



Федеральное бюджетное учреждение науки
Институт горного дела
Уральского отделения Российской академии наук

В НОМЕРЕ:

- Теория проектирования и геотехнологические проблемы отработки месторождений полезных ископаемых
- Геотехника
- Геомеханические и геодинамические процессы при освоении недр
- Геоинформационное обеспечение при освоении недр



Сайт
<http://trud.igduran.ru>

Выпуск 4 (47)
2025

СЕТЕВОЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЕ НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ISSN 2313-1586

ПРОБЛЕМЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

PROBLEMS OF SUBSOIL USE



16+

Сетевое периодическое научное издание

ПРОБЛЕМЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

16+

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт горного дела Уральского отделения РАН

№ государственной регистрации Эл № ФС77-56413 от 11.12.2013

Выходит 4 раза в год только в электронном виде

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

С.В. Корнилов, д.т.н., проф., г.н.с., ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург – главный редактор
В.М. Аленичев, д.т.н., проф., г.н.с., ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург – зам. главного редактора

Члены редакционной коллегии:

Н.Ю. Антонинова, к.т.н., заведующая лабораторией ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург
А.А. Абдурасулов, к.ф.-м.н., советник ректора, доцент, Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан
Н.Г. Валиев, д.т.н., проф., заведующий кафедрой горного дела УГГУ, г. Екатеринбург
С.Д. Викторов, д.т.н., проф., заведующий отделом проблем геомеханики и разрушения горных пород ИПКОН РАН, г. Москва
С.Е. Гавришев, д.т.н., проф., заведующий кафедрой разработки полезных ископаемых, МГТУ им. Носова, г. Магнитогорск
С.Ж. Галиев, д.т.н., проф., чл.-корр. НАН РК, вице-президент АО «Казахстанский институт развития индустрии» Министерства индустрии и новых технологий Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан
А.В. Глебов, д.т.н., заместитель директора ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург
Ш.Ш. Заиров, д.т.н., проф., Навоийский государственный горный институт, г. Навои, Республика Узбекистан
О.В. Зотеев, д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления ИГД УрО РАН
И. В. Зырянов, д.т.н., заведующий кафедрой горного дела политехнического института (филиал) СВФУ в г. Мирном
В.С. Коваленко, д.т.н., проф., Горный институт НИТУ «МИСиС», г. Москва
К.Ч. Кожгулов, д.т.н., проф., чл.-корр НАН КР, директор Института геомеханики и освоения недр НАН КР, г. Бишкек, Киргизская Республика
И.А. Козлова, к.г.-м. н., директор института геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург
И.Л. Кравчук, д.т.н. директор Челябинского Филиала института горного дела УрО РАН, г. Челябинск
М.В. Курлена, д.т.н., проф., академик, научный руководитель ИГД СО РАН, г. Новосибирск
Ю.Г. Лаврикова, д.э.н., проф., директор Института экономики УрО РАН, г. Екатеринбург
С.В. Лукичев, д.т.н., проф., директор ГоИ КНЦ РАН, г. Апатиты
А.М. Макаров, д.т.н., проф., исполнительный директор ООО НИИОГР, г. Челябинск
А.А. Панжин, к.т.н., ученый секретарь ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург
А.Е. Пелевин д.т.н., проф. кафедры обогащения полезных ископаемых УГГУ, г. Екатеринбург
И.Ю. Рассказов, д.т.н., чл.-корр. РАН, директор Хабаровского федерального научного центра, г. Хабаровск
Л.С. Рыбникова, д.т.н., с.н.с. ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург
Д.И. Симисинов, д.т.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
И.В. Соколов, д.т.н., директор ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург
С.М. Ткач, д.т.н., директор ИГДС СО РАН, г. Якутск
С.И. Фомин, д.т.н., проф. кафедры НМСУ «Горный», г. Санкт-Петербург
Хадхуугийн Жаргалайсхан, д.т.н., директор Института горного дела Монгольского государственного университета науки и технологий, г. Улан-Батор, Монголия
Л.С. Шамганова, д.т.н., член-корреспондент НАН РК, Институт горного дела им. Д.А. Кунаева, Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан
В.Л. Яковлев, д.т.н., проф., чл.-корр. РАН, советник РАН, ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург

Издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт горного дела Уральского отделения РАН

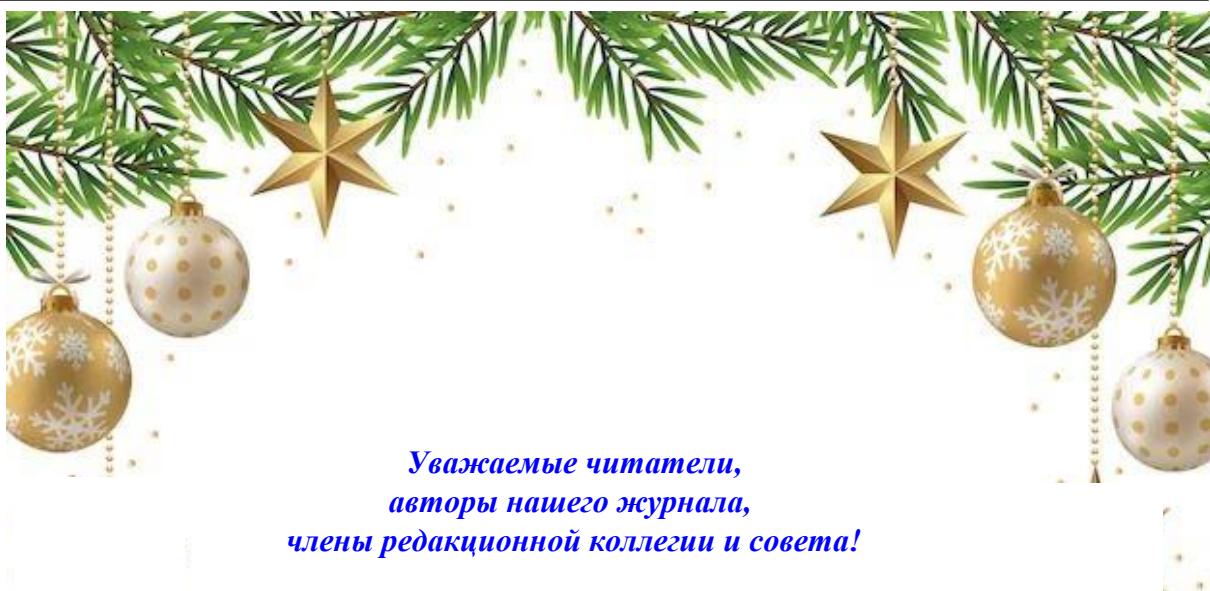
Все статьи проходят обязательное рецензирование

Адрес редакции: 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, д. 58, тел. (343)350-35-62
Сайт издания: trud.igduran.ru

Выпускающий редактор: Е.А. Катаева

Редактор: О.А. Истомина

Компьютерный набор и верстка: Я.В. Неугодникова, Т.Г. Петрова



*Уважаемые читатели,
авторы нашего журнала,
члены редакционной коллегии и совета!*

Предлагаем вам четвертый выпуск издания «Проблемы недропользования» за 2025 год. Этот номер посвящен теории проектирования и геотехнологическим проблемам отработки месторождений, геотехнике, геомеханическим и геодинамическим процессам при освоении недр, геоинформационному обеспечению при освоении недр, экологическим проблемам. Анонс представлен на сайте журнала, а также на сайте ИГД УрО РАН и в соцсетях.

Подошел к концу 2025 год – 11-й год жизни нашего журнала. Год был очень насыщенным! Мы много работали и много сделали вместе в уходящем году! Подготовка и рецензирование статей, редакторская работа, активное общение – все это было интенсивным и содержательным. Очень надеюсь, что и в новом году мы будем так же активно сотрудничать. Это прежде всего будет способствовать росту востребованности нашего издания.

Традиционно выражаю искреннюю благодарность команде журнала за созидательный труд, профессионализм, упорство и преданность общему делу!

Надеюсь, что в новом году журнал получит признание экспертного сообщества и займет место в Перечне ВАК.

Пусть наступающий год станет для нас временем новых открытий, интересных проектов и блестящих идей!

Поздравляю вас с наступающим 2026 годом! Пусть он будет наполнен множеством радостных событий и счастливых моментов, а ваше душевное состояние – гармонией и спокойствием! Крепкого здоровья, счастья, благополучия вам и вашим близким! Пусть в ваших домах царят любовь, уют и гармония, а удача сопутствует во всех начинаниях!

Счастья и успехов в Новом году!

Главный редактор
Корнилов С.В.



Содержание

ТЕОРИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Барановский К.В., Рожков А.А., Соломеин Ю.М. Особенности перехода к системам разработки с закладкой при освоении жильных месторождений.....	6
Зубков А.В., Криницын Р.В., Ушаков Е.М., Карамнов Д.В. Способ разработки мощных крутопадающих рудных тел с закладкой выработанного пространства.....	18

ГЕОТЕХНИКА

Глебов А.В. Проблемы обеспечения технологического суверенитета горнодобывающей промышленности.....	28
Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Яковлев А.М. О целесообразности повышения степени взрывного рыхления в карьере.....	36
Загирный В.А. Совершенствование подходов к управлению качеством рудопотоков в условиях АО «ЕВРАЗ КГОК» на основе геометаллургии	44
Никитин И.В. Изыскание и оценка путей повышения эффективности вскрытия запасов шахтного поля при комбинированной разработке крупных крутопадающих месторождений.....	55

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОСВОЕНИИ НЕДР

Соколов В.В., Шимкив Е.С. Использование фрактальной размерности для оценки поверхности, сформированной контурным взрыванием	66
--	-----------

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИ ОСВОЕНИИ НЕДР

Усанова А.В. Особенности организации наблюдательной станции в сложных геоморфологических условиях	75
Григорьев Д.В., Ведерников А.С. Исследования по применению сейсморазведки для разработки методики оптимизации параметров буровзрывных работ.....	84



**ТЕОРИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**



УДК 622.274.4

Барановский Кирилл Васильевич
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: karingist@list.ru

Рожков Артём Андреевич
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: 69artem@bk.ru

Соломеин Юрий Михайлович
научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДА К СИСТЕМАМ РАЗРАБОТКИ С ЗАКЛАДКОЙ ПРИ ОСВОЕНИИ ЖИЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ*

Аннотация:

Традиционные технологии освоения жильных месторождений прошли длительную апробацию и имеют большое количество достоинств. Вместе с тем им присущи и характерные недостатки, такие как низкая степень механизации процессов очистной выемки и, как следствие, невысокая производительность труда, значительные потери при системе с обрушением или подэтажных штреков с последующим обрушением целиков. Также освоение месторождений традиционными способами не позволяет в достаточной мере минимизировать объемы размещения отходов горного производства на поверхности, обеспечить повышение безопасности горных работ, повысить полноту выемки запасов и сохранить целостность земной поверхности. Таким образом, в современных реалиях для полноты и безопасности освоения недр перспективным является переход на восходящий порядок отработки месторождений технологиями с закладкой выработанного пространства пустыми породами и отходами обогатительного производства.

Предложены современные системы разработки, позволяющие осуществить реализацию полного геотехнологического цикла при освоении жильных месторождений. Разработанные технические решения основаны на применении современного самоходного оборудования на всех

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.04.006

Baranovsky Kirill V.
Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of underground geotechnology,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
58 Mamina-Sibiryaka Str., 620075 Ekaterinburg;
e-mail: karingist@list.ru

Rozhkov Artem A.
Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of underground geotechnology,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: 69artem@bk.ru

Solomein Yury M.
Researcher,
Laboratory of underground geotechnology,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS

FEATURES OF THE TRANSITION TO BACKFILLING SYSTEMS IN THE MINING OF VEIN DEPOSITS

Abstract:

Traditional technologies for the mining of vein deposits have undergone long-term testing and have a large number of advantages. At the same time, they also have characteristic disadvantages – such as a low degree of mechanization of the processes of cleaning extraction, and as a result, low labor productivity, significant losses in the system with caving or sublevel drifts with subsequent caving of pillars. Also, the mining of deposits by traditional methods does not allow to sufficiently minimize the volumes of mining waste placement on the surface, ensure increased safety of mining operations, increase the completeness of the extraction of reserves and preserve the integrity of the earth's surface. Thus, in modern realities, for the completeness and safety of subsoil mining, the transition to an ascending order of deposit mining using technologies with backfilling the mined-out space with waste rocks and beneficiation waste is promising.

The paper proposes modern mining systems that allow the implementation of a full geotechnological cycle in the mining of vein deposits. The developed technical solutions are based on the use of modern self-propelled equipment in all processes of cleaning extraction. The use of ascending mining with dry backfilling will ensure high technical and economic indicators and safety of mining operations. The possibility of storing the entire volume of waste rock in the mined-out space of the

* Исследования выполнены в рамках Гос. задания №075-00410-25-00. № гос. рег. 125070908257-0.
Тема 1 (2025-2027). Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России (FUWE-2025-0001).



процессах очистной выемки. Применение восходящего порядка отработки с сухой закладкой обеспечит высокие технико-экономические показатели и безопасность ведения горных работ. Возможность складирования всего объема пустых пород в выработанном пространстве рудника позволит сохранить окружающий массив для освоения участков забалансовых руд при пересчете кондиций. Оценка экологического потенциала данных геотехнологий по критерию возможности утилизации максимального объема отходов показала, что при мощности рудного тела более 0,6 м обеспечивается полная утилизация текущих отходов и формируются емкости для утилизации существующих или будущих отходов добычи и переработки руд.

Ключевые слова: жильные месторождения, системы разработки с закладкой, пустая порода, сухая закладка, показатели извлечения.

mine will allow preserving the surrounding massif for the mining of off-balance ore sections during recalculation of the conditions. An assessment of the environmental potential of these geotechnologies based on the criterion of the possibility of utilizing the maximum volume of waste showed that with an ore body thickness of more than 0.6 m, complete utilization of current waste is ensured and capacities are formed for the utilization of existing or future waste from mining and ore processing.

Key words: vein deposits, mining systems with backfilling, waste rock, dry backfilling, extraction indicators.

Введение

Значительная часть минерально-сырьевой базы благородных и цветных металлов Российской Федерации представлена жильными месторождениями малой мощности (0,3 – 3,0 м) [1]. Характерные особенности таких месторождений – групповое залегание жильных рудных тел с крутыми углами падения ($60 - 90^\circ$), различными размерами по простирианию (20 – 500 м и более) и высокая крепость руды ($f=10 - 18$) [2, 3]. Большое количество таких месторождений залегает в многолетнемерзлых породах [4]. Основными технологиями отработки таких месторождений являются системы с магазинированием, подэтажных штреков и подэтажного обрушения с торцевым выпуском руды погрузо-доставочными машинами (ПДМ). При данных системах применяется нисходящий порядок выемки запасов [5 – 8].

Традиционные технологии прошли длительную апробацию и имеют большое количество достоинств. Вместе с тем присущи им и характерные недостатки, такие как низкая степень механизации процессов очистной выемки и, как следствие, невысокая производительность труда, значительные потери при системе с обрушением или подэтажных штреков с последующим обрушением целиков [9 – 11]. Также освоение месторождений традиционными способами не позволяет в достаточной мере минимизировать объемы размещения отходов горного производства на поверхности, обеспечить повышение безопасности горных работ, повысить полноту выемки запасов и сохранить целостность земной поверхности [12 – 14].

Для устранения данных недостатков перспективным является переход от традиционных систем разработки к технологиям с закладкой выработанного пространства. При этом для создания условий утилизации отходов добычи и переработки руды в виде сухой закладки без добавления или с минимальным добавлением цементного вяжущего обязательным является использование восходящего порядка выемки запасов блоков или всего месторождения [15 – 17].

Таким образом, в современных реалиях для полноты и безопасности освоения недр перспективным является переход на восходящий порядок отработки месторождений технологиями с закладкой выработанного пространства пустыми породами и отходами обогатительного производства. Основными особенностями такого перехода являются необходимость учета габаритов бурового оборудования в конструктивном исполнении для работы в условиях отрицательных температур рудничной атмосферы и сопутствующее увеличение минимальной выемочной мощности вследствие механизации процесса бурения на подэтажах и в очистном пространстве.

Материалы и методы исследований

Несмотря на то что традиционные технологии являются достаточно надежными и проверены временем, они не в полной мере соответствуют современному уровню развития горной техники и темпам производства.

Основными недостатками системы разработки с магазинированием руды при малой мощности рудных тел являются значительное разубоживание (до 50 – 60 %) и ведение работ в открытом очистном пространстве (рис. 1) [18].

Этот способ весьма трудоемок и небезопасен, ввиду отсутствия возможности использования самоходных буровых установок, нахождения рабочих под обнаженной кровлей и на подвижной рудной массе. При отработке рудных тел мощностью более 3 м опасность нахождения человека в очистном пространстве увеличивается. Деление рудного тела по простирианию на блоки определяет проходку большого количества восстающих выработок, требующих обязательного крепления. В основном система применяется на рудниках с небольшой производственной мощностью [19].

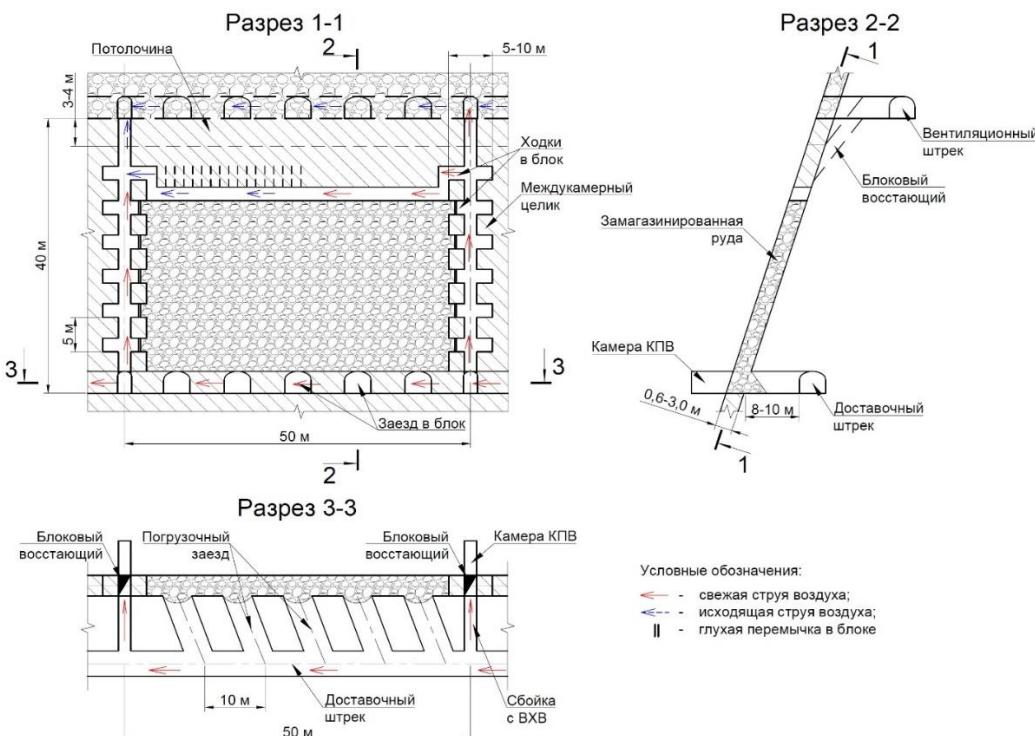


Рис. 1. Система разработки с магазинированием руды

Система с отбойкой руды из подэтажных штреков эффективна при мощности рудного тела от 3 м и более. При меньшей мощности горные работы в блоке сводятся к проходке подготовительно-нарезных выработок с небольшими перерывами на очистные работы, что отрицательно сказывается на эффективности и производительности системы [20]. Возможность применения на бурении самоходного оборудования позволяет обеспечить высокую производительность труда. Достаточно хорошие показатели извлечения при данной системе обусловлены камерной выемкой основных запасов блока (около 70 – 80 %).

Применение систем с обрушением руды и вмещающих пород, помимо низких показателей извлечения, в условиях отрицательных температур рудничной атмосферы и вмещающих пород часто влечет за собой смерзание рудной массы. Данный фактор в значительной степени затрудняет полноту выпуска, приводит к повышенным показателям потерь руды и напрямую влияет на производительность блока и всего рудника [21 – 23]. Опыт применения системы разработки подэтажного обрушения с торцевым выпуском

руды с помощью ПДМ показывает нестабильность величин показателей извлечения ввиду хаотичного распределения полезного компонента в рудном теле. Потери руды, оставляемые за переделами фигуры выпуска, в боковых гребнях на стенках траншеи и во фронтальных гребнях в торце забоя могут содержать различное количество полезного компонента [24].

При данных системах практически отсутствует возможность утилизации отходов горного производства в выработанном пространстве и сохранения налегающей толщи в процессе или после отработки выемочной единицы.

Следовательно, для повышения безопасности ведения горных работ и создания условий для размещения отходов, необходимо рассмотреть варианты подземной геотехнологии на основе максимальной механизации и автоматизации технологических процессов и заполнения выработанного пространства пустыми породами в виде сухой заливки.

Результаты исследований и их обсуждение

Для жил с мощностью, близкой к ширине горных выработок, рационально применять подэтажно-камерную систему разработки с сухой закладкой, без оставления целиков и применением скважинной отбойки (рис. 2). При длине рудного тела по простиранию свыше 300 м его делят на панели. Технология заключается в выемке рудных тел блоками с подэтажной отбойкой руды рядами скважин и последующей закладкой выработанного пространства породным материалом. Длину блока принимают равной длине эффективной работы применяемого самоходного оборудования (около 250 м). В пределах этажа рудное тело разбивается на подэтажи высотой 12,5 – 20,0 м. Подготовку блоковых запасов к выемке осуществляют двумя фланговыми спиральными съездами (закладочным и транспортным) и заездами на подэтажи. Для обеспечения очистных и закладочных работ накопительными емкостями в каждом заезде проходят перегрузочные камеры. Выработки могут использоваться для отработки соседних блоков. При отработке рудных тел незначительной длины по простиранию возможны варианты подготовки блока одним съездом и вентиляционно-ходовым восстающим.

