ведения горных работ на участке Подрусловый Шерегешевского месторождения.

*Налегающая толща пород, породный целик, выработанное пространство, рудное тело, гравиметрическая съемка, система разработки, руда, толчки, месторождение*

DOI: 10.15372/FTPRPI20230306

Продолжительное ведение горных работ на рудниках Горной Шории (более 80 лет) при активной разработке с углублением в сложных горно-геологических условиях приводит к развитию геомеханических и геодинамических процессов в массиве горных пород [1–5]. Шерегешевское, Таштагольское и другие месторождения отнесены к опасным по горным ударам [6–8]. Основной объем запасов обрабатывается следующими системами: этажного принудительного обрушения, этажно-камерной и подэтажного обрушения без и с твердеющей закладкой выработанного пространства [9–12]. Поскольку доля разведанных запасов руды, расположенных в слепых рудных телах, составляет 60–80%, возникла необходимость их выемки с обеспечением устойчивости кровли выработанного пространства вме-

щающего массива в начальный и переходный периоды отработки рудных тел с понижением горных работ [13–18]. Однако регулярное обрушение подработанной толщи при ведении очистных работ в слепых рудных телах приводит к уменьшению ее мощности и к росту интенсивности толчков.

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования — Шерегешевское месторождение, отработка которого ведется в основном системой подэтажного обрушения. В рассматриваемый период слепое рудное тело участка Подрусловый отработано в этаже +185 ... +255 м этажно-камерной системой разработки. Ниже в границах гор. +115 ... +185 м выемка запасов руды участка осуществляется системой подэтажного обрушения (рис. 1). Верхняя кромка обрабатываемого слепого рудного тела расположена на расстоянии 300–420 м от земной поверхности [19]. Основная часть запасов руды 45 млн т находится в интервале глубин 300–700 м.

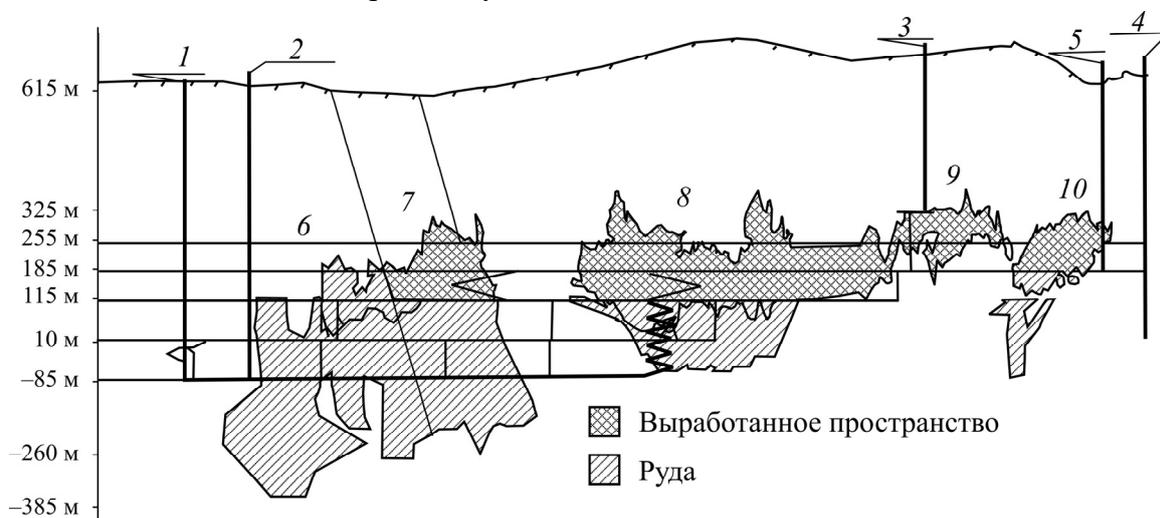


Рис. 1. Схема вскрытия Шерегешевского месторождения: 1 — скиповый ствол; 2 — новоклетевой ствол; 3 — воздуховыдающий ствол; 4 — восточный ствол; 5 — главный ствол; 6 — участок Новая промплощадка; 7 — участок Подрусловый; 8 — участок Новый Шерегеш; 9 — участок Болотный; 10 — участок Главный; 615 ... –385 м — горизонты: а — выработанное пространство; б — руда