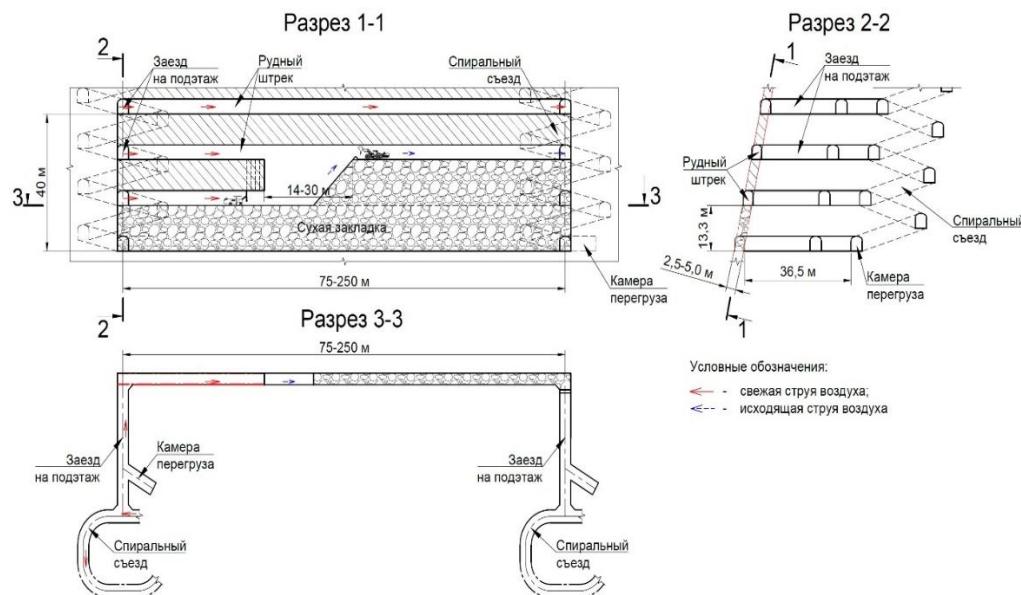


Рис. 2. Подэтажно-камерная система разработки с сухой закладкой

Отбойка запасов руды в камере производится секциями. После проветривания в буро-доставочном штреке при помощи ПДМ с дистанционным управлением (ДУ) производят уборку отбитой руды и ее доставку в перегрузочную камеру, где она грузится

непосредственно в шахтный автосамосвал либо временно складируется до его приезда. Закладка выработанного пространства производится путем наращивания навала из отходов добычи или переработки при помощи ПДМ из заезда на вышележащий подэтаж. Формирование навала в выработанном пространстве производится сталкиванием закладочного материала и последующим планированием его поверхности. Таким образом, происходит постепенное заполнение выработанного пространства и создание почвы вентиляционно-закладочного штрека. После полной закладки камеры данный штрек будет служить буро-доставочной выработкой для отработки запасов следующего подэтажа.

Для предотвращения опрокидывания ПДМ в камеру, по аналогии с технологией формирования породных отвалов на поверхности, сталкивание закладочного материала в выработанное пространство производится вторым ковшом с оставлением на краю откоса предохранительного вала шириной и высотой не менее 1,5 и 0,5 м, соответственно.

По мере наращивания закладочного массива производится его уплотнение весом ПДМ. После закладки камеры, с целью снижения потерь обогащенной рудной мелочи [25, 26], производят подсыпку почвы породой мелких фракций для заполнения пустот в верхнем слое закладочного материала. Также возможна дополнительная проливка поверхности цементным молочком. Закладочные работы совмещаются по времени с бурением на добычном фланге последующих рядов скважин.

С целью снижения разубоживания от прирезки боковых пород для рудных тел с мощностью менее 3 м и сложной морфологией целесообразно применять варианты системы разработки горизонтальными слоями с селективной выемкой руды и сухой закладкой (рис. 3).

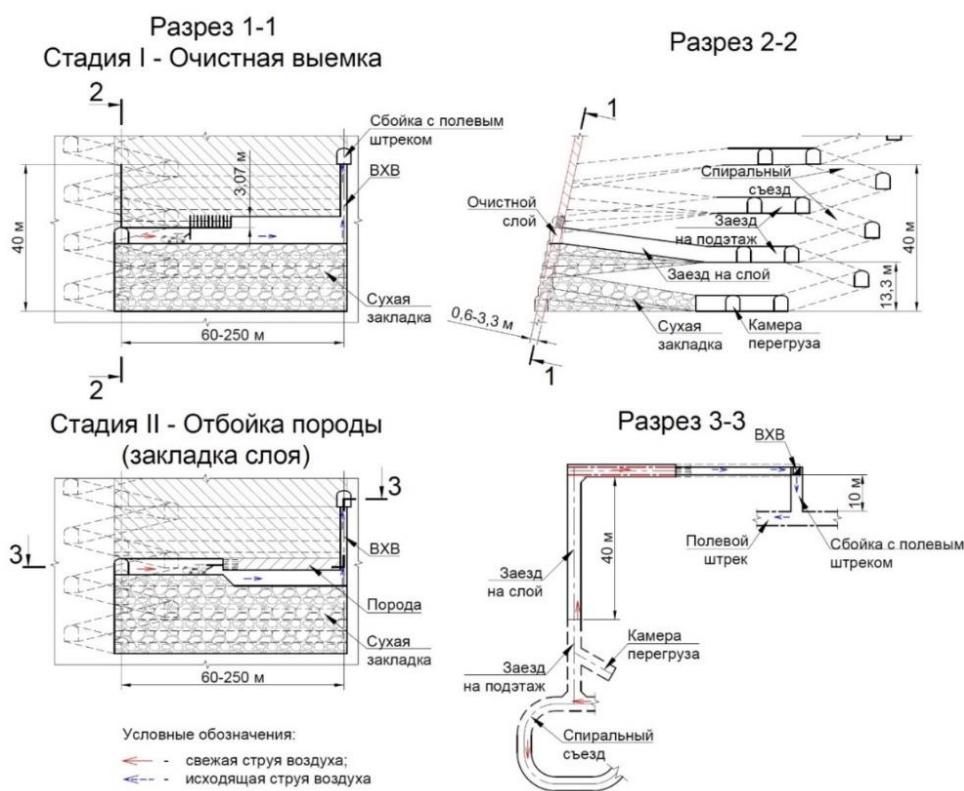


Рис. 3. Система разработки горизонтальными слоями с селективной выемкой руды и сухой закладкой

Отработка запасов блока производится послойно снизу вверх без оставления междублочных целиков. Схема подготовки отличается от подэтажно-камерной системы разработки наличием заездов на каждый слой. Нарезные работы включают в себя проходку подсечного рудного штрека в основании блока. Очистная выемка производится из

подсечного штрека путем бурения восходящих шпуров, селективной отбойки, погрузки и доставки руды с помощью ПДМ с ДУ. Отбойку ведут секциями, объемы которых определяются из условия максимальной производительности и эффективности работы ПДМ в течение смены. После выемки рудного слоя производится формирование сечения подсечного штрека следующего слоя путем отбойки пустых пород на образованную щель. Вся отбитая порода остается на почве слоя в качестве закладочного материала.

Удельный расход закладочного материала при системе разработки горизонтальными слоями зависит от мощности рудного тела и размеров поперечного сечения слоевой выработки, которая определяет минимальную выемочную мощность [27 – 30]. Также влияет степень разрыхления и последующей усадки породного закладочного материала. График зависимости удельного расхода закладочного материала от мощности рудного тела при минимальном сечении выработки для малогабаритной техники с остекленным исполнением кабины ($13,6 \text{ м}^2$) и различной плотности руды представлен на рис. 4. Видно, что при мощности рудного тела менее 0,6 м не требуется дополнительного закладочного материала. Отрицательные значения на графике показывают излишки образующейся при отбойке породы, которую нужно вывезти из блока. Положительные значения показывают дополнительное количество породного закладочного материала, необходимое для полной закладки выработанного пространства.

При небольших отставаниях высоты почвы слоя процессы обуривания пустых пород и дозакладки слоя могут быть совмещены с целью увеличения производительности процесса. При этом фронт отбойки пустых пород идет с опережением фронта дозакладки. ПДМ работает до границы рабочей зоны буровой установки.

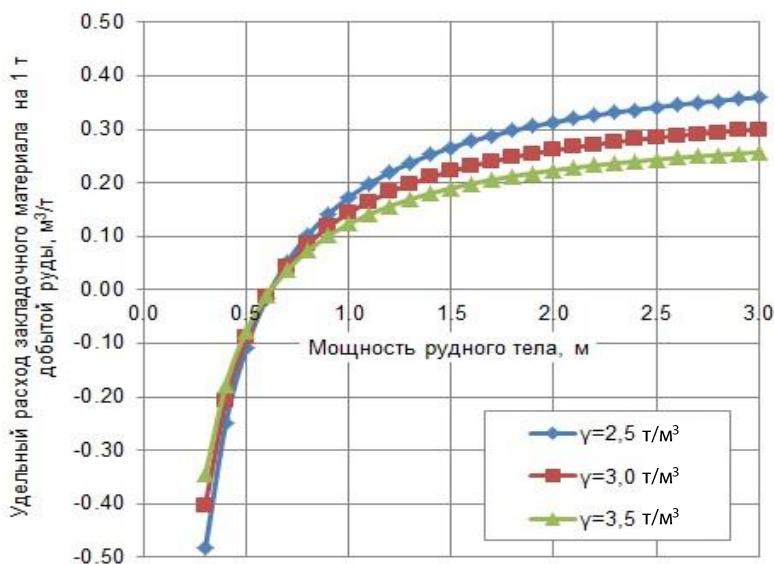


Рис. 4. Зависимость удельного расхода породной закладки от мощности рудного тела при различной плотности руды в массиве

С целью уменьшения потерь руды после формирования почвы слоевого штрека производят подсыпку мелкофракционного материала для заполнения пустот в верхнем слое закладочного материала. Также возможна дополнительная проливка поверхности цементным молочком. Слой является разделителем поверхности закладочного массива и вновь отбиваемой рудой. В качестве материала для подсыпки могут использоваться песок или породы из проходческих забоев.

После полной закладки слоя, выравнивания и уплотнения закладочного материала цикл повторяется. Для заезда на следующий слой после отбойки и уборки первой секции руды подбивают кровлю действующего заезда, после чего проводится оборка и крепление вновь образованной кровли.



Технико-экономические показатели технологий с закладкой и базовыми системами разработки маломощных жильных месторождений представлены в табл. 1.

Таблица 1
Технико-экономические показатели систем разработки

Наименование показателя	Системы разработки			
	Магазинирование	Горизонтальные слои	Подэтажные штреки	Подэтажно-камерная с закладкой
Средняя мощность рудного тела, м	1,2	1,2	3,0	3,0
Высота этажа, м	50	50	50	50
Средняя длина блока, м	50	100	60	120
Балансовые запасы блока, т	7500	15000	22500	45000
Потери, %	7,78	8,27	9,25	5,12
Разубоживание, %	11,57	2,98	9,82	8,22
Эксплуатационные запасы блока, т	7821	14182	22642	46520
Удельный расход ПНР на 1000 т добытой руды, м ³ /м ³	33,7 / 336,6	38,1 / 319,2	11,8 / 104,7	13,3 / 178,1
Производительность труда подземного рабочего по системе разработки, м ³ /чел.-смену	1,5	5,4	8,0	15,6
Производительность, т/сут	152	100	228,8	453
Годовая производительность системы разработки по очистному блоку, тыс. т/год	55,42	36,38	83,52	165,49

Заключение

Освоение жильных месторождений России с помощью классических технологий не позволяет в полной мере ответить современным глобальным вызовам, среди которых минимизация размещения отходов горного производства на земной поверхности и полнота извлечения запасов недр. Решением данной проблемы может служить переход на системы разработки с восходящей выемкой и сухой закладкой, обеспечивающий возможность складирования значительного объема пустых пород в выработанном пространстве с сохранением целостности окружающего массива. Оценка экологического потенциала данных геотехнологий по критерию возможности утилизации максимального объема отходов показала, что при мощности рудного тела более 0,6 м обеспечивается полная утилизация текущих отходов и формируются емкости для утилизации существующих или будущих отходов добычи и переработки руд.



Список литературы

1. Яковлев В.Л., 2020. О методологии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых для разработки стратегии развития минерально-сырьевой базы России. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 7, С. 5-20. DOI 10.21440/0536-1028-2020-7-5-20.
2. Яковлев В.Л., Корнилков С.В., Соколов И.В., 2018. Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 360 с.
3. Пацкевич П.Г., Айнбinder И.И., Григорьев Н.В., Красюкова Е.В., 2023. Учет состояния и строения массива при выборе способов поддержания подземных горных выработок в условиях разработки жильных месторождений Крайнего Севера. *Горный журнал*, № 1, С. 124-129. DOI 10.17580/gzh.2023.01.21.
4. Яковлев В.Л., 2022. О необходимости разработки Программы комплексного освоения и развития минерально-сырьевой базы Республики Саха (Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*, Т. 27, № 3, С. 363-369. DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-3-363-369.
5. Li S., Yu L., Dan Z., Yin T., Chen J., 2024. The Recent Progress China Has Made in Mining Method Transformation, Part I: Shrinkage Method Transformed into Backfilling Method. *Applied Sciences*, 14, 10033. DOI: 10.3390/app142110033
6. Brand L., Haider K., 2023. Sublevel Shrinkage (SLSH) Mining – A State-of-the-art Review Sublevel Shrinkage (SLSH) Mining – Stand der Technik. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 168(6). DOI: 10.1007/s00501-023-01354-3
7. Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Никитин И.В., Рожков А.А., Соломеин Ю.М., Дедов О.Ю., 2018. Особенности подземной разработки Ветренского золоторудного месторождения. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 4, С. 12-22. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-4-12-22.
8. Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л., Павлов А.М., 2022. Обоснование безопасных и эффективных систем разработки маломощных крутопадающих рудных тел на глубинах свыше 1000 м. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 2, С. 169-180. DOI 10.46689/2218-5194-2022-2-1-169-180.
9. Павлов А.М., Васильев Д.С., 2017. Повышение эффективности подземной разработки тонких крутопадающих жил. *Горная промышленность*, № 1, С. 86-87.
10. Маилян Л.С., 2020. Отбор технически применяемых систем подземной разработки весьма тонких и тонких крутопадающих рудных тел. *Вестник Национального политехнического университета Армении. Металлургия, материаловедение, недропользование*, № 2, С. 80-91.
11. Пирогов Г.Г., Подопригора В.Е., 2023. Комплексно-механизированная разработка рудных тел с магазинированием руды. *Горный журнал*, № 7, С. 46-49. DOI 10.17580/gzh.2023.07.07.
12. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Рожков А.А., Соломеин Ю.М., 2023. Экогеотехнология добычи бедных руд с созданием условий для попутной утилизации отходов горного производства. *Записки Горного института*, Т. 260, С. 289-296. DOI 10.31897/PMI.2023.21.
13. Боровиков Е.В., Мажитов А.М., 2023. Технология формирования закладочного массива с заданными геотехническими характеристиками. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 2, С. 52-61. DOI 10.21440/0536-1028-2023-2-52-61.
14. Мажитов А.М., 2021. Оценка степени техногенного преобразования участка недр при разработке месторождения с обрушением руды и вмещающих пород в восходящем порядке. *Горная промышленность*, № 4, С. 113-118. DOI 10.30686/1609-9192-2021-4-113-118.
15. Зубков А.В., 2001. *Геомеханика и геотехнология*. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 335 с.



16. Волков Ю.В., Смирнов А.А., Соколов И.В., Камаев В.Д., 2003. Подземная геотехнология разработки с восходящей выемкой. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, №3, С. 34-40.
17. Волков Ю.В., Соколов И.В., 2006. *Подземная разработка медноколчеданных месторождений Урала*. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 232 с.
18. Неганов В.П., 1995. *Технология разработки золоторудных месторождений*. Москва: Недра, 336 с.
19. Глотов В.В., 2009. Обоснование рациональных размеров шахтных полей при разработке жильных месторождений. *Вестник Читинского государственного университета*, № 2(53), С. 28-34.
20. Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Рожков А.А., Клюев М.В., 2020. Обзор комбинированных систем подземной разработки рудных месторождений. *Проблемы недропользования*, № 3(26), С. 5-22. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.03.005.
21. Савич И.Н., 2014. Проблемы применения систем с принудительным обрушением при подземной разработке рудных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S1, С. 366-373.
22. Зубков В.П., Петров Д.Н., 2022. Влияние режима выпуска руды на потери от смерзания при подземной разработке месторождений криолитозоны. *Горная промышленность*, № 2, С. 76-80. DOI 10.30686/1609-9192-2022-2-76-80.
23. Соколов И.В., Рожков А.А., Барановский К.В., Соломеин Ю.М., 2025. Изыскание направлений снижения ущерба от переизмельчения металлических руд при системах разработки с обрушением. *Взрывное дело*, № 146-103, С. 70-88.
24. Рожков А.А., 2021. Систематизация способов снижения потерь рудной мелочи при подземной разработке месторождений. *Проблемы недропользования*, № 3(30), С. 16-28. DOI 10.25635/2313-1586.2021.03.016.
25. Соколов И.В., Рожков А.А., Антипин Ю.Г., 2023. Методический подход к обоснованию технологий снижения ущерба от переизмельчения руды при подземной разработке. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 3, С. 352-367. EDN NFGXWZ.
26. Соколов И.В., Рожков А.А., Барановский К.В., 2023. Параметризация технологии снижения ущерба от переизмельчения руды при подземной разработке месторождений. *Горная промышленность*, № 5, С. 78-82. DOI 10.30686/1609-9192-2023-5-78-82.
27. Бронников Д.М., Цыгалов М.Н., 1989. *Закладочные работы в шахтах: Справочник*. Москва: Недра, 398 с.
28. Рыльникова М.В., Джаппуев Р.К., Цупкина М.В., Габараев О.З., 2024. Концепция устойчивого развития горнопромышленного региона Кабардино-Балкарии на основе использования хвостов обогащения Тырныаузской фабрики в закладке выработанного пространства. *Устойчивое развитие горных территорий*, № 1(59), С. 181-196. DOI 10.21177/1998-4502-2024-16-1-181-196.
29. Крупник Л.А., Шапошник Ю.Н., Шапошник С.Н., 2015. Разработка технологии закладочных работ на руднике Теллур ТОО «Акмола Голд». *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 10-16.
30. Cai S.J., Lyu W.S., Wu D., Yang P., 2017. Mining method optimization of Bayi gold mine based on the value engineering principle. *Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology, Australian Centre for Geomechanics, 2017, Perth*, pp. 511-521.

References

1. Yakovlev V.L., 2020. O metodologii kompleksnogo osvoeniya zapasov mesto-rozhdenii tverdykh poleznykh iskopаемых dlya razrabotki strategii razvitiya mineral'no-syr'evoi bazy Rossii. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii* [On the methodology of integrated devel-



opment of reserves of solid mineral deposits for the development of a strategy for the development of the mineral resource base of Russia]. Gornyi zhurnal, № 7, P. 5-20. DOI 10.21440/0536-1028-2020-7-5-20.

2. Yakovlev V.L., Kornilkov S.V., Sokolov I.V., 2018. Innovatsionnyi bazis strategii kompleksnogo osvoeniya resursov mineral'nogo syr'ya [Innovative basis of the strategy of integrated development of mineral resources]. Ekaterinburg: Ural'skoe otdelenie RAN, 360 p.

3. Patskevich P.G., Ainbinder I.I., Grigor'ev N.V., Krasyukova E.V., 2023. Uchet sostoyaniya i stroeniya massiva pri vybore sposobov podderzhaniya podzemnykh gornykh vyrabotok v usloviyakh razrabotki zhil'nykh mestorozhdenii Krainego Severa [Consideration of the condition and structure of the massif when choosing ways to maintain underground mining operations in the conditions of the development of vein deposits in the Far North]. Gornyi zhurnal, № 1, P. 124-129. DOI 10.17580/gzh.2023.01.21.

4. Yakovlev V.L., 2022. O neobkhodimosti razrabotki Programmy kompleksnogo osvoeniya i razvitiya mineral'no-syr'evoi bazy Respubliki Sakha (Yakutiya) [On the need to develop a program for the integrated development of the mineral resource base of the Republic of Sakha (Yakutia)]. Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki, Vol. 27, № 3, P. 363-369. DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-3-363-369.

5. Li S., Yu L., Dan Z., Yin T., Chen J., 2024. The Recent Progress China Has Made in Mining Method Transformation, Part I: Shrinkage Method Transformed into Backfilling Method. *Applied Sciences*, 14, 10033. DOI: 10.3390/app142110033

6. Brand L., Haider K., 2023. Sublevel Shrinkage (SLSH) Mining – A State-of-the-art Review Sublevel Shrinkage (SLSH) Mining – Stand der Technik. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 168(6). DOI: 10.1007/s00501-023-01354-3

7. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Baranovskii K.V., Nikitin I.V., Rozhkov A.A., Solomein Yu.M., Dedov O.Yu., 2018. Osobennosti podzemnoi razrabotki Vetreneskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii [Peculiarities of the underground mining of the Vetrenskoye gold deposit]. Gornyi zhurnal, № 4, P. 12-22. DOI 10.21440/0536-1028-2018-4-12-22.

8. Avdeev A.N., Sosnovskaya E.L., Pavlov A.M., 2022. Obosnovanie bezopasnykh i effektivnykh sistem razrabotki malomoshchnykh krutopadayushchikh rudnykh tel na glubinakh svyshe 1000 m [Substantiation of safe and effective systems for the development of low-power steep-falling ore bodies at depths above 1000 m]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle, № 2, P. 169-180. DOI 10.46689/2218-5194-2022-2-1-169-180.

9. Pavlov A.M., Vasil'ev D.S., 2017. Povyshenie effektivnosti podzemnoi razrabotki tonkikh krutopadayushchikh zhil [Improving the efficiency of underground mining of thin, steeply sinking veins]. Gornaya promyshlennost', № 1, P. 86-87.

10. Mailyan L.S., 2020. Otbor tekhnicheskii primenyaemykh sistem podzemnoi razrabotki ves'ma tonkikh i tonkikh krutopadayushchikh rudnykh tel. Vestnik Natsional'nogo politekhnicheskogo universiteta Armenii [Selection of technically applicable subsurface mining systems for very thin and thin steeply falling ore bodies]. Metallurgiya, materialovedenie, nedropol'zovanie, № 2, S. 80-91.

11. Pirogov G.G., Podoprigora V.E., 2023. Kompleksno-mekhanizirovannaya razrabotka rudnykh tel s magazinirovaniem rudy [Complex mechanized mining of ore bodies with ore storage]. Gornyi zhurnal, № 7, S. 46-49. DOI 10.17580/gzh.2023.07.07.

12. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Rozhkov A.A., Solomein Yu.M., 2023. Ekogeotekhnologiya dobychi bednykh rud s sozdaniem uslovii dlya poputnoi utilizatsii otkhodov gornogo proizvodstva [The ecogeotechnology of mining poor ores with the creation of conditions for the proper disposal of mining waste]. Zapiski Gornogo instituta, Vol. 260, P. 289-296. DOI 10.31897/PMI.2023.21.

13. Borovikov E.V., Mazhitov A.M., 2023. Tekhnologiya formirovaniya zakladochnogo massiva s zadannymi geotekhnicheskimi kharakteristikami. Izvestiya vysshikh



учебных заведений [Technology of forming a laying array with specified geotechnical characteristics]. Gornyi zhurnal, № 2, P. 52-61. DOI 10.21440/0536-1028-2023-2-52-61.

14. Mazhitov A.M., 2021. Otsenka stepeni tekhnogennogo preobrazovaniya uchastka nedr pri razrabotke mestorozhdeniya s obrusheniem rudy i vmeschchayushchikh porod v voskho-dyashchem poryadke [Assessment of the degree of man-made transformation of a subsurface area during the development of a deposit with the collapse of ore and host rocks in ascending order]. Gornaya promyshlennost', № 4, P. 113-118. DOI 10.30686/1609-9192-2021-4-113-118.

15. Zubkov A.V., 2001. Geomekhanika i geotekhnologiya [Geomechanics and geotechnology]. Ekaterinburg: Ural'skoe otdelenie RAN, 335 p.

16. Volkov Yu.V., Smirnov A.A., Sokolov I.V., Kamaev V.D., 2003. Podzemnaya geotekhnologiya razrabotki s voskhodyashchei vyemkoi [Underground mining geotechnology with an upward excavation]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal, № 3, P. 34-40.

17. Volkov Yu.V., Sokolov I.V., 2006. Podzemnaya razrabotka mednokolchedannykh mestorozhdenii Urala [Underground mining of copper-ore deposits in the Urals]. Ekaterinburg: Ural'skoe otdelenie RAN, 232 p.

18. Neganov V.P., 1995. Tekhnologiya razrabotki zolotorudnykh mestorozhdenii [Technology for the development of gold deposits]. Moscow: Nedra, 336 p.

19. Glotov V.V., 2009. Obosnovanie ratsional'nykh razmerov shakhnykh polei pri razrabotke zhil'nykh mestorozhdenii [Justification of the rational size of mine fields in the development of vein deposits]. Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta, № 2(53), P. 28-34.

20. Antipin Yu.G., Baranovskii K.V., Rozhkov A.A., Klyuev M.V., 2020. Obzor kombinirovannykh sistem podzemnoi razrabotki rudnykh mestorozhdenii [Overview of combined underground mining systems of ore deposits]. Problemy nedropol'zovaniya, № 3(26), P. 5-22. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.03.005.

21. Savich I.N., 2014. Problemy primeneniya sistem s prinuditel'nym obrusheniem pri podzemnoi razrabotke rudnykh mestorozhdenii [Problems of using the system with engineering and technical developments]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № S1, P. 366-373.

22. Zubkov V.P., Petrov D.N., 2022. Vliyanie rezhima vypuska rudy na poteri ot smerzaniya pri podzemnoi razrabotke mestorozhdenii kriolitozony [Effect of the ore release regime on freezing losses during underground mining of cryolithozone deposits]. Gornaya promyshlennost', № 2, P. 76-80. DOI 10.30686/1609-9192-2022-2-76-80.

23. Sokolov I.V., Rozhkov A.A., Baranovskii K.V., Solomein Yu.M., 2025. Izyskanie napravlenii snizheniya ushcherba ot pereizmel'cheniya metallicheskikh rud pri sistemakh razrabotki s obrusheniem [Finding ways to reduce damage from the over-grinding of metallic ores in mining systems with collapse]. Vzryvnoe delo. № 146-103, P. 70-88.

24. Rozhkov A.A., 2021. Sistematisatsiya sposobov snizheniya poter' rudnoi melochi pri podzemnoi razrabotke mestorozhdenii [Systematization of ways to reduce the loss of ore fines during underground mining]. Problemy nedropol'zovaniya, № 3(30), P. 16-28. DOI 10.25635/2313-1586.2021.03.016.

25. Sokolov I.V., Rozhkov A.A., Antipin Yu.G., 2023. Metodicheskii podkhod k obosnovaniyu tekhnologii snizheniya ushcherba ot pereizmel'cheniya rudy pri podzemnoi razrabotke. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta [Methodological approach to substantiating technologies for reducing damage from ore over-grinding during underground mining]. Nauki o Zemle, № 3, P. 352-367. EDN NFGXWZ.

26. Sokolov I.V., Rozhkov A.A., Baranovskii K.V., 2023. Parametrizatsiya tekhnologii snizheniya ushcherba ot pereizmel'cheniya rudy pri podzemnoi razrabotke mestorozhdenii [Pa-



rameterization of the technology for reducing damage from over-grinding of ore during subsurface mining]. Gornaya promyshlennost', № 5, P. 78-82. DOI 10.30686/1609-9192-2023-5-78-82.

27. Bronnikov D.M., TSagalov M.N., 1989. Zakladochnye raboty v shakhtakh: Spravochnik [Laying works in mines: A reference book]. Moscow: Nedra, 398 p.

28. Ryl'nikova M.V., Dzhappuev R.K., TSupkina M.V., Gabaraev O.Z., 2024. Konseptsiya ustoichivogo razvitiya gornopromyshlennogo regiona Kabardino-Balkarii na osnove ispol'zovaniya khvostov obogashcheniya Tyrnyauzskoi fabriki v zakladke vyrabotannogo prostranstva [The concept of sustainable development of the mining region of Kabardino-Balkaria based on the use of tailings from the Tyrnyauz factory in the developed space]. Ustoichivoe razvitiye gornoikh territorii, № 1(59), S. 181-196. DOI 10.21177/1998-4502-2024-16-1-181-196.

29. Krupnik L.A., SHaposhnik Yu.N., SHaposhnik S.N., 2015. Razrabotka tekhnologii zakladochnykh rabot na rudnike Tellur TOO «Akmola Gold» [Development of the technology of laying works at the Tellur mine of Akmola Gold LLP]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 11, P. 10-16.

30. Cai S.J., Lyu W.S., Wu D., Yang P., 2017. Mining method optimization of Bayi gold mine based on the value engineering principle. *Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology, Australian Centre for Geomechanics, 2017, Perth*, pp. 511-521.



УДК 622.833.5

Зубков Альберт Васильевич

доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
лаборатория геодинамики и горного давления,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: stress.igd@mail.ru

Криницын Роман Владимирович

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией геодинамики
и горного давления,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: krin@igduran.ru

Ушаков Евгений Михайлович

младший научный сотрудник,
лаборатория геодинамики и горного давления,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: ushak@mail.ru

Карамнов Дмитрий Викторович

младший научный сотрудник,
лаборатория геодинамики и горного давления,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: MarlouBT2011@yandex.ru

СПОСОБ РАЗРАБОТКИ МОЩНЫХ КРУТОПАДАЮЩИХ РУДНЫХ ТЕЛ С ЗАКЛАДКОЙ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА***Аннотация:**

В соответствии с законом формирования природных напряжений величина на глубинах более 500 м, т.е. ниже зоны дезинтеграции массива, с учетом гравитационно-тектонических напряжений может возрасти до -130 ÷ -160 МПа. При ведении горных работ в этих условиях в приконтурном массиве очистных и подготовительных выработок величина напряжений может превысить -200 ÷ -300 МПа, что уже частично наблюдается при ведении очистных работ на шахте «Естюнинская», где напряжения в лобовиках дучек достигают -240 ÷ -300 МПа, и они разрушились: в кровле скреперных ортов - 270 МПа; в кровле погрузочных штреков - 250 МПа; в стенах -170 ÷ -240 МПа.

На других рудниках с менее прочными породами такая ситуация потребует проведения специальных работ по укреплению массива горных пород или внедрению новых способов разработки месторождений.

В данной статье предложен способ разработки мощных крутопадающих рудных тел с закладкой выработанного пространства, включающий отработку очистных камер первой и последующих очередей, кровли и днищ которых придают полигональную форму. Он отличается от похожих способов тем, что работы ведутся с

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.04.018

Zubkov Albert V.

Doctor of Technical Sciences,
Chief Researcher,
Laboratory of geodynamics and rock pressure,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
58 Mamina-Sibiryak Str.,
620075 Ekaterinburg
e-mail: stress.igd@mail.ru

Krinitsyn Roman V.

Candidate of Technical Sciences,
Head of the Laboratory of geodynamics
and rock pressure,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: krin@igduran.ru

Ushakov Evgeny M.

Junior Researcher,
Laboratory of geodynamics and rock pressure,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: ushak@mail.ru

Karamnov Dmitry V.

Junior Researcher,
Laboratory of geodynamics and rock pressure,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: MarlouBT2011@yandex.ru

METHOD FOR DEVELOPING POWERFUL STEEP-DIVIDING ORE BODIES WITH BACKING OF WORKED OUT SPACE**Abstract:**

In accordance with the law of formation of natural stresses, the value at depths of more than 500 m, i.e. below the zone of disintegration of the massif, taking into account gravitational and tectonic stresses, can increase to -130 – -160 MPa. When mining operations are carried out under these conditions, in the contiguous array of treatment and preparatory workings, the stresses can exceed -200 – -300 MPa, which is already partially observed during cleaning operations at the Estyuninskaya mine, where the stresses in the lobes of the ducklings reach -240 – -300 MPa and they collapsed: in the roof of the scraper shafts -270 MPa; in the roof of loading shafts - 250Mpa, and in the walls -170 – -240 MPa. In other mines with less durable rocks, this situation will require special work to strengthen the rock mass or introduce new methods of field development.

In this article, a method is proposed for the development of powerful steeply falling ore bodies with the laying of a developed space, including the development of purification chambers of the first and subsequent stages, the roof and bottom of which are given a polygonal shape. It differs from similar methods, in that the work is carried out with the abandonment of the interstitial diamond-shaped pillars of an

* Исследования выполнены в рамках Гос. задания №075-00410-25-00. № гос. рег. 123012300007-7.
Тема 3 (2025-2027)



оставлением межэтажных ромбовидных целиков асимметричной формы. Асимметричные целики обеспечивают заклинивание и смещение пород и исключают подвижки в сторону нижних горизонтов, что позволяет осуществлять очистные работы на нескольких горизонтах.

Ключевые слова: управление горным давлением, ромбовидные целики, высокое напряженное состояние, порядок отработки, камерная система разработки.

asymmetric shape. The asymmetric pillars ensure rock jamming and displacement and exclude movements towards the lower horizons, which allows cleaning operations to be carried out on several horizons.

Key words: rock pressure control, block system, high stress state, order mine of the deposit, camera development system.

Введение

Тенденция к увеличению глубины ведения горных работ неизбежно связана с проблемой возрастания величины напряжений, действующих в массиве горных пород, что может приводить к нарушению его устойчивости и повреждению горных выработок. Обеспечение устойчивости очистных выработок является актуальной задачей, от результата решения которой во многом зависит эффективность и безопасность работы горнодобывающих предприятий [1].

Оценка устойчивости горных конструкций должна базироваться на знании природного поля напряжений на территории объекта (напряженно-деформированного состояния массива пород), его перераспределения в элементах конструкций и сравнении с прочностными и деформационными характеристиками материала конструкции (горной породы, бетона и т.п.).

К настоящему времени как в РФ, так и за рубежом накоплена огромная база данных о величине природных напряжений в массивах горных пород как функции гравитационных и тектонических напряжений, являющихся постоянными в исследованной точке горного массива участка земной коры. В то же время геологи считают, что Земле присущи циклические изменения размеров и вызываемая этим явлением деформация земной коры (массива горных пород). Геологические циклы деформации Земли имеют периодичность от часов до миллиардов лет.

Аварийные ситуации на сооружениях,озведенных в массиве горных пород, связаны с изменением его напряженно-деформированного состояния, имеющего переменную величину в результате объемного и равномерного периодического расширения и сжатия Земли. В соответствии с физическим законом о том, что природное напряженное состояние земной коры формируется в результате наложения полей напряжений, обусловленных гравитационными и тектоническими силами Земли, а также переменными астрофизическими силами, оно представлено нормальными компонентами тензора напряжений.

Одним из важнейших факторов, определяющих развитие опасных процессов в массиве горных пород, является изменение природных напряжений во времени, которые в сочетании с иерархически-блочной структурой массива за счет техногенных процессов формируют в нем неоднородное напряженно-деформированное состояние, в котором величины напряжений и деформаций значительно отличаются от средних значений. Устойчивость и безопасность объектов недропользования, оказавшихся связанными с этой неоднородной и нестабильной средой, всецело зависят от их местоположения относительно активных структурных элементов массива горных пород с повышенными деформациями и напряжениями [2 – 4].

В качестве одной из мер, направленных на повышение устойчивости очистных выработок, предлагается выбор оптимального способа отработки запасов. В данной статье представлена камерная схема отработки рудного тела с твердеющей закладкой выработанного пространства, находящегося на большой глубине в условиях повышенных напряжений.



В настоящее время основные трудности при эксплуатации этажно-камерных систем разработки связаны с проблемами безопасности ведения очистных работ добычи полезного ископаемого и ухудшением технико-экономических показателей.

Объект исследования

Данный способ был рассмотрен для условий Гайского месторождения медно-колчеданных руд, являющегося одним из крупнейших в мире. В составе уникальной Гайской руды, кроме меди, содержатся цинк, свинец, сера, золото, серебро, а также редкие и рассеянные элементы. На сегодняшний день Гайский горно-обогатительный комбинат занимает второе место в Российской Федерации после сырьевого производства Норильского района. Все добываемые руды перерабатываются на собственной обогатительной фабрике комбината. Основными видами товарной продукции являются медный и цинковый концентраты.

Месторождение представлено несколькими изолированными рудными залежами сложных линзообразных и жилообразных форм, различающимися по минеральному составу (сплошной медный колчедан, медно-цинковый колчедан, серный колчедан и прожилково-вкрапленные руды). Рудовмещающая свита представлена альбитофирами, туфобрекчиями, туфами основного и смешанного составов, интенсивно рассланцованными и окварцованными.

С целью ускорения вовлечения в эксплуатацию богатых руд и увеличения мощности предприятия разработку месторождения вели комбинированным способом с совмещением открытых и подземных работ.

На данный момент рудные тела отрабатываются этажно-камерной системой разработки с твердеющей закладкой с применением самоходного оборудования. При мощности рудного тела до 15 – 20 м длинная сторона камер располагается по простирианию, при большей мощности – вкрест простириания рудного тела. Параметры очистных камер следующие: длина 30 – 80 м (или равна мощности рудного тела), ширина 20 м, высота камеры равна высоте этажа 80 м. Толщина днища и размещение буровых горизонтов определяются из параметров предельной глубины бурения и составляют 25 – 30 м.

После выемки камерных запасов производится заполнение очистной камеры закладочной смесью. В качестве вяжущего материала используется цемент, а в качестве заполнителя – хвосты обогатительной фабрики. Прочность закладки составляет от 0,5 до 3 МПа в зависимости от очередности отработки камер.

Результаты исследований

Полученные результаты на Гайском подземном руднике послужили основанием для представления новой гипотезы формирования природных напряжений в массиве горных пород (табл. 1). Также была выдвинута гипотеза, заключающаяся в том, что изменение с высокой частотой напряженно-деформированного состояния массива обусловлено в том числе астрофизическими полями и излучениями, а не только тектоническими силами, как считалось ранее [2].

Исследованиями по определению устойчивости очистных камер, проводимыми на Гайском подземном руднике, было установлено, что обрушение пород висячего бока достигало 20 % от общей длины камеры, а высота свода обрушения кровли достигала 8 м.

При самообрушении горных пород висячего бока и кровли камер возрастают потери и разубоживание руды, создавая дополнительные сложности при обогащении руды, что в свою очередь приводит к увеличению себестоимости добычи и существенно ухудшает технико-экономические показатели по предприятию в целом [5–7].



Таблица 1
Гипотезы формирования природных напряжений в массиве горных пород

Автор гипотезы	Гипотеза
А. Гейм, 1878 г.	$\sigma_x^{\Pi} = \sigma_y^{\Pi} = \sigma_z^{\Pi} = -\gamma H$
А.Н. Динник, 1926 г.	$\sigma_z^{\Pi} = -\gamma H$ $\sigma_x^{\Pi} = \sigma_y^{\Pi} = -\lambda \gamma H$
N. Hast, 1960 г.	$\sigma_z^{\Pi} = -\gamma H$ $\sigma_x^{\Pi} = -\lambda \gamma H + T_1$ $\sigma_y^{\Pi} = -\lambda \gamma H + T_2$
ИГД УрО РАН, 2013 г.	$\sigma_z^{\Pi} = -\gamma H + \sigma_{Zm} + \sigma_{Z_{\Lambda\Phi}}$ $\sigma_x^{\Pi} = -\lambda \gamma H + \sigma_{Xm} + \sigma_{X_{\Lambda\Phi}}$ $\sigma_y^{\Pi} = -\lambda \gamma H + \sigma_{Ym} + \sigma_{Y_{\Lambda\Phi}},$ где $\sigma_{Xm} + \sigma_{X_{\Lambda\Phi}} = T_1$ $\sigma_{Ym} + \sigma_{Y_{\Lambda\Phi}} = T_2$ $\sigma_{Z_{\Lambda\Phi}; X_{\Lambda\Phi}; Y_{\Lambda\Phi}} = \sum_{i=K+1}^{K+2} \sigma_{i(t)}$

Причины разрушения висячего и лежачего боков залежи на данном месторождении объясняются не только низкой устойчивостью вмещающих пород, но и наличием высоких сжимающих тектонических напряжений. Измерения напряжений массива горных пород показали, что напряжения, действующие в субширотном направлении, вдвое превышают напряжения меридионального направления и в 1,5 раза больше вертикальных [8–11].

Перспективы направления дальнейшего ведения работ

Известен способ разработки полезных ископаемых камерами с обрушением вмещающих пород и возведением искусственных целиков в выработанном пространстве путем заполнения пустот в обрушенных породах вяжущим раствором на границе с очередной очистной камерой [12].

Однако этот способ характеризуется низкой производительностью добычи полезного ископаемого, что обусловлено сравнительно длительным набором прочности закладочных смесей и невозможностью ведения работ на нескольких горизонтах в смежных камерах одновременно.

Кроме того, известен способ разработки крутопадающих тел, включающий отработку первичных и вторичных камер со смещением камер нижележащего этажа на половину их ширины, кровле и днищу которых придают сводчатую (ромбовидную) форму [13, 14].

Недостатком такого способа является сравнительно низкая устойчивость очистных камер третьей очереди в условиях высокого напряженного состояния массива горных пород на больших глубинах и накопленных значительных объемах выемочных пустот. А также происходит снижение качества руды за счет обрушения очистных камер с

заложенным выработанным пространством, в результате чего происходит разубоживание и засорение руды, снижение темпов разработки месторождения за счет набора прочностных свойств закладочных смесей в отработанных камерах.

Для обеспечения безопасности и повышения производительности рудника при отработке мощных крутопадающих рудных тел с закладкой выработанного пространства при одновременной выемке руды на нескольких горизонтах предлагается вести отработку очистных камер первой и последующих очередей с оставлением междуэтажных целиков ромбовидной асимметричной формы.

Способ предполагает разработку секциями, включающими камеры первых (I), вторых (II) и третьих очередей (III). Ширина камер первой очереди I в два раза больше ширины камер II-III очередей и составляет 40 м. При оформлении забоя камер I очереди ему придают выпуклую коническую форму (рис. 1).

На рис. 1 изображена схема ведения очистных работ в пределах горизонта (этажа) с оставлением междуэтажных асимметричных ромбовидных целиков и камер I, II и III очереди.

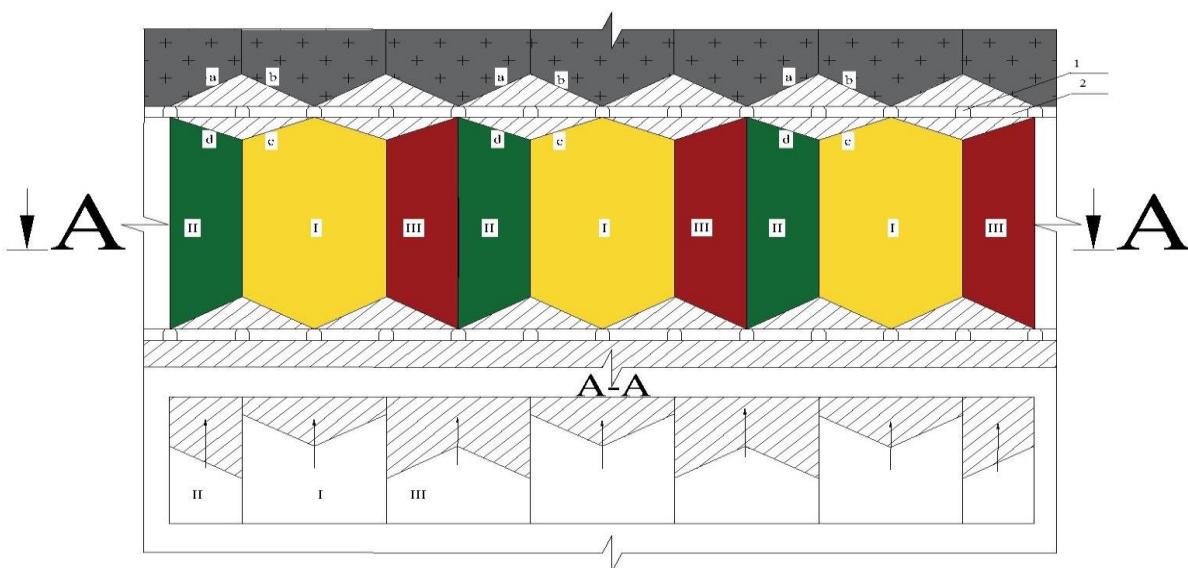


Рис. 1. Схема ведения очистных работ в пределах горизонта (этажа) с оставлением междуэтажных асимметричных ромбовидных целиков и камер I, II и III очереди в вертикальном сечении: 1 – выпускная выработка; 2 – откаточный штrek; a, b, c, d – стороны междуэтажного целика ромбовидной асимметричной формы

Для повышения безопасности очистных работ исключается прямой контакт отбиваемых камер на нижнем этаже с заложенными камерами на верхнем этаже путем оставления на горизонте междуэтажных целиков ромбовидной асимметричной формы, оформленных по контуру так, чтобы сторона «а» не была параллельна стороне «с», а сторона «в» не была параллельна стороне «д». Кроме того, сторона «а» по линейным размерам больше, чем сторона «с», а сторона «в» по линейным размерам больше, чем сторона «д» для обеспечения заклинивания асимметричных ромбовидных целиков в слу чае их подвижек в сторону нижних горизонтов.