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ГРАНИЦЫ КОНТУРА КРОВЛИ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА

Определение границы контура кровли выработанного пространства проводилось в 2005–2017 гг. при производстве массовых технологических и опытных взрывов. Выявлено, что породный целик на выработанном пространстве по высоте постепенно уменьшался от 15 до 50 м. Кроме того, мощность налегающей толщи пород устанавливалась по пробуренным измерительным скважинам с земной поверхности до контура выработанного пространства. По скважине 239-1 вертикальная мощность целика уменьшилась с 2019 по 2021 г. на 72.3 м (в 2022 г. составляла 60 м), в районе скважины 365-1 — на 7 м, скважины 532-1 — на 0.8 м (рис. 2).

Расстояние между навалом горных пород в выработанном пространстве и контуром кровли в районе скважин колебалось соответственно от 67 до 70 м, от 47.5 до 50.0 и от 27.3 до 29.0 м. Фактический объем образовавшейся пустоты в районе скважин составил более 1.25 млн м<sup>3</sup>.

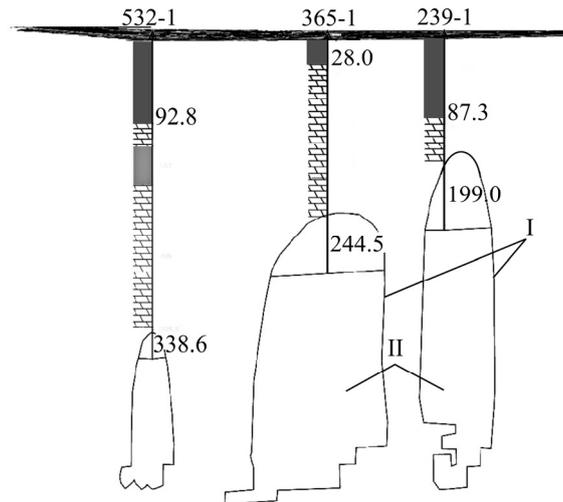


Рис. 2. Вертикальная проекция скважин 532-1, 365-1, 239-1 и сечения выработанного пространства в аксонометрической проекции (I); навал горных пород (II); цифрами указано расстояние от земной поверхности в метрах

Для определения состояния земной поверхности и геометрических параметров выработанного пространства на территории участка Подрусловый создана временная гравиметрическая сеть из 47 пунктов [20–25]. Измерения выполнялись гравиметрами ГНУ-КВ. Для каждого пункта сети определены приращения силы тяжести и абсолютные значения силы тяжести в каждой точке измерения. По полученным значениям силы тяжести вычислены аномалии в свободном воздухе по формуле:

$$\Delta g_{CB} = g - \gamma_0 + 0.3086H, \quad (1)$$

в редукции Буге аномалии определялись следующим образом:

$$\Delta g_B = \Delta g_{CB} - 0.0419\bar{\rho}H, \quad (2)$$

где  $g$  — измеренное значение силы тяжести в точке;  $\gamma_0$  — нормальное значение силы тяжести, принятое для эллипсоида относимости WGS-84 на данной широте; 0.3086 — нормальный вертикальный градиент силы тяжести;  $H$  — измеренная нормальная высота в точке;  $0.0419\bar{\rho}H$  — притяжение плоскопараллельного (промежуточного) слоя толщиной  $H$  с плотностью  $\bar{\rho}$ , заключенного между уровнем точки наблюдения и поверхностью эллипсоида;  $\bar{\rho}$  — среднее значение плотности (рис. 3).