Ромбовидный целик вынимают после выемки камерных запасов как на верхнем горизонте, так и на нижнем. Форма целика выбрана такой, чтобы после его обнажения при выемке любой из оконтуривающих его камер он не имел возможности смещаться в сторону выработанного пространства. Целик будет находиться в расклиниченном состоянии после того, как будут отработаны и заложены две камеры сверху целика – стороны а и б, две камеры внизу целика – стороны д и с (рис. 2).

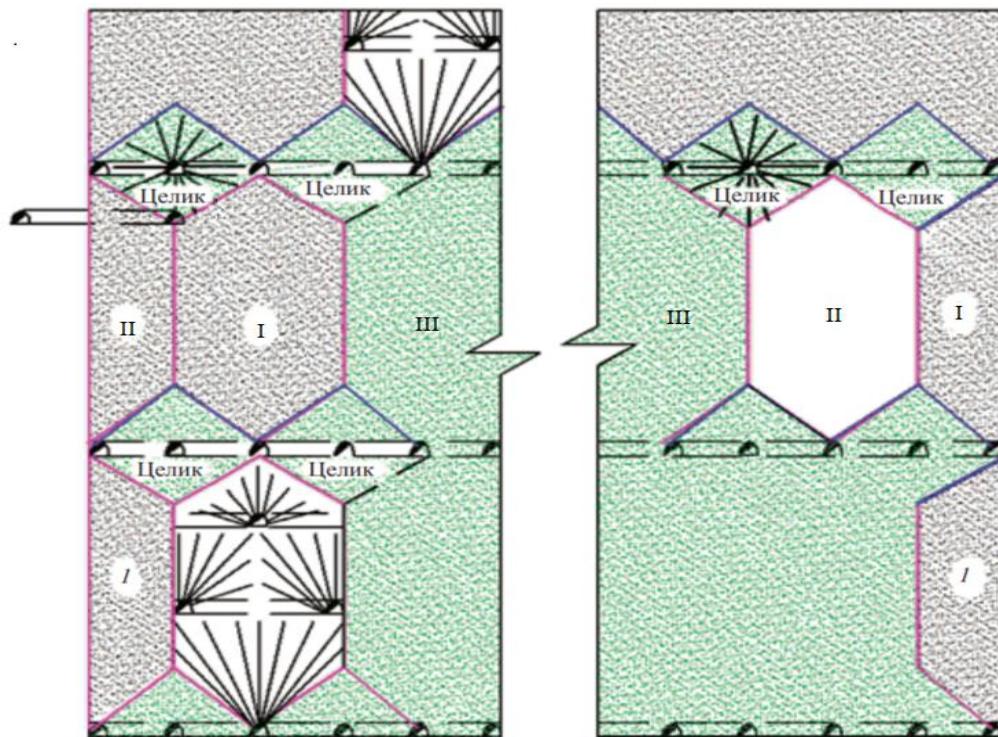


Рис. 2. Схема ведения очистных работ в пределах этажа с оставлением и отработкой междуэтажных асимметричных целиков с очередностью отработки

Для повышения безопасности и эффективности горных работ в условиях высокого напряженного состояния массива горных пород на больших глубинах на каждом горизонте оставляют в качестве камер первой очереди сдвоенные массивы камеры мощностью 40 м, придав их забою выпуклую форму, тем самым позволяя увеличить устойчивость камеры и эффективность разработки. Разработку очистных камер первой и последующих очередей, кровле и днищу которых придают полигональную форму, начинают с отработки камер первой очереди в центре фронта, параллельно проводя буровые работы камеры первой и второй очереди. После того как закладочный материал камеры первой очереди набрал соответствующую прочность, а закладочный материал последующих камер первой очереди продолжает набирать прочность, приступают к разработке камер второй очереди и подготовке камер третьей очереди. После выпуска руды из очистных камер заполняют выработанное пространство закладочным материалом в границах очистного пространства [15].

В предлагаемом способе разработки по геомеханическим соображениям длину камер можно увеличивать до инструментально определяемого безопасного параметра. К примеру, на Естюнинском месторождении с очень высоким уровнем природных напряжений после внедрения податливых потолочных и разделительных междукамерных целиков даже при отработке последующих горизонтов (2 – 3 горизонта ниже) удавалось увеличить длину камер с 50 м по ранним проектам до 100 – 220 м. Ограничивали только по геологическим и технологическим показателям при этажно-камерной системе разработки на рудных телах мощностью до 50 – 60 м при угле падения 45 – 80°, длине по простирианию до 1300 м и высоте этажа 60 м.

На рис. 2 приведена схема ведения очистных работ в пределах нескольких горизонтов с оставлением междуэтажных асимметричных ромбовидных целиков с очередностью отработки.

С целью повышения безопасности и эффективности данного способа отработку междуэтажных временных целиков производят с применением дистанционно управляем-



мых погрузочно-доставочных машин (ПДМ) после проведения буро-доставочных выработок через закладочный массив по спецпроекту.

Заключение

Основные практические выводы и рекомендации, полученные при выполнении работы, сводятся к следующему: повышение производительности рудника достигается тем, что разработка мощных крутопадающих рудных тел с закладкой выработанного пространства в условиях прогнозируемого высокого напряженно-деформированного состояния осуществляется при одновременной выемке руды на нескольких горизонтах с применением самоходной погрузочно-доставочной техники, включающая отработку на горизонтах очистных камер первой и последующих очередей с оставлением междуэтажных целиков ромбовидной формы в крепких рудах, не склонных к самовозгоранию.

Список литературы

1. Сосновская Е.Л., Харисова О.Д., 2025. Влияние интенсивности отработки рудного тела на сохранность подготовительных выработок в условиях больших глубин. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 1, С. 639-649.
2. Зубков А.В., 2016. Закон формирования природного напряженного состояния земной коры. *Литосфера*, № 5, С. 146-151.
3. Афанасьев С.Л., 1998. *Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Циклическая динамика в природе и обществе*. Москва: Научный мир, Т.1, С. 88-94.
4. Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л., Селин К.В., 2023. Определение первоначальных напряжений массива горных пород при комбинированной отработке в подземных условиях. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 4, С. 352-364.
5. Влох Н.П., 1994. *Управление горным давлением на подземных рудниках: Производственно-практическое издание*. Москва: Недра, 208 с.
6. Timonin V.V., Kondratenko A.S., 2015. Process and measuring equipment transport in uncased boreholes. *Journal of mining science*, Vol. 51, No 5, pp. 1056 – 1061.
7. Jianju Du, Xiang huiQin, Qingli Zeng, Luqing Zhang, Qunce Chen, Jian Zhou, Wen Meng, 2017. Estimation of the present-day stress field using in-situ stress measurements in the Alxa area, Inner Mongolia for China's HLW disposal. *Engineering Geology*, Vol. 220, 30 March, pp. 76 - 84.
8. Зубков А.В., Феклистов Ю.Г., Липин Я.И. и др., 2016. Деформационные методы определения напряженного состояния пород на объектах недропользования. *Проблемы недропользования*, № 4 (11), С. 41-49.
9. Ушаков М.Ю., Тельнов Ю.В., 2020. Обоснование и разработка технико-технологических решений по обеспечению безопасной отработки залежей, склонных к горным ударам на больших глубинах. *Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 19–21 мая 2020 года*. Под общей редакцией М.В. Темлянцева. Том Выпуск 24. Часть I. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, С. 120-124.
10. Гарифуллина И.Ю., Гузенко А.Д., 2024. Управление горным давлением при подземной отработке месторождений. *Вестник Северо-Восточного государственного университета*, № 42, С. 91-94.
11. Рассказов М.И., Рассказов И.Ю., Потапчук М.И. и др., 2023. Моделирование полей напряжений и оценка удароопасности конструктивных элементов системы разработки Южно-Хинганского месторождения марганцевых руд. *Горная промышленность*, № S5, С. 72-79. DOI 10.30686/1609-9192-2023-5S-72-79.



12. Зубков А.В., 2001. *Геомеханика и геотехнология*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 333 с.
13. Волков Ю.В., 2001. *Системы разработки подземной геотехнологии медноколчеданных месторождений Урала*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 248 с.
14. Сентябов С.В., 2025. Разработка мощных крутопадающих рудных тел с закладкой выработанного пространства в условиях высокого напряженного состояния массива горных пород на больших глубинах. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 1, С. 17-28. DOI 10.21440/0536-1028-2025-1-17-28.
15. Пат. № 2810041 С1 Российская Федерация, МПК E21C 41/22. Способ разработки мощных крутопадающих рудных тел с закладкой выработанного пространства: № 2023116265: заявл. 21.06.2023: опубл. 21.12.2023 / А.В. Зубков, С.В. Сентябов, Д.В. Карамнов; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук.

References

1. Sosnovskaya E.L., KHarisova O.D., 2025. Vliyanie intensivnosti otrabotki rudnogo tela na sokhrannost' podgotovitel'nykh vyrabotok v usloviyakh bol'sikh glubin [Influence of the intensity of ore body processing on the safety of preparatory workings in conditions of great depths]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle, № 1, P. 639-649.
2. Zubkov A.V., 2016. Zakon formirovaniya prirodnogo napryazhennogo sostoyaniya zemnoi kory [The law of formation of the natural stress state of the Earth's crust]. Litosfera, № 5, P. 146-151.
3. Afanas'ev S.L., 1998. Atlas vremennykh variatsii prirodnykh, antropogenykh i sotsial'nykh protsessov [Atlas of temporal variations of natural, anthropogenic and social processes. Cyclical dynamics in nature and society]. Tsiklicheskaya dinamika v prirode i obshchestve. Moscow: Nauchnyi mir, Vol.1, P. 88-94.
4. Avdeev A.N., Sosnovskaya E.L., Selin K.V., 2023. Opredelenie pervonachal'nykh napryazhenii massiva gornykh porod pri kombinirovannoj otrabotke v podzemnykh usloviyakh [Determination of the initial stresses of the rock mass during combined mining in underground conditions]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle, № 4, P. 352-364.
5. Vlokh N.P., 1994. Upravlenie gornym davleniem na podzemnykh rudnikakh: Proizvodstvenno-prakticheskoe izdanie [Rock pressure management in underground ores: An industrial and practical edition]. Moscow: Nedra, 208 p.
6. Timonin V.V., Kondratenko A.S., 2015. Process and measuring equipment transport in uncased boreholes . *Journal of mining science*, Vol. 51, No 5, pp. 1056 – 1061.
7. Jianju Du, Xiang huiQin, Qingli Zeng, Luqing Zhang, Qunce Chen, Jian Zhou, Wen Meng, 2017. Estimation of the present-day stress field using in-situ stress measurements in the Alxa area, Inner Mongolia for China's HLW disposal. *Engineering Geology*, Vol. 220, 30 March, pp. 76 - 84.
8. Zubkov A.V., Feklistov Yu.G., Lipin Ya.I. i dr., 2016. Deformatsionnye metody opredeleniya napryazhennogo sostoyaniya porod na obektakh nedropol'zovaniya [Deformation methods for determining the stress state of rocks at subsurface use facilities]. Problemy nedropol'zovaniya, № 4 (11), P. 41-49.
9. Ushakov M.Yu., Tel'nov.V., 2020. Obosnovanie i razrabotka tekhniko-tehnologicheskikh reshenii po obespecheniyu bezopasnoi otrabotki zalezhei, sklonnykh k gornym udaram na bol'sikh glubinakh [Substantiation and development of technical and technological solutions to ensure safe mining of deposits prone to rock impacts at great depths]. Nauka i molodezh': problemy, poiski, resheniya: Trudy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, Novokuznetsk, 19–21 maya 2020 goda. Pod obshchei redaktsiei M.V. Temlyantseva. Vol. Vypusk 24. Chast' I. Novokuznetsk: Sibirskii gosudarstvennyi industrial'nyi universitet, P. 120-124.



-
10. Garifulina I.Yu., Guzenko A.D., 2024. Upravlenie gornym davleniem pri podzemnoi otrabotke mestorozhdenii [Rock pressure management during underground mining]. Vestnik Severo-Vostochnogo gosudarstvennogo universiteta, № 42, P. 91-94.
 11. Rasskazov M.I., Rasskazov I.Yu., Potapchuk M.I. i dr., 2023. Modelirovaniye polei napryazhenii i otsenka udaroopasnosti konstruktivnykh elementov sistemy razrabotki Yuzhno-Khinganskogo mestorozhdeniya margantsevykh rud [Modeling of stress fields and assessment of the impact hazard of structural elements of the system for the development of the Yuzhno-Khinganskoye deposit of manganese ores]. Gornaya promyshlennost', № S5, P. 72-79. DOI 10.30686/1609-9192-2023-5S-72-79.
 12. Zubkov A.V., 2001. Geomekhanika i geotekhnologiya [Geomechanics and geotechnology]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 333 p.
 13. Volkov Yu.V., 2001. Sistemy razrabotki podzemnoi geotekhnologii medno-kolchedannykh mestorozhdenii Urala [Systems for the development of underground geotechnologies of copper-mineralized deposits in the Urals]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 248 p.
 14. Sentyabov S.V., 2025. Razrabotka moshchnykh krutopadayushchikh rudnykh tel s zakladkoi vyrabotannogo prostranstva v usloviyakh vysokogo napryazhennogo sostoyaniya massiva gornykh porod na bol'shikh glubinakh [Development of powerful steeply falling ore bodies with the laying of the worked-out space in conditions of high stress of the rock mass at great depths]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal, № 1, P. 17-28. DOI 10.21440/0536-1028-2025-1-17-28.
 15. Pat. № 2810041 C1 Rossiiskaya Federatsiya, MPK E21C 41/22. Sposob razrabotki moshchnykh krutopadayushchikh rudnykh tel s zakladkoi vyrabotannogo prostranstva [A method for developing powerful steeply falling ore bodies with the laying of a mined area]: № 2023116265: zayavl. 21.06.2023: opubl. 21.12.2023 / A.V. Zubkov, S.V. Sentyabov, D.V. Karamnov; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe uchrezhdenie nauki Institut gornogo dela Ural'skogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk.



ГЕОТЕХНИКА



УДК 622

Глебов Андрей Валерьевич,доктор технических наук,
заместитель директора по научным вопросам,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: glebov@igduran.ru**ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТАТА
ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ*****Аннотация:**

Одним из стратегических направлений комплексного развития горного, metallургического и машиностроительного производства в современных условиях является поиск путей реструктуризации и модернизации производства, внедрения принципиально новых отечественных технологий и техники.

Для преодоления санкционного давления Запада и США горнопромышленники находят новые цепочки поставок запасных частей и техники, сбыта продукции. В Минпромторге России и Горнопромышленниками России созданы порталы, маркетплейсы и информационные базы по обмену информацией между поставщиками и потребителями. Осуществляется запрос на ренжиниринг запчастей для импортной техники и создается новое программное обеспечение. Но вызывает опасение замена западноевропейского оборудования на китайское. С одной «иглы» отрасль постепенно переходит на другую.

Возникают закономерные вопросы: обеспечения надежности, ремонтопригодности, качественного и своевременного сервиса при повышенном спросе, вызванном внешнеэкономической и внутренней политикой государства; несоответствия спроса и предложения в вопросе обеспечения квалифицированными кадрами; отставания станкостроения от запросов машиностроительной отрасли.

Достижение технологического суверенитета горнодобывающей отрасли тормозится из-за высоких финансовых затрат на разработку, создание и испытание опытных образцов техники. Преодоление сложившейся за предыдущие годы в отрасли зависимости от импортных техники и комплектующих требует значительных временных, материальных и трудовых ресурсов. Решение данных задач является приоритетом для отрасли и экономики страны, следовательно, имеет бесспорную актуальность.

Методология исследования основана на критическом анализе статистического материала и аналитического обзора.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.04.028

Glebov Andrey V.Doctor of Technical Sciences,
Deputy Director for Scientific Affairs,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
58 Mamina-Sibiryaka Str.,
620075 Ekaterinburg
e-mail: glebov@igduran.ru**SECURITY ISSUES OF TECHNOLOGICAL
SOVEREIGNTY IN MINING INDUSTRY****Abstract:**

One of the strategic directions of the integrated development of mining, metallurgical and machine-building production in modern conditions is the search for ways to restructure and modernize production, introduce fundamentally new domestic technologies and equipment.

In order to overcome the sanctions pressure from the West and the United States, mining companies are finding new supply chains for spare parts and equipment and product sales. The Ministry of Industry and Trade of Russia and the Mining Industry of Russia have created portals, marketplaces and information bases for the exchange of information between suppliers and consumers. A request is being made for the reengineering of spare parts for imported equipment and new software is being created. But there is concern about the replacement of Western European equipment with Chinese. The industry is gradually shifting from one "needle" to another.

Legitimate issues arise: ensuring reliability, maintainability, high-quality and timely service in the face of increased demand caused by the foreign economic and domestic policies of the state; inconsistencies between supply and demand in the provision of qualified personnel; lagging machine tool industry from the demands of the engineering industry.

The achievement of technological sovereignty of the mining industry is hampered by high financial costs for the development, creation and testing of prototypes of equipment. Overcoming the industry's dependence on imported machinery and components over the previous years requires significant time, material and labor resources. Solving these problems is a priority for the industry and the country's economy, therefore, it has indisputable relevance.

The research methodology is based on a critical analysis of statistical material and an analytical review.

It is impossible to solve the problem of technological sovereignty of the mining industry without state regulation, and a state program for the development of mining engineering as one of the main drivers of the economy of the Russian Federation is needed. The

* Статья подготовлена в рамках государственного задания №075-00410-25-00.

Тема 1 (2025-2027). Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России (FUWE-2025-0001), № гос. рег. 125070908257-0.



Без государственного регулирования решить проблему технологического суверенитета горнодобывающей отрасли невозможно, необходима государственная программа развития горного машиностроения как одного из основных драйверов экономики Российской Федерации. Развитие горного машиностроения должно быть нацелено на новый технико-технологический уровень горнодобывающего производства с использованием роботизированной техники в совокупности с искусственным интеллектом. Одним из ключевых показателей при этом должен стать серийный выпуск с внедрением в производство на основе передовых научно обоснованных технологий отработки месторождений полезных ископаемых.

Ключевые слова: технологическое лидерство, технологии, импортонезависимость, горно-транспортное оборудование, машиностроение, горнодобывающая промышленность.

development of mining engineering should be aimed at a new technical and technological level of mining production using robotic technology combined with artificial intelligence.

One of the key indicators in this case should be serial production with the introduction into production based on advanced scientifically proven technologies for mining mineral deposits.

Key words: technological leadership, technologies, import dependence, mining and transportation equipment, mechanical engineering, mining enterprise.

Введение

В соответствии с Федеральным законом о технологической политике в Российской Федерации технологическое лидерство – это технологическая независимость Российской Федерации, выражаясь в разработке отечественных технологий и создании продукции с их использованием с сохранением национального контроля над критическими и сквозными технологиями на основе собственных линий их разработки в целях экспорта конкурентоспособной высокотехнологичной продукции и (или) замещения ею на внутреннем рынке продукции, создаваемой на базе устаревших и (или) иностранных технологий, а также превосходство таких технологий и продукции над зарубежными аналогами.

Согласно этому же закону, технология – это совокупность научно и практически обоснованных методов, средств, операций и (или) процессов, необходимых для преобразования энергии, вещества, информации в целях производства одного или нескольких видов продукции, выполнения работ, оказания услуг.

Развитие некоторых ключевых отраслей экономики, таких как станкостроение, тяжелое машиностроение и горнодобывающая, на протяжении последних трех десятков лет привело к значительной импортозависимости. По разным оценкам экспертов доля импортных комплектующих, оборудования и техники составляла 60 – 80 %. Отставание станкостроения от запросов машиностроения, а машиностроения от запросов недропользователей привело не только к замещению импортной техникой, но, как следствие, к замене на импорт ГСМ, производства запасных частей, сервисного обслуживания, программ подготовки кадров и т.д.

Целью данного исследования является анализ проблем достижения суверенитета горнодобывающей отрасли путем обработки статистического материала и аналитического обзора, а также попытка найти некоторые пути их решения.

Исследование

Одну из главных проблем – износ станочного парка – с 1990 г. предприятия тяжелого машиностроения решали путем его замены на оборудование зарубежного производства. Если в 1990 г. годовая потребность российской промышленности составляла 6 200 тыс. станков, то к 1994 г. она сократилась до 100 – 145 тыс. [1]. К 1993 г. выпуск металлорежущих станков сократился на 52 % (с 50 до 24 тыс. штук), а кузнечно-прессовых машин – на 65 % (с 21 до 5,7 тыс. штук). Наибольший спад производства произошел



в выпуске станков с ЧПУ (с 14 тыс. единиц до 1 тыс.) и обрабатывающих центров (с 2 тыс. до 300 шт.).

Для понимания масштаба проблемы достаточно взглянуть на цифры:

– производство металлорежущих станков в 1980 г. в России составило 118 тыс. шт., в 1990 г. – 74,2 тыс. шт., в 2000 – 8,9 тыс. шт., в 2010 г. – 2,8 тыс. шт., в 2019 г. – 4,6 тыс. шт. [1];

– производство кузнечно-прессовых машин в 1980 г. в России составило 43,1 тыс. шт., в 1990 г. – 27,3 тыс. шт., в 2000 г. – 1,2 тыс. шт., в 2010 г. – 2,2 тыс. шт., в 2019 г. – 4,5 тыс. шт. [1];

– производство металлорежущих станков с ЧПУ в 1980 г. в России составило 6 251 тыс. шт., в 1990 г. – 16 741 тыс. шт., в 2000 г. – 176 тыс. шт., в 2010 г. – 129 тыс. шт., в 2019 г. – 449 тыс. шт. [1].

Предприятия горно-металлургической отрасли России, являясь одними из крупнейших потребителей продукции отрасли тяжелого машиностроения, в большинстве своем использовали импортное горно-транспортное и горно-шахтное оборудование. На предприятиях и в регионах страны стали развиваться сервисные и логистические центры иностранных компаний и фирменное обслуживание, а также изготовление на местах запасных частей для зарубежной техники и оборудования.

Аналогичная ситуация сложилась в машиностроительной и станкостроительной отраслях.

К 2014 г. в России сложилась ситуация, когда более половины оборудования промышленных предприятий стали составлять машины импортного производства. Например, в УрФО в первом полугодии 2014 г. импортировалось машин, оборудования и транспортных средств 65,5 % от общего объема импорта.

Санкционная политика иностранных государств в период с 2014 г. привела к уходу целого ряда производителей с российского рынка и дальше по цепочке: отсутствие нового и износ имеющегося оборудования, отсутствие запасных частей и так далее, что в совокупности снижает производительность и повышает риски аварий, а в целом приводит к снижению рентабельности горнодобывающего производства.

В 2022–2023 гг. положение на рынке существенно не изменилось. По данным Федеральной таможенной службы России в общей структуре товаров в 2021 г. доля импорта машин, оборудования и транспортных средств составила 49,3 % [2]. В УрФО, по данным начальника таможенного управления Алексея Фролова, в 2022 г. вновь 50 % импорта составили станки, оборудование и механизмы [3] (рис. 1).

Таким образом, три взаимозависимых отрасли экономики России за несколько десятков лет создали замкнутый круг взаимо- и импортозависимости. Начиная с 90-х годов предприятия горнодобывающей отрасли стали активно использовать иностранное оборудование, тем самым нанося ущерб отечественному машиностроению, снижая спрос на потребление продукции тяжелого машиностроения. В свою очередь снижение производства машиностроительной продукции и деградация отрасли в целом привели к снижению спроса на продукцию отрасли станкостроения, соответственно, к снижению спроса, качества выпускаемого оборудования и постепенной деградации. В итоге мы имеем отсутствие высокопроизводительного станочного парка, как следствие, невозможность оснащения предприятий тяжелого машиностроения современным оборудованием отечественного производства и в итоге невозможность выпуска качественного высокопроизводительного горного и горно-шахтного оборудования. Конечно, на развитие машиностроительной и станкостроительной отраслей влияют и другие отрасли промышленности (авиакосмическая, энергетическая и т.п.) и факторы, но факт остается фактом.

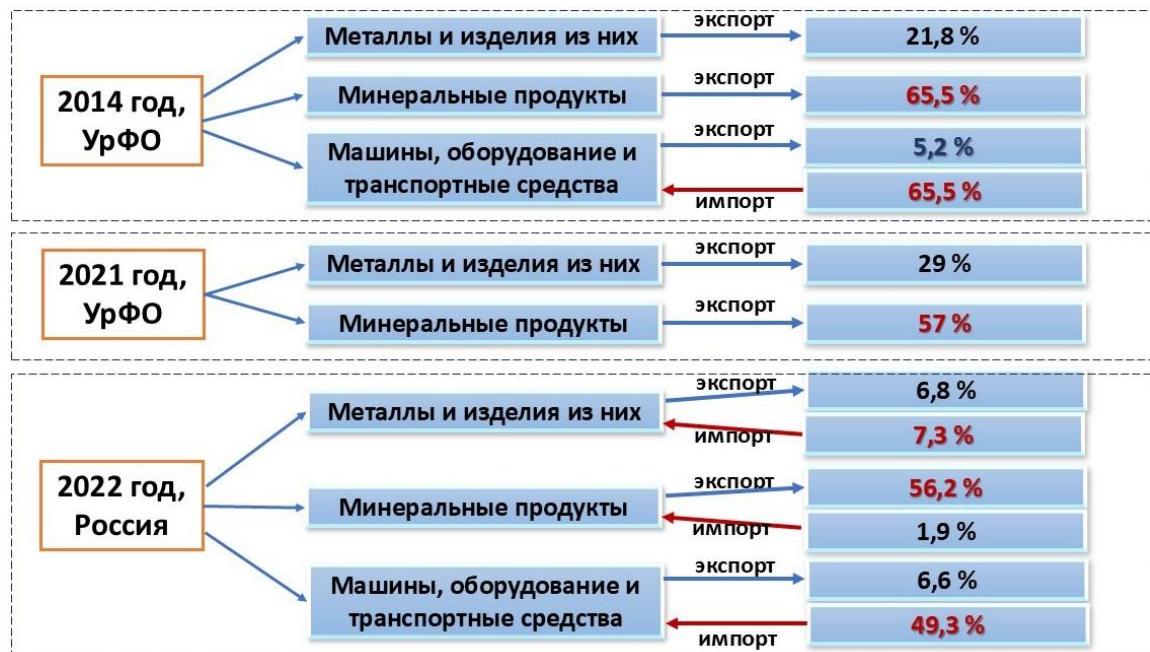


Рис. 1. Структура импорта-экспорта в Российской Федерации

Летом 2022 г. Президент Российской Федерации в качестве целей российского импортозамещения назвал создание собственных конкурентных технологий, товаров и сервисов [4]. В.В. Путин подчеркнул, что «импортозамещение – это не панацея, не кардинальное решение. Если мы будем лишь повторять других, пытаться заменить пусть и самыми качественными копиями иностранные товары, то будем находиться в позиции постоянно догоняющих. А надо быть на шаг впереди, создавать собственные конкурентные технологии, товары и сервисы, которые способны стать новыми мировыми стандартами» [5]. На форуме была обозначена и системная проблема российского импортозамещения, которая состоит в том, что достоверных данных о потребностях российской экономики у исполнительных органов власти нет, а для эффективной замены импорта потребуется инвентаризация оборудования и составление балансов по отдельным видам продукции.

Беспрецедентные санкции в отношении Российской Федерации привели к обострению проблемы импортозамещения во всех отраслях промышленности. В июле 2024 г. Президент Торгово-промышленной палаты России Сергей Катырин в интервью «Российской газете» отметил: «На развитие станкостроения в ближайшие шесть лет из федерального бюджета выделят 300 миллиардов рублей, в том числе в ближайшие три года – 130 миллиардов. В результате мы получим более 70 современных станкостроительных производств, будет освоен выпуск свыше 500 новых видов отечественных станков» [6].

На заседании Совета безопасности России, состоявшемся 30 августа 2023 г., секретарь Совета Н.П. Патрушев перечислил проблемы в области развития машиностроения. Было отмечено, что отрасль нуждается в существенной модернизации средств производства, в том числе станков и технологических установок, промышленных роботов и робототехнических устройств. [7]. О развитии отечественного станкостроения как ведущей отрасли машиностроения Президент России В.В. Путин сказал: «Нужно формировать собственное станкостроение, продолжить его формирование на основе самых современных разработок – и зарубежных, и отечественных» [8].

Осенью 2024 г. приказом Минпромторга России № 4311 к критической промышленной продукции в отрасли станкоинструментальной промышленности среди прочего оборудования, составляющего основу предприятий тяжелого машиностроения, отне-



сены инструменты рабочие сменные для станков; станки токарные, расточные и фрезерные металлорежущие; кузнечно-прессовое оборудование.

Этим же приказом утвержден перечень критической промышленной продукции в отрасли тяжелого машиностроения, в который, в числе прочего, вошли: конвейерное оборудование для открытых горных работ; подъемно-транспортное и конвейерное оборудование для подземных горных работ; проходческие комбайны, машины, инструменты, оборудование для проходки тоннелей и добычи горных пород; буровое оборудование; карьерные электрические и гидравлические экскаваторы объемом ковша свыше 4 куб. м.; машины для сортировки, грохочения, сепарации; машины для дробления; части оборудования для добычи твердых полезных ископаемых открытым и подземным способами; шины и покрышки для горной техники.

Перечень включает практически все горнотранспортное оборудование для открытых горных работ, аналогичная ситуация и с горно-шахтным оборудованием для подземных горных работ. В перечне отсутствуют лишь карьерные автосамосвалы большой грузоподъемности (свыше 40 т), которые в России не производятся.

Санкционная политика западных стран привела к значительному расширению в России рынка карьерной техники за счет азиатского региона (табл. 1), в основном Китайской Народной Республики.

Таблица 1
Ведущие мировые производители горнотранспортного оборудования, представленного на Российском рынке* [9 – 12]

Производитель	ЭГ	ЭКГ	КА	ШСС
ООО «ИЗ-КАРТЕКС им. П.Г. Коробкова» (Россия)	–	+	–	–
ПАО «Уралмашзавод» (Россия)	+	+	–	–
BELAZ (Беларусь)	+	–	+	+
HITACHI (Япония)	+	+	+	
CATERPILLAR (США)	+	+	+	+
LIEBHERR (Германия)	+	–	+	+
SANY (Китай)	+	–	+	–
NHL-TEREX (Inner Mongolia North Hauler, Китай)	–	–	+	–
KOMATSU (Япония, включая Joy Global Inc., США)	+	+	+	+
BONNY (Sichuan Bonny Heavy Machinery Co., Ltd., Китай)	+	–	–	–
TYHI (Taiyuan Heavy Industry Co., Ltd, Китай)	–	+	–	–
XCMG (Китай)	+	–	+	+
BEML (Bharat Earth Movers Ltd., Индия)	+	–	+	–
VOLVO (Швеция)	+	–	+	+
ROKBAK (бывший Terex Trucks)	–	–	–	+
LGMG (Linyi Lingong Machinery Group, Китай)	+	–	+	–
BELL (Bell Equipment, ЮАР; Россия)	–	–	–	+
PENGXIANG (Shandong Pengxiang Automobile Co., Ltd., Китай)	–	–	+	–
HYUNDAI (Hyundai Heavy Industries Co, Ltd., Северная Корея)	–	–	–	+
DOOSAN	–	–	–	+
ТОНАР (Россия)	–	–	–	+
КАМАЗ (Россия)	–	–	–	+

* ЭГ – экскаватор карьерный гусеничный с гидравлическим механизмом подъема;

ЭКГ – экскаватор карьерный гусеничный с канатным механизмом подъема;

КА – карьерный автосамосвал с жесткой рамой и колесной формулой 4×4;

ШСС – самосвал с шарнирно-сочлененной рамой и колесной формулой 6×6.



Импортозамещение техники западного и американского производства, используемого при освоении месторождений полезных ископаемых и техногенных образований, техникой китайского производства может привести к негативным последствиям в горнодобывающей отрасли и экономике страны в целом. Как было показано выше, последствия отразятся также на машиностроительной и станкостроительной отраслях промышленности.

Результаты

Научным сообществом, проектными институтами и производителями ведется активная работа по созданию передовых техники и технологий, но зачастую их внедрение требует значительных материальных и временных затрат.

Например, образец нового гибридного дизель-электрического самосвала КАМАЗ-6561 «Геркулес», разработанный МГТУ им. Н.Э. Баумана, был впервые представлен на международной выставке Comtrans в 2021 г. Его серийный выпуск был запланирован на 2024 г., но этого не произошло.

Попытка создания в 2013 г. самосвала С-33 («Концепт») грузоподъемностью 33,5 т на Чебоксарском заводе ОАО «Промтрактор» концерна «Тракторные заводы» также не увенчалась успехом. ЗАО «Завод спецмашин» разработало трехосный самосвал на шарнирно-сочлененной раме 709Т6-3С «Балтиец» грузоподъемностью 25 т, но эти машины также не нашли потребителя среди предприятий горнодобывающего сектора экономики.

Исходя из вышеизложенного следует, что технологическое лидерство практически во всех отраслях промышленности необходимо основывать на приоритетном сырьевом наполнении развивающихся и формируемых на территории РФ станкостроительных, машиностроительных, строительных и других промышленных кластеров. При этом их развитие должно обеспечиваться научным сопровождением в части совершенствования и разработки новых промышленно безопасных и экологически чистых технологий добычи и глубокой переработки минерального сырья, в том числе из трудноизвлекаемых запасов полезного ископаемого, включая техногенно-минеральные образования.

Инфраструктурное сопровождение исследований в области добычи и промышленной переработки твердых полезных ископаемых необходимо обеспечивать на основе импортонезависимых технологий, техники и оборудования российского производства.

Для эффективной замены импорта требуется инвентаризация оборудования и составление балансов по отдельным видам продукции, для чего необходимо провести технико-технологический аудит на действующих горных предприятиях с целью разработки инновационных технологий добычи, рудоподготовки, обогащения и производства товарной продукции с учетом потребности в сырье и ценовой перспективы.

Кроме принимаемых государством мер поддержки предприятий по обеспечению технологического лидерства необходимо ускорить развитие станкостроения и обеспечить машиностроительные предприятия высокотехнологичным оборудованием, а институтам, ведущим исследования в области горного дела, разработать нормативно-методическую и регламентирующую документацию для проектирования разработки и освоения различных типов месторождений полезных ископаемых с учетом мирового и передового отечественного уровня развития технологий добычи и горной техники.

Между предприятиями машиностроения и горно-металлургического комплекса по поставкам горного, металлургического, прокатного, кузнецнопрессового, транспортного, энергетического, станочного оборудования, а также запасных частей к ним имеется значительный потенциал восстановления и развития кооперационных связей.



Выходы

1. Проблемами достижения технологического суверенитета горнодобывающей отрасли являются высокие финансовые затраты на разработку, создание и испытание опытных образцов техники; сложившаяся за предыдущие годы зависимость от импортных комплектующих и сырья; пробелы в законодательном регулировании (для некоторых новых технологий отсутствует нормативная база); дефицит мощностей и квалифицированных кадров.

2. Решение перечисленных проблем невозможно без государственного регулирования, необходима государственная программа развития горного машиностроения как одного из основных драйверов экономики Российской Федерации.

3. Развитие горного машиностроения должно быть нацелено на новый технико-технологический уровень горнодобывающего производства с использованием роботизированной техники в совокупности с искусственным интеллектом. Одним из ключевых показателей при этом должен стать серийный выпуск с внедрением в производство на основе передовых научно обоснованных технологий отработки месторождений полезных ископаемых.

Список литературы

1. Бутов А.М., 2020. Рынок продукции станкостроения. *Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики*. URL: <https://www.hse.ru/data/2020/11/07/1361776905/Рынок %20продукции %20станкостроения-2020.pdf> (дата обращения 25.07.2022).
2. Федеральная служба государственной статистики. URL: https://rosstat.gov.ru/statistics/vneshnyaya_torgovlya (дата обращения 25.07.2025).
3. Шиллер А., 2023. На Урале незначительно снизился внешнеторговый оборот. *Российская газета*. URL: <https://rg.ru/2023/02/01/reg-urfo/pandemiia-bila-bolnee.html> (дата обращения 10.02.2023).
4. Галиева Д., Едовина Т., 2022. Владимир Путин представил план прорыва. Экономике предписано стать технологичной. *Коммерсант*. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5421339> (дата обращения 25.07.2022).
5. Путин: импортозамещение не является панацеей, надо не копировать, а быть на шаг впереди. *TASS*, 2022. URL: <https://tass.ru/ekonomika/14954319> (дата обращения 25.07.2022).
6. Калмацкий М., 2024. Россия активизирует создание собственных станков и оборудования. *Российская газета*. URL: <https://rg.ru/2024/07/08/snimaishchie-struzhku.html> (дата обращения 25.07.2025).
7. Егоров И., 2023. Совбез РФ: Путин одобрил предложения по развитию отечественного станкостроения. *Российская газета*. URL: <https://rg.ru/2023/08/30/reg-szfo/sovbez-rf-putin-odobril-predlozheniia-po-razvitiu-otechestvennogo-stankostroeniiia.html> (дата обращения 25.07.2025).
8. Путин: государство поддержит машиностроение, обладающее большим экспортным потенциалом. *Фонд развития промышленности* URL: <https://frprf.ru/press-tsentr/smi-o-nas/putin-gosudarstvo-podderzhit-mashinostroenie-obladayushchee-bolshim-eksportnym-potentsialom> (Дата обращения 25.07.2025).
9. *Chongqing Art&Science Trade Co.Ltd.* 2024. URL: <https://www.komatsu.ru/catalog/> (дата обращения 2.12.2024).
10. *GreatRock – мультибренд дилер навесного оборудования для спец техники*. 2024. URL: <https://www.hitachicm.ru/produkciya/> (дата обращения 26.11.2024).
11. *Volvo Construction Equipment*. 2024. URL: <https://www.volvoce.com/cis/ru/products/> (дата обращения 25.11.2024).
12. *Компания BEML Limited*. 2024. URL: <https://www.bemlindia.in/> (дата обращения 18.11.2024).



References

1. Butov A.M., 2020. Rynok produktsii stankostroeniya [The market of machine tool products]. Natsional'nyi issledovatel'skii universitet Vysshaya shkola ekonomiki». URL: <https://www.hse.ru/data/2020/11/07/1361776905/Rynok %20produktsii %20stankostroeniya-2020.pdf> (data obrashcheniya 25.07.2022).
2. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki [Federal State Statistics Service]. URL: https://rosstat.gov.ru/statistics/vneshnyaya_torgovlya (data obrashcheniya 25.07.2025).
3. SHiller A., 2023. Na Urale neznachitel'no snizilsya vneshnetorgovyi oborot [In the Urals, the foreign trade turnover decreased slightly]. Rossiiskaya gazeta. URL: <https://rg.ru/2023/02/01/reg-urfo/pandemiia-bila-bolnee.html> (data obrashcheniya 10.02.2023).
4. Galieva D., Edovina T., 2022. Vladimir Putin predstavil plan proryva. Ekonomike predpisano stat' tekhnologichnoi [Vladimir Putin presented a breakthrough plan. The economy is supposed to become technologically advanced]. Kommersant. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5421339> (data obrashcheniya 25.07.2022).
5. Putin: importozameshchenie ne yavlyayetsya panatseei, nado ne kopirovat', a byt' na shag vpered [Putin: import substitution is not a panacea, it is necessary not to copy, but to be one step ahead]. TASS, 2022. URL: <https://tass.ru/ekonomika/14954319> (data obrashcheniya 25.07.2022).
6. Kalmatskii M., 2024. Rossiya aktiviziruet sozdanie sobstvennykh stankov i oborudovaniya [Russia is stepping up the creation of its own machines and equipment]. Rossiiskaya gazeta. URL: <https://rg.ru/2024/07/08/snimaliushchie-struzhku.html> (data obrashcheniya 25.07.2025).
7. Egorov I., 2023. Sovbez RF: Putin odobril predlozheniya po razvitiyu otechestvennogo stankostroeniya [Russian Security Council: Putin approved proposals for the development of domestic machine tool industry]. Rossiiskaya gazeta. URL: <https://rg.ru/2023/08/30/reg-szfo/sovbez-rf-putin-odobril-predlozheniya-po-razvitiyu-otechestvennogo-stankostroenii.html> (data obrashcheniya 25.07.2025).
8. Putin: gosudarstvo podderzhit mashinostroenie, obladayushchee bol'shim eksportnym potentsialom [Putin: the state will support the engineering industry, which has great export potential]. Fond razvitiya promyshlennosti URL: <https://frprf.ru/press-tsentr/smi-onas/putin-gosudarstvo-podderzhit-mashinostroenie-obladayushchee-bolshim-eksportnym-potentsialom> (Data obrashcheniya 25.07.2025).
9. Chongqing Art&Science Trade Co.Ltd. 2024. URL: <https://www.komatsu.ru/catalog/> (дата обращения 2.12.2024).
10. GreatRock – mul'tibrand diler navesnogo oborudovaniya dlya spets tekhniki [GreatRock - multi-brand dealer of attachments for special equipment]. 2024. URL: <https://www.hitachicm.ru/produksiya/> (дата обращения 26.11.2024).
11. Volvo Construction Equipment. 2024. URL: <https://www.volvoce.com/cis/ru/products/> (дата обращения 25.11.2024).
12. Kompaniya BEML Limited. 2024. URL: <https://www.bemlindia.in/> (data obrashcheniya 18.11.2024).



УДК 622.271:622.23

Кантемиров Валерий Даниилович
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией управления
качеством минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: ukrkant@mail.ru

Титов Роман Сергеевич
старший научный сотрудник,
лаборатория управления качеством
минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: ukrigd15@mail.ru

Яковлев Андрей Михайлович
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория управления качеством
минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: krissey-puh@yandex.ru

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ СТЕПЕНИ ВЗРЫВНОГО РЫХЛЕНИЯ В КАРЬЕРЕ

Аннотация:

В статье изложены представления о целесообразности повышения степени взрывного рыхления горных пород для горнотехнических условий открытой разработки отдельных группрудных инерудных полезных ископаемых (ПИ). Одной из предпосылок внедрения в практику горнорудного производства усиленного взрывного рыхления горных пород является вовлечение в эксплуатацию сравнительно небольших рудных инерудных месторождений, что отчасти связано с расширением минерально-сырьевой базы редких полезных ископаемых и прогрессирующим сокращением балансовых запасов рудных месторождений, сопровождающихся существенным падением производственной мощности действующих карьеров. Поддержание объемов добычи на прежнем уровне по отдельным видам полезных ископаемых возможно при разработке небольших месторождений карьерами малой и средней мощности. Рудные месторождения, разрабатываемые карьерами данного типа, как правило, расположены в регионах, удаленных от металлургических центров и не имеющих развитой инфраструктуры. В этих условиях повышение степени взрывного рыхления рудной массы в карьере с целью исключения дорогостоящих трудоемких стадий крупного дробления в технологических процессах рудоподготовки сырья может стать одним из направлений повышения эффективности горнорудного производства.