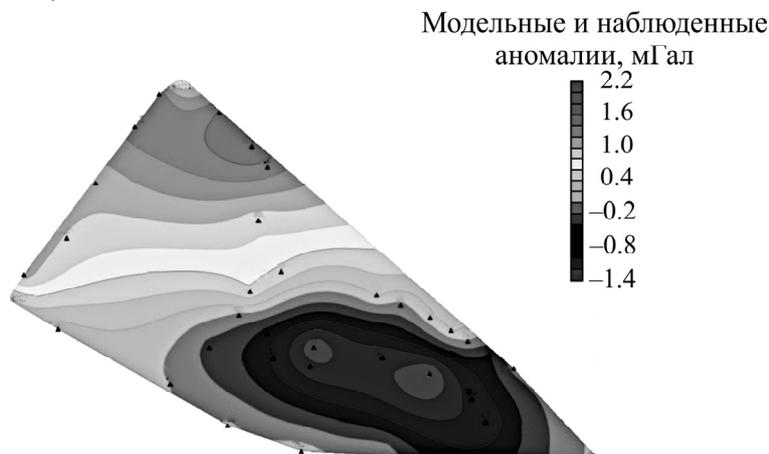


Рис. 3. Локальные аномалии в редукции Буге над участком Подрусловый: принятый фон на уровне — 56.8 мГал

Локальные аномалии характеризуют плотностные неоднородности в прилегающем слое. Интерпретация результатов гравиметрических измерений позволяет отметить, что аномальные зоны отражают места на поверхности участка Подрусловый, в глубине которых имеются разнотлотностные неоднородности, свидетельствующие о наличии пустоты. Установлено, что контур оседания во вмещающем налегающем массиве увеличился за 2022 г. в северо-восточном направлении до 30 м (рис. 4).

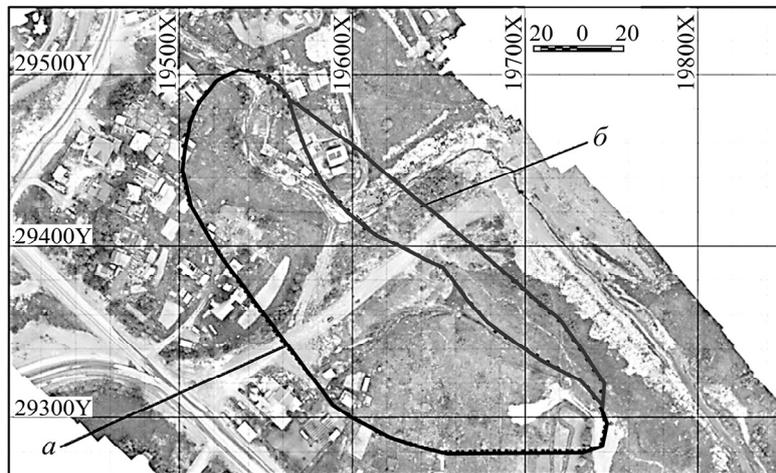


Рис. 4. Совмещенные контуры возможного оседания земной поверхности по измерениям 2021 (а) и 2022 (б) гг.; 29300-29500 и 19500-19800 — координаты маркшейдерской сетки

На данном участке выполнена аэрофотосъемка территории с беспилотного летательного аппарата квадрокоптера DJI Phantom IV PRO. Фотограмметрическая обработка результатов наблюдений выполнена с помощью программных комплексов Agisoft PhotoScan. Для повышения точности гравиметрических и аэрофотосъемочных работ заложены три временных пункта, местоположение которых определено спутниковыми приемниками Stonex. Получены текстурированная трехмерная модель рельефа в системе координат WGS-84 и ортофотоплан участка Подрусловый.

#### НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОДРАБОТАННОГО МАССИВА ПОРОД

Расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) налегающей толщи пород выполнены для вертикального разреза массива в предположении плоской деформации. Предположено в вертикальном направлении действуют исходные напряжения  $\sigma_y = \gamma H$ , где  $H$  — глубина, м;  $\gamma$  — удельный вес пород; исходные горизонтальные напряжения:  $\sigma_x = \lambda \gamma H$ , где  $\lambda$  — коэффициент бокового давления. Для условий месторождения принято, что  $\gamma = 2.95 \text{ г/см}^2$ ,  $\lambda = 2.6$ .

Расчеты выполнены с применением метода граничных интегральных уравнений. Анализ устойчивости налегающего массива и формируемых в нем зон возможных разрушений осуществлялся согласно критерию Кулона – Мора:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cos \varphi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \operatorname{tg} \varphi, \quad (3)$$

где  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  — главные напряжения;  $\varphi$  — угол внутреннего трения.