Ключевые слова: карьеры, буровзрывные работы, дробление горных пород, экскавация горной массы, эффективность технологических процессов.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.04.036

Kantemirov Valery D.
Candidate of Technical Sciences,
Head of the Laboratory of quality management
of mineral raw materials,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: ukrkant@mail.ru

Titov Roman S.
Senior Researcher,
Laboratory of quality management
of mineral raw materials,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: ukrigd15@mail.ru

Yakovlev Andrey M.
Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of quality management
of mineral raw materials,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: krissey-puh@yandex.ru

ON THE EXPEDIENCY OF INCREASING THE DEGREE OF DRILLING AND EXPLOSIVE LOOSENING IN THE QUARRY

Abstract:

The article presents ideas about the expediency of increasing the degree of drilling and explosive loosening of rocks for mining conditions of open-pit mining of certain groups of ore and non-metallic minerals (PI). One of the prerequisites for the introduction of enhanced drilling and explosive loosening of rocks into the practice of mining is the involvement in the exploitation of relatively small ore and non-metallic deposits, which is partly due to the expansion of the mineral resource base of rare minerals and the progressive reduction in the balance reserves of ore deposits accompanied by a significant drop in the production capacity of existing quarries. It is possible to maintain production volumes at the same level for certain types of minerals when developing small deposits with small and medium-capacity quarries. Ore deposits developed by quarries of this type are usually located in regions remote from metallurgical centers and without developed infrastructure. Under these conditions, increasing the degree of drilling and blasting of ore mass in a quarry in order to eliminate expensive, time-consuming stages of large-scale crushing in the technological processes of ore preparation of raw materials may become one of the ways to increase the efficiency of mining production.

Key words: quarries, drilling and blasting, crushing of rocks, excavation of rock mass, efficiency of technological processes.



Введение

Усиленное взрывное рыхление (УВР) в карьере – это метод подготовки горной массы к выемке с использованием специальных параметров взрывных работ для повышения степени дробления и снижения крупности взорванной породы.

В связи с истощением запасов ряда крупных рудных месторождений в отработку все больше вовлекаются небольшие месторождения, которые разрабатываются карьерами малой и средней мощности. К малым относят карьеры с производительностью по полезному ископаемому до 1 млн т в год, а также с производительностью по горной массе до 2–4 млн м³ в год. К средним относят карьеры с производительностью по горной массе в диапазоне 4 – 6 млн т.

Сокращение долгостоящих трудоемких стадий крупного дробления при рудоподготовке добываемого минерального сырья в карьерах данной категории за счет повышения степени взрывного рыхления пород может стать одним из направлений повышения эффективности горнорудного производства.

Описание

Качество взрывной подготовки минерального сырья в карьере оказывает существенное влияние на эффективность смежных технологических процессов, особенно экскавации горной массы в забоях и первых стадий обогащения.

Дробление руды является первым этапом в процессе обогащения ПИ и производится, как правило, в 3 стадии:

- крупное – исходный кусок до 1000÷1300 мм, кусок на выходе 100÷350 мм;
- среднее – исходный кусок 100÷350 мм, кусок на выходе 30÷100 мм;
- мелкое – исходный кусок 30÷100 мм, кусок на выходе 5÷30 мм.

При этом наиболее энергоемкой и затратной является стадия крупного дробления. Капитальные затраты на крупное дробление составляют 30 – 50 % от общих затрат на дробление. В структуре обогатительных фабрик капитальные затраты на дробильный передел в составе 3-стадийного дробления могут достигать до 30 % от общих затрат (~ 20 млрд руб.) на строительство обогатительной фабрики (ОФ) производительностью 4 – 5 млн т обогащенной руды в год. Эксплуатационные затраты на крупное дробление могут превышать 85 % затрат на передел дробления ОФ [1, 2], в т. ч. благодаря большому расходу электроэнергии, связанному с техническими особенностями массивных дробилок крупного дробления (масса дробилки ККД-1500/180-2ГРЩ составляет 455 т, масса подвижного конуса – 85 т).

На практике средний кусок $d_{ср}$ на крупных рудных карьерах колеблется в пределах 300 – 450 мм при наличии крупных (800 – 1000 мм) и негабаритных (> 1000 мм) кусков в пределах 1,5–2,5 % (рис.1).

Повышение степени дробления горных пород от буровзрывных работ (БВР) будет способствовать увеличению производительности дробильных установок и карьерных экскаваторов. Крупность кусков питания, как показывает практика эксплуатации дробилок и лабораторные исследования, в значительной степени влияет на их производительность. Кусковатость взорванной горной массы учитывается в производительности дробилок (Q_d) процентным содержанием кусков размером более половины ширины загрузочного отверстия ($\varnothing > 0,5B_d$), и чем меньше это соотношение, тем выше производительность дробильных установок (рис. 2).

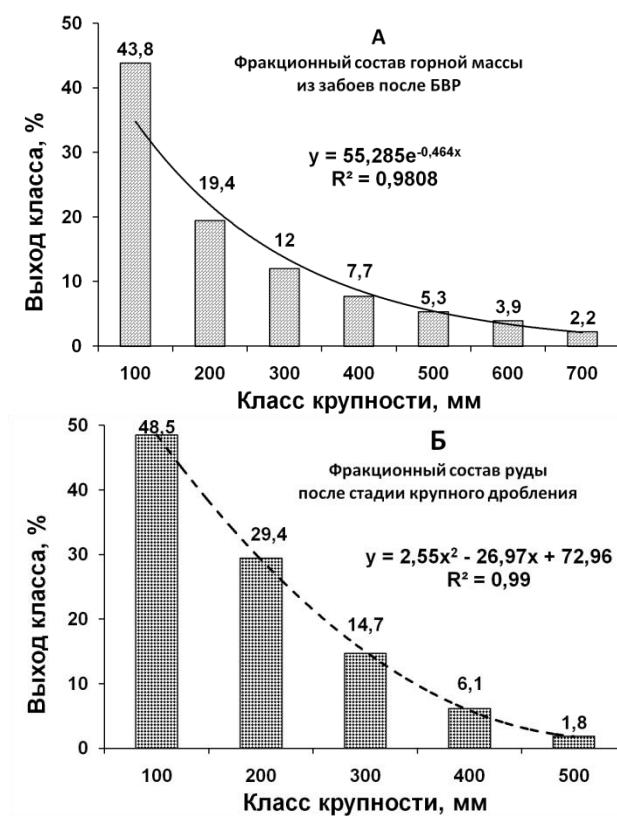


Рис. 1. Гистограмма распределения крупности горной массы при отгрузке после БВР и стадии крупного дробления:

А – крупность горной массы, поступающей из забоев;
Б – фракционный состав руды после стадии крупного дробления

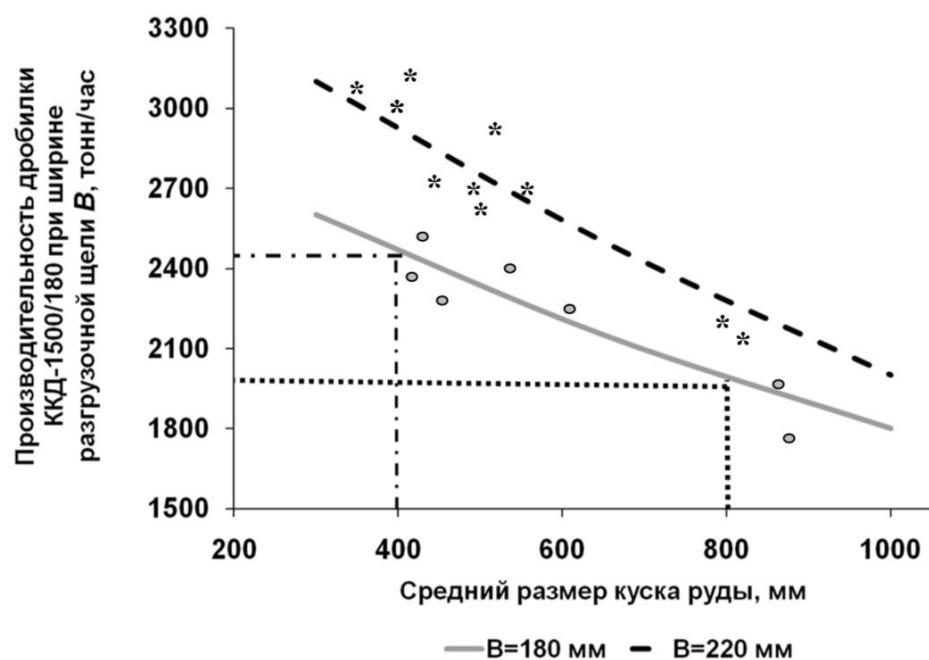


Рис. 2. Влияние среднего размера куска исходной руды на производительность конусной дробилки крупного дробления

Производительность экскаваторов также напрямую зависит от качества буровзрывной подготовки массива. С увеличением степени дробления породы в забое сокращается удельное сопротивление породы копанию и возрастает эффективность работы экскаваторов. Коэффициент разрыхления пород после БВР влияет на производительность экскаватора. Чем выше коэффициент разрыхления, тем сложнее для экскаватора разрабатывать забой, перемещать и добывать горный материал. Разрыхленный материал содержит больше пустот и воздуха, что увеличивает сопротивление копанию, снижает степень наполнения ковша и производительность экскаватора (рис. 3) [3 – 5].

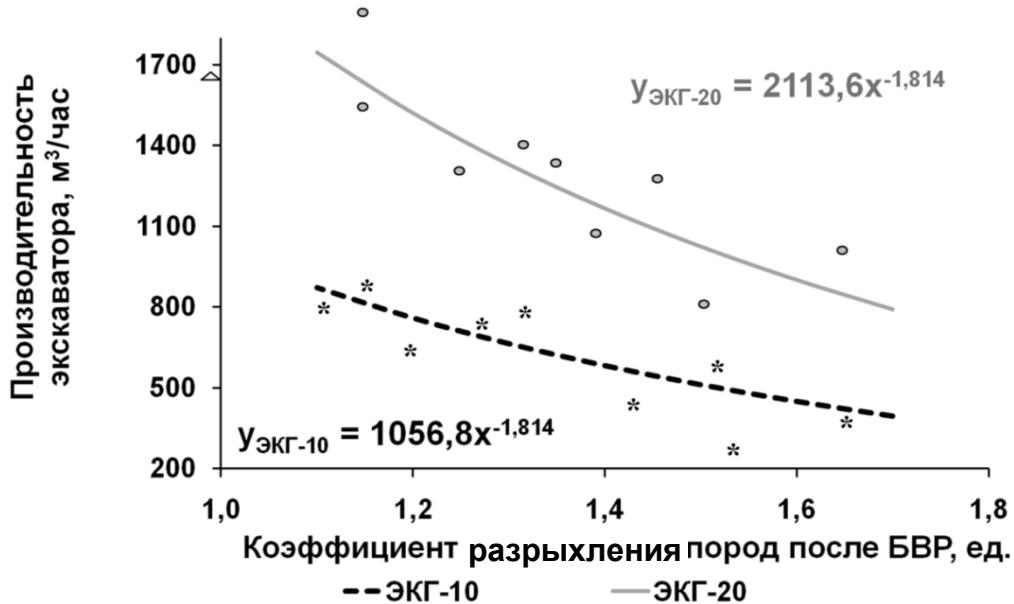


Рис. 3. Влияние коэффициента разрыхления пород после БВР на производительность экскаваторов типа ЭКГ

Существует оптимальный коэффициент разрыхления грунтов каждой категории, который соответствует минимальным затратам на буровзрывные работы при достижении величины сопротивления грунтов копанию (K_f), соответствующей номинальному режиму работы экскаваторов.

Известно [3], что степень разрыхления пород (k_p) связана с размером среднего куска (d_{cp}) следующей зависимостью:

$$k_p \approx 1 + d_{cp}. \quad (1)$$

Снизить категорию трудности экскавации породы в массиве (N_{Π}) возможно путем обеспечения заданной степени ее разрыхления (k_p) и кусковатости (d_{cp}).

Категория породы (N_B) после ее взрывной подготовки определяется из выражения:

$$N_B = N_{\Pi} - n_B, \quad (2)$$

где n_B – коэффициент (в единицах), учитывающий изменение категории породы при ее разрыхлении.

В свою очередь категория породы после взрыва (N_B) определяется по формуле:

$$N_B = N_{\Pi} \times k_p. \quad (3)$$

Расчеты показывают, что для рудных карьеров, разрабатывающих породы V - VI категорий по трудности экскавации ($K_f = 500 \div 800 \text{ кН/м}^2$), сокращение размера среднего куска (d_{cp}) взорванной горной массы до $0,175 b_k$ (где b_k – ширина ковша экскаватора) позволяет снизить категорию грунта на единицу и повысить производительность экскаваторов в забое на 20 – 25 %.

Из практики и на основании выполненных расчетов установлено, что при разработке прочных пород (песчаники, сланцы, граниты, кварциты, габбро, руды черных и цветных металлов) для обеспечения в карьере усиленного рыхления массива необходимо изменить параметры буровзрывных работ [6 – 10] с соблюдением следующих требований:

- 1) диаметр скважин (D) не должен превышать 160 мм;
- 2) расчетная линия сопротивления по подошве (W) относительно диаметра скважин не должна превышать значений: $W_O \approx 24 \div 27 D$;
- 3) расстояние между скважинами (a): $a \approx 27 \div 31 D$;
- 4) коэффициент сближения скважин (m_O): $m_O = a / W_O = 1,15$;
- 5) перебур скважины (L_Π) не должен превышать значений: $L_\Pi \approx 8 \div 10 D$;
- 6) форма сетки расположения скважин – шахматная равносторонняя;
- 7) взрывание многорядное (свыше 3-х рядов);
- 8) размещение заряда по высоте – равномерное (за счет создания по длине заряда воздушных промежутков).

Для конкретного предприятия эти параметры уточняются в проектах БВР с учетом повышения опасности для производственных объектов увеличением диаметра разлета кусков и увеличением радиуса опасных зон.

Большое влияние на качество взрыва оказывает четкое соблюдение сетки расположения скважин. Отклонения от среднего размера сетки (Δa), достигающей $\pm 5D$, увеличивают выход негабарита в $\sim (1 + \Delta a/a)$ раз [7]. В крепких породах рекомендуется использование более мощных ВВ, улучшающих качество дробления.

Реализация мероприятий по усилению взрывного рыхления пород сопровождается увеличением затрат на дополнительные работы по бурению, заряжанию и взрыванию скважин. Для оценки влияния параметров БВР (удельного расхода ВВ, расстояния между скважинами и др.) на экономические показатели выполнены расчеты с использованием специально разработанных компьютерных программ и данных предприятий, некоторые результаты которых представлены на рис. 4, 5.

Зависимость объема буровых работ и удельных эксплуатационных затрат на БВР от расстояния между скважинами



Рис. 4. Влияние расстояния между буровыми скважинами на объем буровых работ и удельные эксплуатационные затраты на БВР

Удельные эксплуатационные затраты на БВР в зависимости от удельного расхода ВВ

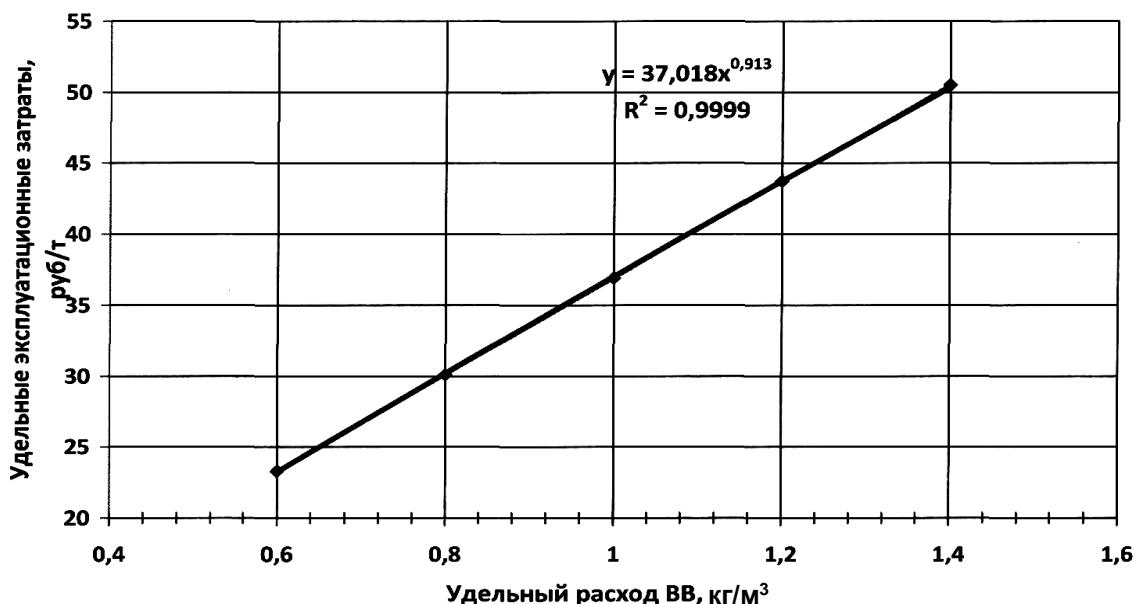


Рис. 5. Зависимость удельных эксплуатационных затрат на БВР от удельного расхода ВВ на отбойку 1 м³ горной массы

Результаты расчетов свидетельствуют о росте себестоимости БВР при переходе на усиление взрывного рыхления пород, что может оказаться неприемлемым для ряда карьеров с большим объемом бурения и взрывания скважин за счет увеличения затрат и усложнения организации работ.

Однако для небольших предприятий с объемами переработки горной массы в 1-3 млн м³/год экономия от сокращения затрат на экскавацию и крупное дробление позволит получать стабильный общий экономический эффект.

Выходы

Исключение стадии крупного дробления из технологических процессов обогащения руды за счет усиленного взрывного рыхления пород в карьере может стать одним из направлений сокращения затрат при изготовлении рудных концентратов и повышении их потребительских свойств.

Сокращение стадии крупного дробления при производстве щебня из горных пород, в т. ч. из пород вскрыши, позволяет повысить прочность и качество фракций щебня, т.к. ударные воздействия на горные породы в дробилках крупного дробления приводят к существенному ослаблению структуры исходного материала и способствуют его ускоренному разрушению и измельчению.

С увеличением степени дробления полезного ископаемого в забое сокращается удельное сопротивление породы копанию и растет производительность экскаваторов на 20 – 30 %. Напрямую линейно зависит от среднего размера куска питания и производительность дробильных установок, а исключение стадии крупного дробления из технологических процессов рудоподготовки минерального сырья для небольших предприятий, с объемами добычи до 2 млн м³/год, позволяет значительно сократить эксплуатационные расходы.

Таким образом, повышение степени взрывного рыхления рудной массы в карьере с целью исключения дорогостоящих трудоемких стадий крупного дробления в техноло-



гических процессах рудоподготовки сырья может стать одним из направлений повышения эффективности горнорудного производства при неустойчивом спросе на продукцию в условиях рынка.

Список литературы

1. Козин В.З., 2009. *Исследование руд на обогатимость*. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 380 с.
2. Булгаков А.Г., Дыба В.П., Скибин Г.М., 2011. *Механика грунтов в решении геотехнических задач*. Новочеркасск: Наука. Образование. Культура, 326 с.
3. Беляков Ю.И., 1983. *Проектирование экскаваторных работ*. Москва: Недра, 349 с.
- 4 Друкованый М.Ф., Тартаковский Б.Н., Вишняков В.С., Ефремов Э.И., 1974. *Влияние дробления пород на эффективность технологических процессов открытой разработки*. Киев: Наукова думка, 268 с.
5. Кантемиров В.Д., 2011. Перспективы использования мощных экскаваторно-автомобильных комплексов при освоении новых сырьевых баз. *Горный информационно-аналитический бюллетень, Отд. вып. № 11. Проблемы недропользования*, С. 383 - 387.
6. Михайлов А.Г., 2002. *Проектирование параметров взрывных работ на карьерах*. Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 268 с.
7. Комашенко В.И., Носков В.Ф., Лебедев Ю.А., 1995. *Буровзрывные работы: Учебник для вузов*. Москва: Недра, 413 с.
8. Кантемиров В.Д., 2014. Технологические особенности освоения новых сырьевых баз. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 6, С. 369 – 373.
9. Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Яковлев А.М., 2019. Анализ эксплуатационных показателей горнодобывающего оборудования ведущих железорудных карьеров России. *Известия вузов. Горный журнал*, № 2, С. 40-50, DOI: 10.21440/0536-1028-2019-2-40-50.
10. Кутузов Б.Н., Белин В.А., 2012. *Проектирование и организация взрывных работ*. Москва: Издательство «Горная книга», 416 с.

References

1. Kozin V.Z., 2009. Issledovanie rud na obogatimost' [Ore enrichment testing]. Ekaterinburg: Izd-vo UGGU, 380 p.
2. Bulgakov A.G., Dyba V.P., Skibin G.M., 2011. Mekhanika gruntov v reshenii geotekhnicheskikh zadach [Soil mechanics in solving geotechnical problems]. Novocherkassk: Nauka. Obrazovanie. Kul'tura, 326 p.
3. Belyakov Yu.I., 1983. Proektirovaniye ekskavatornykh rabot [Designing of excavation works]. Moscow: Nedra, 349 p.
4. Drukowanyi M.F., Tartakovskii B.N., Vishnyakov V.S., Efremov E.I., 1974. Vliyanie drobleniya porod na effektivnost' tekhnologicheskikh protsessov otkrytoi razrabotki [Impact of rock crushing on the efficiency of open-pit mining processes]. Kiev: Naukova dumka, 268 p.
5. Kantemirov V.D., 2011. Perspektivy ispol'zovaniya moshchnykh ekskavatorno-avtomobil'nykh kompleksov pri osvoenii novykh syr'evykh baz [Prospects of using powerful excavator-automobile complexes in the development of new raw material bases]. Gornyi informatsion-no-analiticheskii byulleten', Otd. vyp. № 11. Problemy nedropol'zovaniya, P. 383-387.
6. Mikhailov A.G., 2002. Proektirovaniye parametrov vzryvnykh rabot na kar'erakh [Designing parameters of blasting operations at quarries]. Yakutsk: YAF Izd-va SO RAN, 268 p.
7. Komashchenko V.I., Noskov V.F., Lebedev Yu.A., 1995. Burovzryvnye raboty: Uchebnik dlya vuzov [Drilling and blasting operations: A textbook for universities]. Moscow: Nedra, 413 p.