В соответствии с физико-механическими свойствами пород месторождения и нарушенности горного массива значение  $\sigma$  принимается для слабых пород 3 МПа, для крепких — 12 МПа. Граница зон возможных разрушений в крепких породах фиксируется на расстоянии, равном 140 м от земной поверхности, в слабых — 100 м (рис. 5).

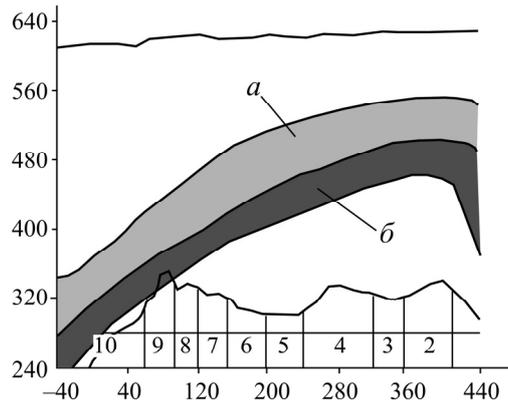


Рис. 5. Распределение зон разрушений в слабых (а) и крепких (б) породах; 2 – 10 — блоки

На рис. 6 представлены приращения смещений относительно состояния массива после отработки десяти блоков при достижении максимальной высоты контура выемки.

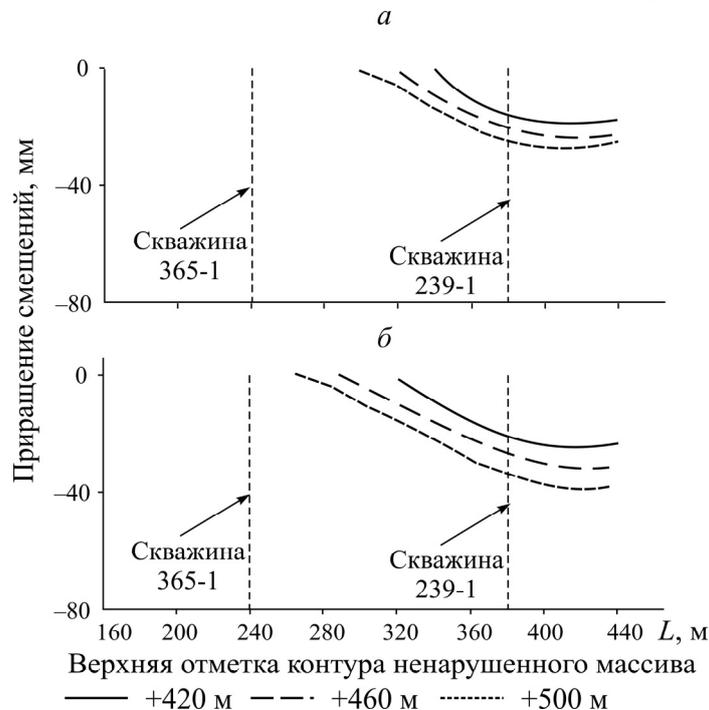


Рис. 6. Приращения смещений границы земной поверхности в вертикальном направлении (а) и массива вдоль отм. +560 (б) вблизи скважин 365-1 и 239-1

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что скважина 239-1 попадает в зону приращения смещений массива при любом положении контура ненарушенного массива вблизи земной поверхности (рис. 6а) и на отм. +560 м (рис. 6б). Скважина 365-1 не попадает в зону приращения смещений массива. На отм. +560 м при развитии процесса поднятия контура ненарушенного массива его смещения удалены от этой скважины на 20–40 м вглубь.

Определены приращения смещений массива в горизонтальном направлении вдоль скважины 365-1 в отметках +400...+620 м при достижении контуром ненарушенного массива отм. +460 м. Результаты свидетельствуют о незначительных приращениях смещений в горизонтальном направлении вдоль всей скважины, которые не превышают 7 мм. Максимальные значения смещения отмечаются в отм. +480...+500 м, где фиксируется зона разгрузки от вертикальных напряжений.

Установлено, что высота налегающей толщи пород над выработанным пространством уменьшилась до 60 м, особенно в районе замерной скважины 239-1. Для обеспечения безопасности инженерно-техническими работниками шахты “Шерегешская” АО “Евраз ЗСМК” и ИГД СО РАН разработаны профилактические мероприятия. Они включают ограждение опасной территории и отвод ручья от участка Подрусловый, перенос или вывод из эксплуатации дачных построек и проведение дальнейших исследований по определению НДС подработанного налегающего массива и его фактической высоты, параметров выработанного пространства и объема обрушенных горных пород.

На участке Подрусловый с 11.12.2022 г. регистрировались низкочастотные явления, возникновения которых связаны с образованием провала на земной поверхности над рассматриваемым районом. Следует отметить, что 19.12.2022 г. произошли толчки в районе орта № 19 гор. +115 м с энергетическим классом 5 и 7, за которыми последовало еще 47 толчков с классом не более 3. Эти явления сопровождалось интенсивным отслоением горных пород и заколообразованием в выработках.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОВАЛА ПРИ ВЫХОДЕ ЗОНЫ ОБРУШЕНИЯ ПОРОД НА ДНЕВНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

При отработке участка Подрусловый в период с 2005 по 2022 г. наблюдалось уменьшение вертикальной мощности подработанной толщи массива от 420 до 60 м, приводящее к формированию породного целика. В результате 12.12.2022 г. произошло обрушение части земной поверхности с образованием техногенного провала. Район провала на земной поверхности расположен в юго-восточной части участка Подрусловый (рис. 7а).

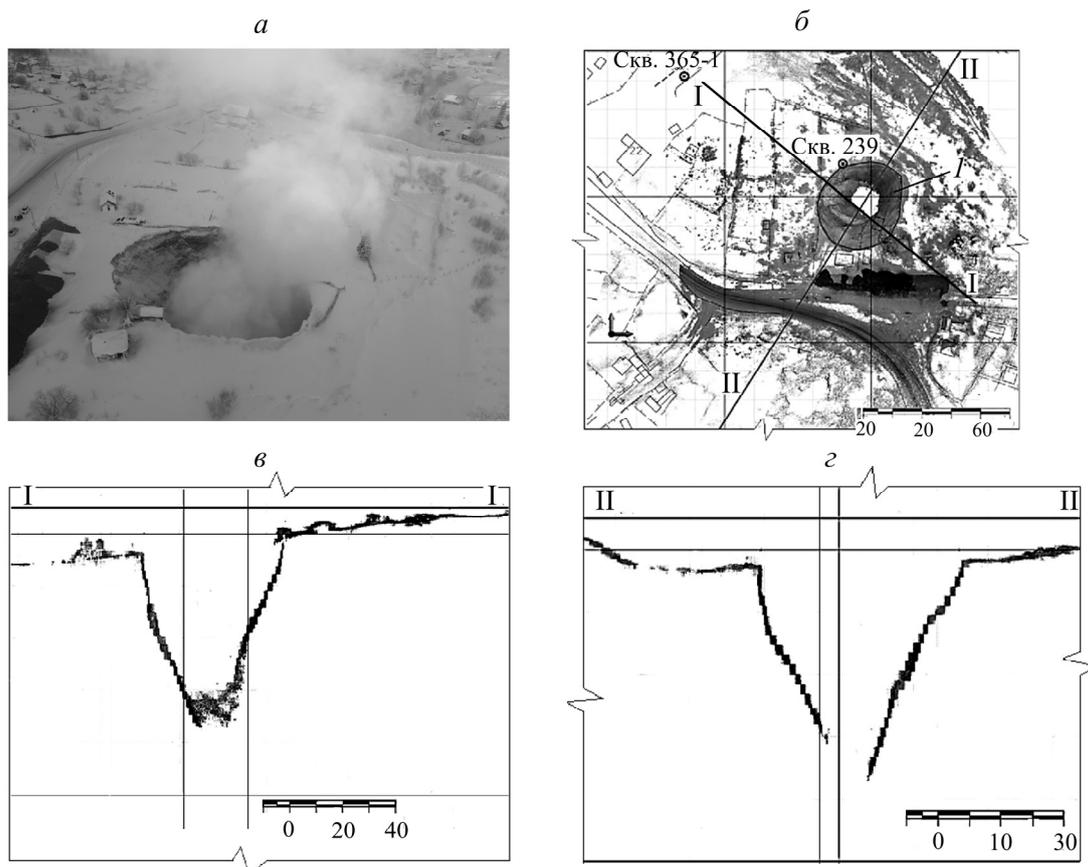


Рис. 7. Расположение провала над участком Подрусловый: общий вид (а); схема расположения в плане (б) и по вертикали по линии разреза I-I (в), II-II (г). I — провал; скв. 239-1, скв. 365-1 — скважины