-
8. Kantemirov V.D., 2014. Tekhnologicheskie osobennosti osvoeniya novykh syr'-evykh baz [Technological features of the development of new raw materials base]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 6, P. 369 – 373.
 9. Kantemirov V.D., Titov R.S., Yakovlev A.M., 2019. Analiz ekspluatatsionnykh pokazatelei gornodobyvayushchego oborudovaniya vedushchikh zhelezorudnykh kar'erov Rossii [Analysis of operational indicators of mining equipment of leading iron ore quarries in Russia]. Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal, № 2, P. 40-50, DOI: 10.21440/0536-1028-2019-2-40-50.
 10. Kutuzov B.N., Belin V.A., 2012. Proektirovanie i organizatsiya vzryvnykh rabot [Design and organization of blasting operations]. Moscow: Izdatel'stvo «Gornaya kniga», 416 p.



УДК 622.7:681.5

Загирный Вячеслав Анатольевич
аспирант,
кафедра разработки месторождений
открытым способом,
Уральский государственный
горный университет,
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30;
руководитель проектов,
ООО «ЕвразТехника ИС»,
624351, г. Качканар, ул.Крылова, 6
e-mail: VZagirny@mail.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ КАЧЕСТВОМ РУДОПОТОКОВ В УСЛОВИЯХ АО «ЕВРАЗ КГОК» НА ОСНОВЕ ГЕОМЕТАЛЛУРГИИ

Аннотация:

В статье представлен инновационный геометаллургический подход к управлению качеством рудопотоков на примере ЕВРАЗ Качканарского горно-обогатительного комбината (КГОК). Исследование направлено на решение актуальной проблемы обеспечения стабильности качественных характеристик минерального сырья в условиях высокой вариативности руд.

Разработана комплексная интегрированная система управления производством, включающая пять взаимосвязанных компонентов: автоматизированное планирование горных работ, центр управления производством, оперативное управление железнодорожным транспортом и автосамосвалами, систему прослеживаемости качественных показателей на дробильно-обогатительной фабрике.

Ключевым результатом является создание трехмерной блочной модели перегрузочных пунктов, позволяющей в режиме реального времени определять качественные характеристики рудного материала с учетом координат разгрузки и черпания и обеспечить прослеживаемость качественных показателей руды, поступающей на дробильную фабрику. Опытное внедрение системы подтверждает ее эффективность, что выразилось в снижении потерь железа в хвостах и повышении стабильности технологических процессов.

Научная новизна заключается в разработке методологии сквозного управления качеством рудопотоков на основе цифровых технологий, которая может быть адаптирована для различных горнодобывающих предприятий.

Ключевые слова: геометаллургия, рудопотоки, качество руды, цифровая трансформация, блочное моделирование, управление производством, автоматизация, прослеживаемость, информационные системы.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.04.044

Zagirnyi Vyacheslav A.
Postgraduate Student
of the Open-pit Mining Department,
Ural State Mining University,
620144 Ekaterinburg, 30 Kuibysheva Str.;
Project Manager,
«Evraztechnika IS» LLC,
624351 Kachkanar, 6 Krylova str.
e-mail: VZagirny@mail.ru

IMPROVEMENT OF APPROACHES TO QUALITY MANAGEMENT OF ORE FLOWS IN THE CONDITIONS OF JSC EVRAZ KGOK, GEOMETALLURGY

Abstract

The article presents an innovative geometallurgical approach to ore flow quality management using the example of EVRAZ Kachkanar Mining and Processing Plant (KGOK). The study aims to address the critical problem of ensuring the stability of mineral raw materials' quality characteristics under conditions of high ore variability.

A comprehensive integrated production management system has been developed, including five interconnected components: automated mining operations planning, production management center, operational management of truck and railway transport, and a traceability system for quality indicators at the crushing and processing plant.

The key result is the creation of a three-dimensional block model of transshipment points, enabling real-time determination of ore material quality characteristics, taking into account unloading and excavation coordinates, and ensuring traceability of ore quality indicators entering the crushing plant. Pilot implementation of the system confirms its effectiveness, manifested in reducing iron losses in tailings and improving the stability of technological processes.

The scientific novelty lies in developing a methodology for end-to-end ore flow quality management based on digital technologies, which can be adapted for various mining enterprises.

Key words: geometallurgy, ore flows, ore quality, digital transformation, block modeling, production management, automation, traceability, information systems.



Введение

Эффективное управление качеством рудопотоков является критически важным фактором обеспечения стабильной работы горно-обогатительных предприятий. Высокая вариативность качественных характеристик исходного сырья приводит к снижению производительности обогатительных фабрик, увеличению потерь полезных компонентов в хвостах и ухудшению технико-экономических показателей производства в целом.

Анализ текущего состояния производственных систем выявил следующие ключевые проблемы традиционного подхода к планированию и управлению качеством рудопотоков:

1. Разнородность и несогласованность данных о качестве руд. Информация о качественных характеристиках сырья на добычных и обогатительных переделах поступает с различной дискретностью и атомарностью, что затрудняет формирование целостного представления о материальных потоках.

2. Фрагментарность программного обеспечения. Использование разнородного программного обеспечения на различных этапах производственного цикла создает технологические барьеры для интеграции информационных потоков и снижает оперативность обмена данными.

3. Изолированность информационных систем управления. Системы автоматизации, контроля и управления на добывающих и обогатительных переделах функционируют разрозненно, без должного уровня интеграции и синхронизации, что препятствует формированию единого информационного пространства.

4. Отсутствие механизмов оперативного реагирования. Изолированность информационных систем исключает возможность своевременного реагирования на изменения, происходящие на смежных переделах.

Указанные проблемы приводят к невозможности обеспечения прослеживаемости и управления стабильностью качественных показателей сырья, поступающего на дробильно-обогатительную фабрику (ДОФ), что негативно отражается на производительности и экономической эффективности производства.

Для повышения стабильности качественных показателей руды и снижения вариативности на ЕВРАЗ КГОКе реализуется концепция геометаллургии, под которой понимается оптимизация шихтования путем сквозного управления технологической цепочки «рудоуправление – автомобильный транспорт – железнодорожный транспорт – дробильно-обогатительная фабрика» для получения экономических эффектов за счет снижения потерь в хвостах магнитной сепарации и повышения производительности секций цеха обогащения.

Теория, материалы и методы исследования

Применение цифровых решений обеспечивает базу для формирования многокомпонентных производственных систем интеграционного типа.

В современных условиях эволюция цифровой сферы, включающая промышленные IoT-решения (ПоТ), аналитические платформы для работы с большими объемами информации (Big Data) и инструменты машинного интеллекта, формирует принципиально новые перспективы для создания многоуровневых интеграционных моделей в горнодобывающей и перерабатывающей отраслях [2 – 4].

Возможности, предоставляемые актуальными технологическими решениями [1, 10], следующие:

1. Организация постоянного анализа качественных параметров рудного материала на каждом производственном этапе.

2. Установление многоуровневых взаимосвязей между геологическим строением рудных залежей и эффективностью технологических процессов переработки.



3. Применение прогнозных моделей для предвидения трансформации показателей переработки при вариации свойств сырьевого материала и настроек технологического оснащения.

4. Формирование систем поддержки управленческих решений для динамичного реагирования на вариативность качественных характеристик поступающего сырья.

*Геометаллургический подход к управлению качеством рудопотоков
на ЕВРАЗ КГОКе*

ЕВРАЗ КГОК – крупнейший производитель железорудного сырья в России, где добыча руды ведется открытым способом в пяти карьерах. Горная масса транспортируется из забоя автосамосвалами грузоподъемностью 130 – 240 т на перегрузочные пункты, откуда железнодорожным транспортом доставляется на ДОФ (рис. 1). Содержание железа в рудах месторождения колеблется в пределах 14 – 16 %, пятиокиси ванадия – 0,12 - 0,14 %. Качественные характеристики руды в карьерах имеют значительную вариативность, что определяет критическую важность усреднения качественных показателей сырья, поступающего на фабрику.

Производственная цепочка ЕВРАЗ КГОК

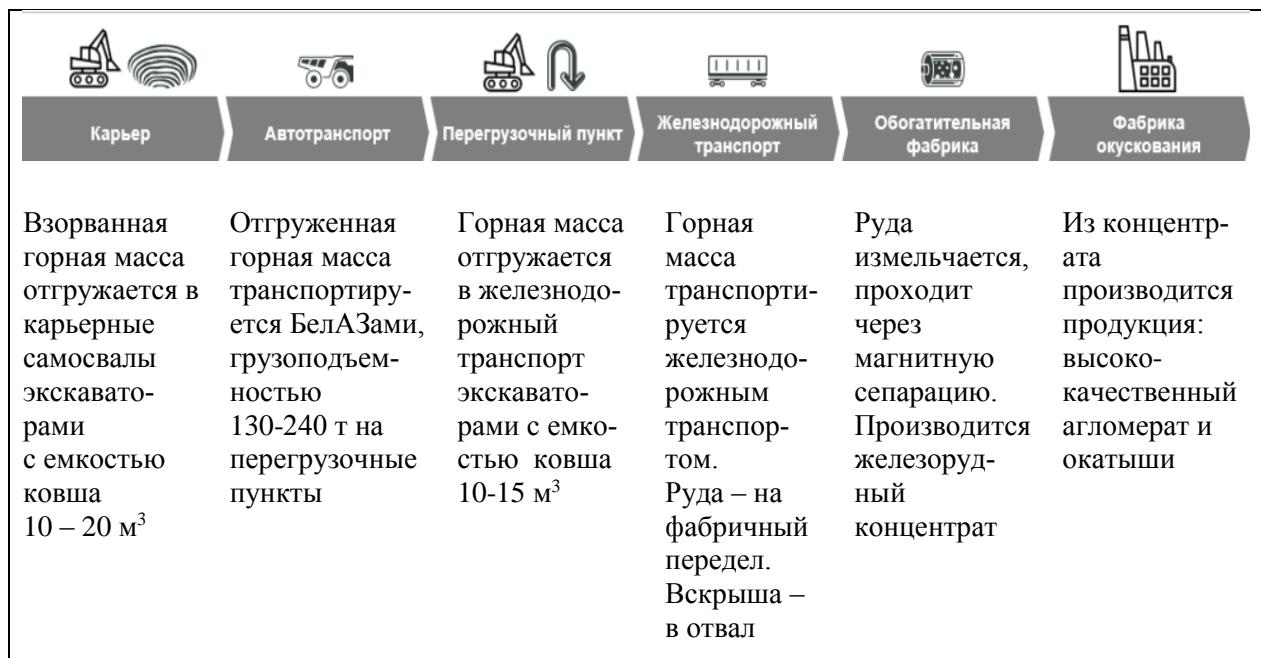


Рис. 1. Производственная цепочка ЕВРАЗ КГОКа

Понятие геометаллургии на ЕВРАЗ КГОКе предусматривает единый подход к управлению качественными показателями рудопотоков на всех этапах производственно-технологической цепи. В рамках данного направления осуществляется выполнение совокупности взаимосвязанных задач (рис. 2):

- автоматизация системы календарного планирования горных работ на горизонте недельно-сменного графикования (НСГ);
- создание организационной структуры «Центра управления производством» (ЦУП);
- оперативное управление парком автосамосвалов посредством модуля оперативного управления (МОУ);
- диспетчеризация и оперативное управление тяговыми агрегатами (ТА);
- обеспечение прослеживаемости качественных характеристик рудного сырья на ДОФ.

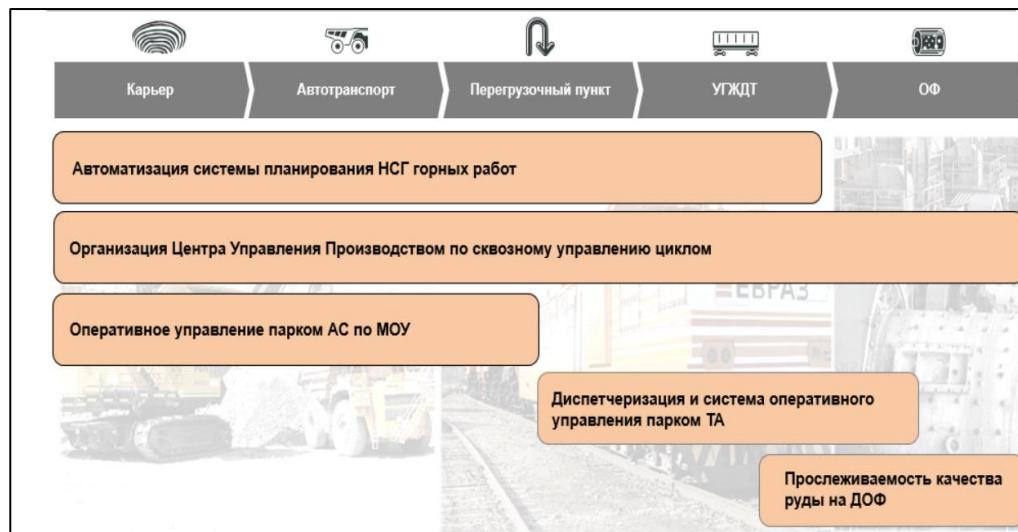


Рис. 2. Проекты, реализуемые на ЕВРАЗ КГОКе

Далее представлено детализированное описание пяти проектов, реализуемых для решения указанных задач.

1. Автоматизация системы календарного планирования горных работ на горизонте недельно-сменного графикования (НСГ)

Проект завершен и внедрен в промышленную эксплуатацию. Разработано программное обеспечение для оперативного, эффективного и эргономичного планирования работы экскаваторного парка на карьерных разработках. Возможности программного обеспечения позволяют на этапе планирования определять оптимальную пространственную схему размещения горнотранспортного оборудования и рациональную последовательность отработки горных уступов (рис. 3).

Рабочие задачи программного обеспечения: разработка способов размещения горнотранспортного оборудования с учетом всей совокупности ограничивающих условий, а также определение оптимальной очередности ведения горных работ.

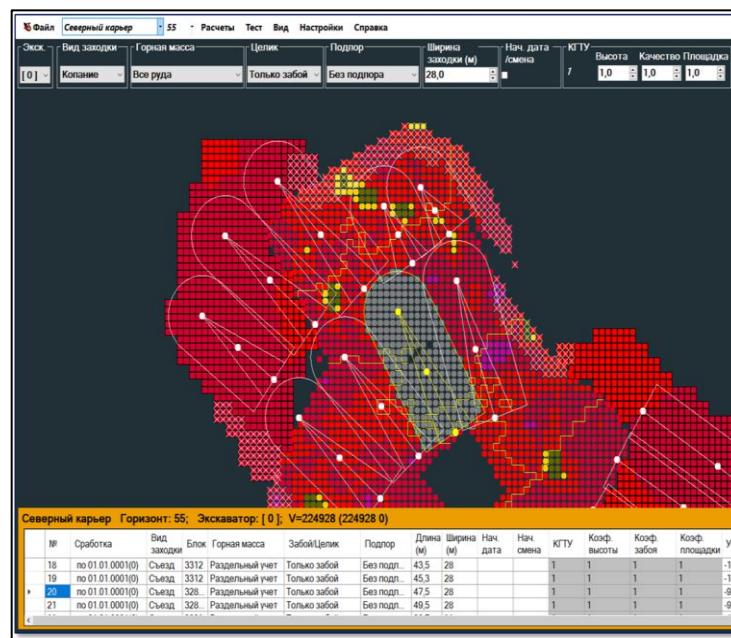


Рис. 3. Графический редактор экскаваторных заходок системы календарного планирования НСГ



2. Организация Центра управления производством (ЦУП)

Создана организационная структура ЦУП для сквозного управления технологическими процессами. Сформировано единое информационное пространство для диспетчерского персонала с целью обеспечения оперативного информационного обмена и повышения качества управленческих решений (рис. 4). Проведена реорганизация структуры производственного подразделения комбината.



Рис. 4. Центр управления производством ЕВРАЗ КГОК

3. Оперативное управление парком автосамосвалов через модуль оперативного управления (МОУ)

Выполнение данного направления представляет собой совокупность взаимосвязанных задач, направленных на повышение прослеживаемости рудопотоков и оперативное регулирование качественных показателей минерального сырья.

На основе геологической информации система определяет вещественный состав и качественные характеристики горной массы в зоне работы каждого экскаваторного комплекса (рис. 5). Система диспетчеризации отображает машинисту экскаватора границы сменного задания, определяющие пространственные пределы зоны черпания. Высокоточное определение местоположения экскаваторного оборудования обеспечивает определение качественных показателей горной массы в ковше и, соответственно, в кузове каждого загружаемого автосамосвала.

Модель оптимизации осуществляет распределение автосамосвалов и формирование транспортных путей таким образом, чтобы минимизировать отклонение качественных показателей на перегрузочных складах от целевых значений (рис. 6). Высокоточное определение местоположения автосамосвалов позволяет фиксировать координаты точек разгрузки и формировать блочную модель перегрузочного склада.

На начальном этапе реализации была разработана и внедрена двумерная блочная модель перегрузочного пункта, обеспечивающая расчет усредненных качественных характеристик рудного материала по всем участкам перегрузочных пунктов (рис. 7).

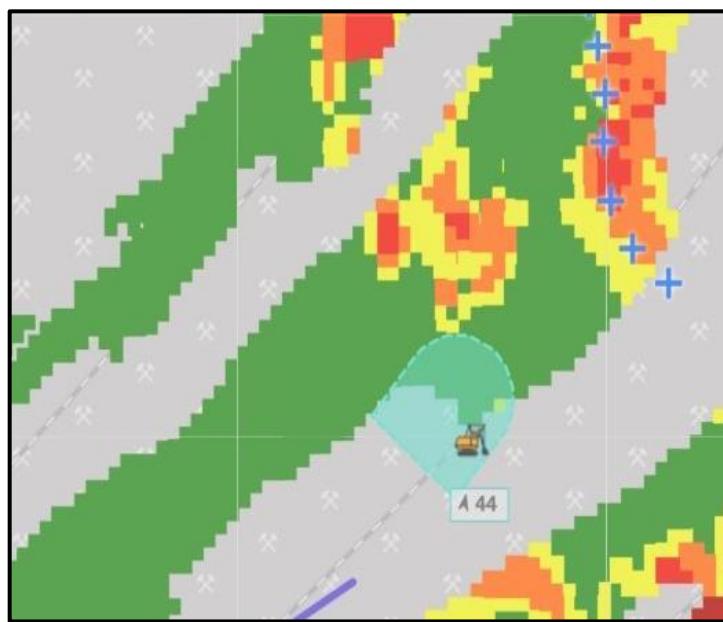


Рис. 5. Визуализация блочной модели и контура сменного задания на панели машиниста экскаватора

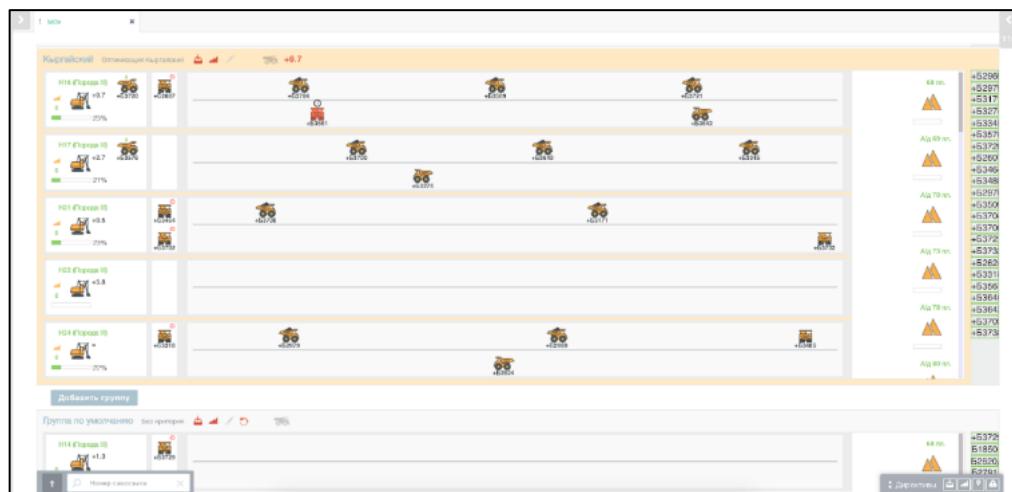


Рис. 6. Визуализация модуля оперативного управления самосвалами

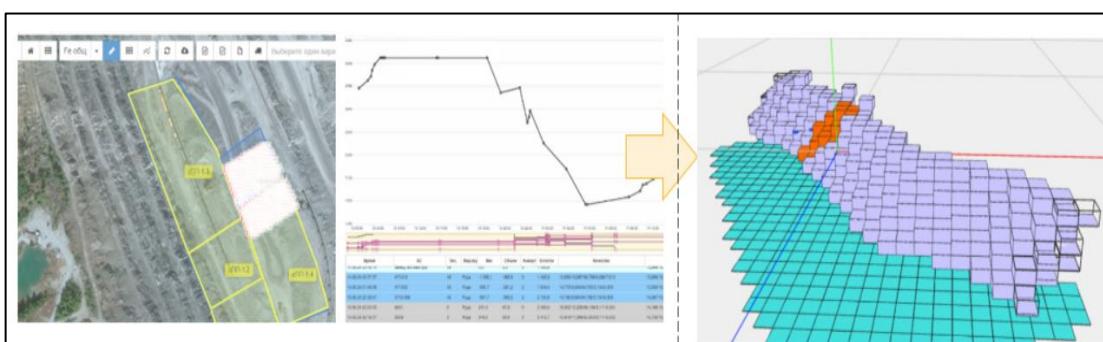


Рис. 7. Переход от двухмерной к трехмерной блочной модели перегрузочных пунктов



В настоящее время опытную эксплуатацию проходит трехмерная блочная модель, построенная на основе данных о координатах разгрузки автосамосвалов в различных зонах участка фронта разгрузки с учетом качественных показателей по черпаниям экскаватора на перегрузочном пункте (рис. 8).