Натурным обследованием территории провала установлено, что окружающие породы сложены глинами, известняками, порфиритами и др., определен коэффициент крепости пород по Протодюконову — 12. В результате фотограмметрической обработки аэрофотосъемки (15.12.2022 г.) получены текстурированная трехмерная модель рельефа и метрическая цифровая модель провала, по которой сделаны разрезы по линиям I и II (рис. 7б, в, з). Определен размер провала, равный в плане 56 × 59 м, глубиной 100 м. Его ликвидация в настоящее время осуществляется путем засыпки выработанного пространства с дневной поверхности хвостами дробильно-обогатительной фабрики.

### **ВЫВОДЫ**

Установлено, что за период с 2005 по 2017 г. при ведении очистных работ на участке Подрусловый вертикальная мощность подработанной налегающей толщи пород уменьшилась на 15–50 м и более; за 2019–2021 гг. (по трем измерительным скважинам) — на 0,8–72,3 м. В 2022 г. за счет развития зоны обрушения сформировался породный целик, толщина которого по скважине 239-1 составила 60 м. Экспериментальные исследования с использованием гравиметрического метода и аэрофотосъемки позволили определить местоположение аномальных зон на поверхности участка и получить текстурированную трехмерную модель рельефа и ортофотоплан участка.

Оценка состояния подработанного налегающего массива над участком Подрусловый показала, что при ведении очистных работ регистрировались низкочастотные события, которые связаны с обрушением пород кровли выработанного пространства с последующим образованием провала на земной поверхности. Фотограмметрической расшифровкой аэрофотосъемки построены модель рельефа и метрическая цифровая схема провала, позволившие установить параметры зоны обрушения на дневной поверхности.

Разработаны профилактические мероприятия по обеспечению безопасности ведения горных работ.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Еременко А. А., Шапошник Ю. Н., Филиппов В. Н., Коноурин 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. — С. 7–70.
5. Рудные месторождения СССР / под ред. В. И. Смирнова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Недра, 1978. — Т. 1. — 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, склонного и опасного 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. Min. Sci.*, 2018, Vol. 110. — P. 279–290.
10. **Xia-Ting Feng, Jianpo Liu, Bingrui Chen, Yaxun Xiao, Guangliang Feng, and Fengpeng Zhang.** Monitoring, Warning, and Control of Rockburst in Deep Metal Mines, *Eng.*, 2017, Vol. 3, Iss. 4. — P. 538–545.
11. **Anderson N. G.** Information as a physical quantity, *Information Sci.*, 2017, Vol. 415–416. — P. 397–413.
12. **Yang Yu, Ka-zhong Deng, Yi Luo, Shen-en Chen, and Hui-fu Zhuang.** An improved method for long-term stability evaluation of strip mining and pillar design, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2018, Vol. 107. — P. 25–30.
13. **Кочарян Г. Г., Золотухин С. Р., Калинин Э. В., Панасьян Л. Л., Спунгин В. Г.** Напряженно-деформированное 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. **Еременко А. А., Гаврилов А. Г., Штирц В. А., Писарев В. С.** Оценка геомеханического состояния породного целика между земной поверхностью и кровлей выработанного пространства при отработке слепого рудного тела на Шерегешевском месторождении // Горн. журн. — 2022. — № 1. — С. 68–73.
20. **Слепцов С. Н., Еременко А. А., Лефтор В. В., Приб В. В.** Развитие способов разгрузки массива горных пород при ведении очистных работ на удароопасном железорудном месторождении // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 12. — С. 7–12.
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 03/IV 2023*

*После доработки 10/V 2023*

*Принята к публикации 18/V 2023*