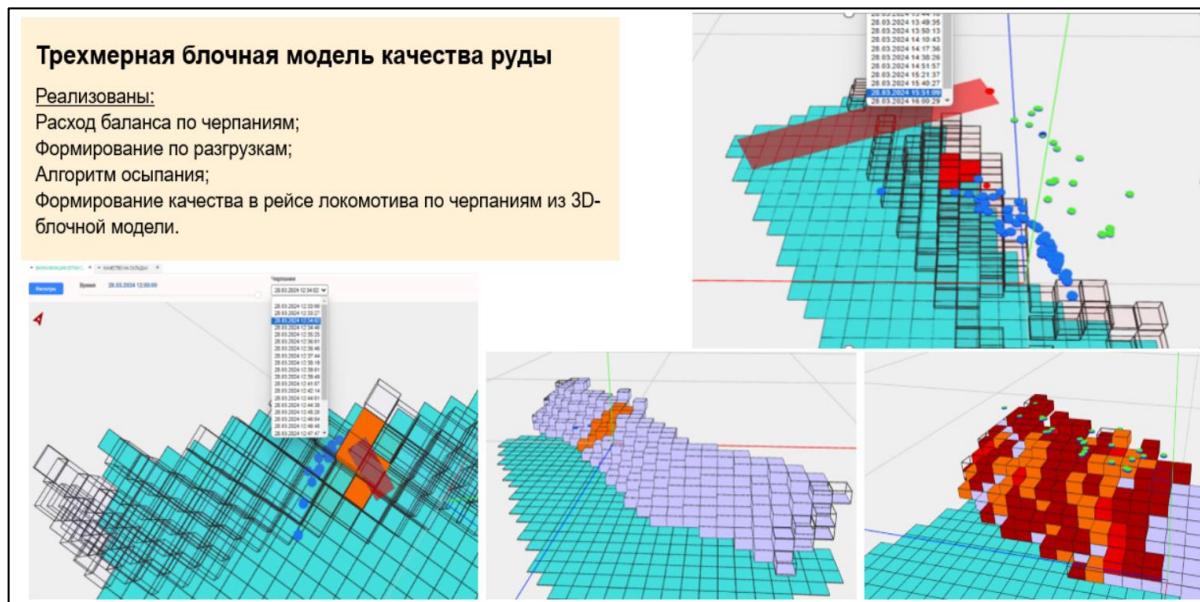


Рис. 8. Трехмерная блочная модель перегрузочного пункта

В рамках создания трехмерной блочной модели разработаны следующие возможности:

- формирование модели по операциям разгрузки;
- моделирование процессов осыпания горной массы;
- расчет баланса по операциям черпания;
- определение качественных показателей в рейсе локомотивосостава на основе черпаний из трехмерной блочной модели.

На следующем этапе экскаваторный комплекс осуществляет погрузку усредненного рудного материала с фиксацией информации о качественных показателях каждого черпания в локомотивосостав для транспортировки на дробильную фабрику. Таким образом обеспечивается непрерывная прослеживаемость качественных характеристик рудного сырья на участке от забоя до перегрузочного пункта.

Текущее состояние

Система формирования блочных моделей перегрузочных пунктов находится в стадии опытно-промышленной эксплуатации.

4. Диспетчеризация и оперативное управление парком железнодорожного транспорта

Основные задачи программы:

- оснащение локомотивов системами высокоточного определения местоположения (рис. 9);
 - построение карты рабочего времени (КРВ) локомотивосоставов;
 - обеспечение прослеживаемости качественных и количественных показателей рудного материала от момента погрузки на перегрузочном пункте до разгрузки на дробильно-обогатительной фабрике.

Текущее состояние

Система находится в стадии опытно-промышленной эксплуатации.



Рис. 9. Оснащение локомотивов системами позиционирования

5. Система управления производственными процессами ЕВРАЗ КГОКа

представляет собой единую систему управления производственными процессами, обеспечивающую контроль и координацию выполнения производственных операций в режиме реального времени.

В рамках геометаллургической концепции выполнено два рабочих раздела.

Выполненные разделы:

- раздел ввода данных о разгрузках рудного материала;
- раздел отображения качественных показателей мелкодробленой руды в бункерах цеха обогащения.

Принцип работы системы

Информационное обеспечение системы осуществляется в смешанном режиме: часть данных (временные показатели погрузки, качественные характеристики) поступает в автоматическом режиме, часть информации вводится вручную работниками фабрики крупного дробления. Данное построение системы обеспечивает возможность прогнозирования качественных показателей мелкодробленой руды в бункере в режиме реального времени (рис. 10) на основании геологических данных, что позволяет осуществлять упреждающее управление качественными показателями рудного сырья на этапе обогащения.

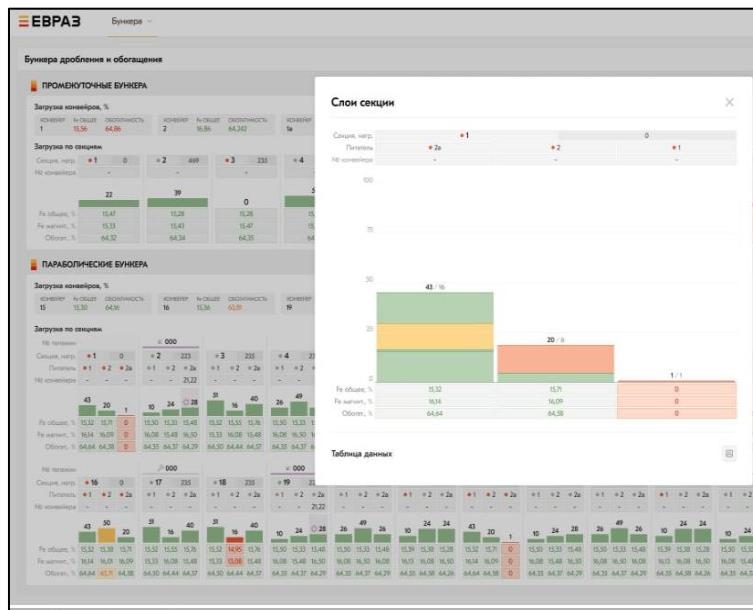


Рис. 10. Визуализация послойного наполнения бункера дробленой рудой с учетом геологических качественных показателей



Текущее состояние

Система находится в стадии опытно-промышленной эксплуатации.

Выполнение данной совокупности взаимосвязанных задач обеспечивает сквозную прослеживаемость качественных характеристик рудного сырья на всех этапах производственно-технологической цепи – от забоя до поступления на обогащение, что является основой для оптимизации технологических процессов и повышения эффективности производства.

Результаты

Практическая значимость и востребованность

Разработана и обоснована концепция геометаллургического подхода к управлению качеством рудопотоков, обеспечивающая единое информационное пространство и сквозную прослеживаемость качественных характеристик минерального сырья на всех этапах производственно-технологической цепи – от забоя до поступления на обогащение.

Создана интегрированная система управления производством, включающая пять взаимосвязанных компонентов:

- автоматизированную систему календарного планирования горных работ на основе НСГ;
- организационную структуру центра управления производством;
- средства оперативного управления автосамосвальным парком;
- систему диспетчеризации железнодорожного транспорта;
- систему прослеживаемости качественных показателей на ДОФ.

Реализована трехмерная блочная модель перегрузочных пунктов, позволяющая в режиме реального времени определять качественные показатели рудного материала с учетом координат разгрузки автосамосвалов и черпаний экскаваторов, что обеспечивает точное управление процессами усреднения руды.

Опытное внедрение системы на ЕВРАЗ КГОКе подтвердило практическую эффективность разработанного подхода. Достигнуты значительные экономические эффекты за счет снижения содержания Fe в хвостах, оптимизации режимов работы фабрики и обеспечения стабильности качественных характеристик поступающего сырья. По результатам опытно-промышленной эксплуатации (период сравнения: 12 месяцев) установлены следующие эффекты: содержание железа в хвостах магнитной сепарации снизилось с 6,35 до 6,26 % (снижение на 0,09 процентных пункта), что соответствует уменьшению потерь железа на 1,5 % в абсолютном выражении.

Сходимость прогнозируемых и фактических показателей качества рудного материала в системе управления производственными процессами подтверждает корректность применяемых математических моделей и алгоритмов, что открывает возможности для упреждающего управления качеством на этапе обогащения.

Установлена перспективность дальнейшего развития интегрированного геометаллургического моделирования в направлении совершенствования методов прогнозирования качества руд, развития алгоритмов интеграции информационных систем и создания специализированных цифровых платформ для горнодобывающей промышленности.

Заключение

В рамках проведенного исследования разработана и обоснована концепция геометаллургического управления качеством рудопотоков, трансформирующая подходы к организации производственных процессов в горнодобывающей отрасли.

Выявлены системные проблемы традиционных методов управления качеством минерального сырья: разобщенность информационных систем, фрагментарность программного обеспечения и отсутствие механизмов оперативного реагирования.

Разработана интегрированная методология сквозного геометаллургического



управления, включающая пять взаимосвязанных компонентов: систему недельно-сменного календарного планирования, центр управления производством, средства оперативного управления автотранспортом, систему диспетчеризации железнодорожного транспорта и систему прослеживаемости качественных показателей на ДОФ.

Ключевым научным результатом является разработка и интеграция с информационными системами переделов трехмерной блочной модели перегрузочных пунктов, обеспечивающей управление процессами усреднения руды в режиме реального времени с учетом координат разгрузки и черпания.

Промышленное внедрение на ЕВРАЗ КГОКе подтвердило практическую эффективность разработанного подхода. Анализ результатов опытно-промышленной эксплуатации (12 месяцев) выявил снижение содержания железа в хвостах магнитной сепарации с 6,35 до 6,26 %, что соответствует уменьшению потерь железа на 1,5 % в абсолютном выражении.

Список литературы

1. Корнилков С.В., Рыбников П.А., Рыбникова Л.С., 2025. Об основных направлениях взаимодополнения методов цифровизации и геоинформационного обеспечения горного производства. *Proceedings of Higher Educational Establishments: Geology and Exploration*, Т. 67, № 1, С. 76-85. DOI: <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-1-76-85>
2. Соколов И.В., Корнилков С.В., Панжин А.А., 2023. Геоинформационные технологии сопровождения процессов горного производства. *Горная промышленность*, № S5, С. 41-46. DOI: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-41-46>
3. Мыслецов А.И., Авруцкая С.Г., 2023. Цифровые технологии и устойчивое развитие в горнодобывающей отрасли. *Успехи в химии и химической технологии*, № 1 (263), С. 1-5.
4. Мишулович П.М., Петров С.В., 2019. Методологические аспекты создания геолого-технологических моделей месторождений полезных ископаемых. *Вестник СПбГУ. Науки о Земле*, № 2, С. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.205>
5. Яковлев В.Л., Лаптев Ю.В., Яковлев А.М., 2015. Методика геометризации качественных характеристик Гусевогорского месторождения титаномагнетитовых руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 1-8. DOI:10.18454/2313-1586.2014.02.174
6. Лянгазов С.В., Загирный В.А., 2023. Развитие направления «Геометаллургия». *Горная промышленность*, № 3, С. 12-14.
7. Корнилков С.В., Наговицын О.В., Славиковская Ю.О., Яковлев А.М., Титов Р.С., Мусихина О.В., Лель Ю.И., Исаков С.В., Кантемиров В.Д., 2021. *Планирование открытых горных работ*. Москва: Ай Пи Ар Медиа, 256 с.
8. Rajabinasab B., Asghari O., 2019. Geometallurgical Domaining by Cluster Analysis: Iron Ore Deposit Case Study. *Natural Resources Research*, 28, P. 665–684. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11053-018-9411-6>
9. Dominy S.C., O'Connor L., Parbhakar-Fox A., Glass H.J., Purevgerel S., 2018. Geometallurgy—A Route to More Resilient Mine Operations. *Minerals*, Vol. 8, № 12. – P. 1-15. DOI: 10.3390/min8120560.
10. Цифровое будущее горнорудного предприятия. *BCG Review*, 2020, Сентябрь. URL: <https://media-publications.bcg.com/BCG-Review-September-2020.pdf> (дата обращения 12.12.2025)
11. Загирный В.А., 2024. Сквозное управление качеством руды может стать одним из основных направлений цифровизации на Урале. *Цифровой промышленный Урал: Форум, Выставка «Рудник»*, Екатеринбург, октябрь. URL: <https://promvest.info/post-reliyzi-vyistavok/itogi-foruma-tsifrovoy-promyishlennyiy-ural/> (дата обращения 15.12.2025)



References

1. Kornilkov S.V., Rybnikov P.A., Rybnikova L.S., 2025. Ob osnovnykh napravleniyakh vzaimodopolneniya metodov tsifrovizatsii i geoinformatsionnogo obespecheniya gornogo proizvodstva [About the main directions of complementarity of methods of digitalization and geoinformation support of mining production]. Proceedings of Higher Educational Establishments: Geology and Exploration, Vol. 67, № 1, P. 76-85. DOI: <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-1-76-85>
2. Sokolov I.V., Kornilkov S.V., Panzhin A.A., 2023. Geoinformatsionnye tekhnologii soprovozhdeniya protsessov gornogo proizvodstva [Geoinformation technologies for supporting mining production processes]. Gornaya promyshlennost', № S5, P. 41-46. DOI: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-41-46>
3. Myshletsov A.I., Avrutskaya S.G., 2023. Tsifrovye tekhnologii i ustoichivoe razvitiye v gornodobvyayushchei otrasi [Digital technologies and sustainable development in the mining industry]. Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii, № 1 (263), P. 1-5.
4. Mishulovich P.M., Petrov S.V., 2019. Metodologicheskie aspekty sozdaniya geologo-tehnologicheskikh modelei mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh [Methodological aspects of the construction of geological and technological models of mineral deposits]. Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle, № 2, S. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.205>
5. Yakovlev V.L., Laptev Yu.V., Yakovlev A.M., 2015. Metodika geometrizatsii kachestvennykh kharakteristik Gusevogorskogo mestorozhdeniya titanomagnetitovykh rud [The method of geometrization of qualitative characteristics of the Gusevogorskoye deposit of titanium-magnetite ores]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 11, P. 1-8. DOI: 10.18454/2313-1586.2014.02.174
6. Lyangazov S.V., Zagirnyi V.A., 2023. Razvitie napravleniya «Geometallurgiya» [Development of the "Geometry" direction]. Gornaya Promyshlennost', № 3, P. 12-14.
7. Kornilkov S.V., Nagovitsyn O.V., Slavikovskaya Yu.O., Yakovlev A.M., Titov R.S., Musikhina O.V., Lel' Yu.I., Isakov S.V., Kantemirov V.D., 2021. Planirovanie otkrytykh gornykh rabot [Planning of open-pit mining operations]. Moscow: Ai Pi Ar Media, 256 p.
8. Rajabinasab B., Asghari O., 2019. Geometallurgical Domaining by Cluster Analysis: Iron Ore Deposit Case Study. Natural Resources Research, 28, P. 665-684. <https://doi.org/10.1007/s11053-018-9411-6>
9. Dominy S.C., O'Connor L., Parbhakar-Fox A., Glass H.J., Purevgerel S., 2018. Geometallurgy—A Route to More Resilient Mine Operations. Minerals, Vol. 8, № 12. – P. 1-15. DOI: 10.3390/min8120560.
10. Tsifrovoe budushchee gornorudnogo predpriyatiya [The digital future of the mining enterprise]. BCG Review, 2020, Sentyabr'. URL: <https://media-publications.bcg.com/BCG-Review-September-2020.pdf> (data obrashcheniya 12.12.2025)
11. Zagirnyi V.A., 2024. Skvoznoe upravlenie kachestvom rudy mozhet stat' odnim iz osnovnykh napravlenii tsifrovizatsii na Urale [End-to-end ore quality management can become one of the main directions of digitalization in the Urals]. Tsifrovoi promyshlennyi Ural: Forum, Vystavka «Rudnik», Ekaterinburg, oktyabr'. URL: <https://promvest.info/ru/post-relizyi-vystavok/itogi-foruma-tsifrovoy-promyshlenniy-ural/> (data obrashcheniya 15.12.2025)



УДК 622.274

Нikitin Игорь Владимирович,кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
ИГД УрО РАН,
620075, Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: opening-kp@yandex.ru**ИЗЫСКАНИЕ И ОЦЕНКА ПУТЕЙ
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ВСКРЫТИЯ ЗАПАСОВ ШАХТНОГО ПОЛЯ
ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ РАЗРАБОТКЕ
КРУПНЫХ КРУТОПАДАЮЩИХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ*****Аннотация:**

Исчерпание потенциала открытой геотехнологии при освоении крупных крутопадающих месторождений малоценных руд, вызванное проблемой невозможности расширения контуров карьеров по поверхности, актуализирует задачу технико-экономического обоснования целесообразности перехода на завершающем этапе на комбинированный способ их разработки. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности вскрытия запасов шахтного поля. На основе анализа мирового опыта и тенденций развития схем вскрытия предложен комплекс организационно-технических решений, направленных на повышение эффективности вскрытия запасов шахтного поля, основными из которых являются разделение шахтного поля по высоте на очереди вскрытия, организация вентиляционно-сборочного горизонта с группой коротких вентиляционных восстающих в карьере, использование штольневого горизонта для транспортирования руды от скипового ствола до перегрузочного пункта в карьере. Для условий комбинированной разработки Баженовского месторождения хризотил-асбеста разработана эффективная схема вскрытия запасов шахтного поля, позволяющая минимизировать объемы капитальных вложений при строительстве рудника и величину эксплуатационных расходов в период его эксплуатации за счет максимального использования карьерного пространства для целей вскрытия, в том числе для выдачи руды на поверхность.

Ключевые слова: крутопадающее месторождение, малооценные руды, комбинированная разработка, схема вскрытия, шахтное поле, экономико-математическое моделирование, технико-экономические показатели.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.04.055

Nikitin Igor V.Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher Laboratory
of underground geotechnology,
Institute of Mining Ural Branch of RAS,
58 Mamina-Sibiryaka Str.,
620075 Ekaterinburg;
e-mail: opening-kp@yandex.ru**SEARCH AND EVALUATION OF WAYS
TO INCREASE EFFICIENCY OF OPENING
OF RESERVES OF MINE FIELD DURING
THE COMBINED MINING
OF LARGE STEEP DEPOSITS****Abstract:**

The depletion of the potential of open-pit geotechnology at the mining of large steep deposits of low-value ores, caused by the problem of expanding the contours of quarries on the surface, makes the task of technical and economic justification of the feasibility of switching to a combined method of mining at the final stage relevant. The relevance of the study is due to the need to increase the efficiency of opening of reserves of the mine field. Based on the analysis of global experience and trends in the development of opening schemes, a set of organizational and technical solutions has been proposed to improve the efficiency of opening the mine field. The main solutions include: dividing the mine field by height into opening stages, organizing a ventilation and assembly horizon with a group of short ventilation shafts in the quarry, and using a tunnel horizon to transport ore from the skip shaft to the quarry transfer point. For the conditions of combined development of the Bazhenovskoye chrysotile-asbestos deposit, an effective scheme for opening up the mine field reserves has been developed, which allows for minimizing the amount of capital investment during the construction of the mine and the amount of operating expenses during its operation, by maximizing the use of the mine space for opening purposes, including the extraction of ore to the surface.

Key words: steep deposit, low-value ores, combined mining, scheme of opening, mine field, economic and mathematical modeling, technical and economic indicators.

* Исследования выполнены в рамках Гос. задания №075-00410-25-00. № гос. рег. 125070908257-0.
Тема 1 (2025-2027). Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России (FUWE-2025-0001).



Введение

Разработка крупных крутопадающих месторождений малоценных руд (железорудных, асбестовых, апатитовых и др.) в Российской Федерации осуществляется преимущественно открытым способом [1]. Глубина многих карьеров приближается или уже достигла 500 – 600 м. Довольно часто карьеры вследствие значительных их размеров в плане расположены в окружении огромных отвалов, масштабной промышленной и жилой застройки [2, 3].

Исчерпание потенциала открытой геотехнологии, вызванное проблемой расширения контуров карьеров по поверхности, актуализирует задачу технико-экономического обоснования целесообразности перехода на завершающем этапе на комбинированный способ разработки, предусматривающий ведение открытых (ОГР) и подземных горных работ (ПГР) в пределах месторождения по взаимосвязанным технологическим схемам [4].

Известно, что подземный способ разработки месторождения значительно более затратный, чем открытый [5]. В связи с этим основной проблемой при переходе от ОГР к ПГР является обеспечение экономической эффективности подземного рудника с учетом этапа строительства. В значительной степени эффективность ПГР определяют технические решения по вскрытию запасов шахтного поля. Традиционные способы вскрытия с поверхности не позволяют обеспечить значительного снижения затрат и сроков строительства рудника [6]. Максимальное использование карьерного пространства для целей вскрытия, в том числе для выдачи руды на поверхность, является одним из основных направлений повышения эффективности вскрытия при комбинированной разработке.

Таким образом, изыскание и оценка возможных путей повышения эффективности вскрытия запасов шахтного поля при комбинированной разработке крупных крутопадающих месторождений (на примере Баженовского месторождения хризотил-асбеста), является актуальной научно-технической задачей.

Методы исследования

В работе использован комплексный метод исследований, включающий анализ и обобщение практики и теории вскрытия запасов шахтного поля при комбинированной разработке месторождений, конструирование, экономико-математическое моделирование и сравнительный анализ.

Результаты исследования

Основными факторами, влияющими на выбор способа и схемы вскрытия запасов шахтного поля при комбинированной разработке Баженовского месторождения, являются крутое падение рудных тел (в среднем 80°), значительные размеры шахтного поля (длина – 2720 м, ширина – 1240 м), глубина разработки (до 700 м) и годовая производственная мощность шахты (от 2 до 5 млн т/год), наличие отвалов по всему восточному борту карьера.

Анализ мировой практики вскрытия запасов вне контура карьера [7–12] в условиях, близких к условиям Баженовского месторождения, показал, что вскрытие вертикальными стволами с земной поверхности доминирует над другими способами, при этом главные и вспомогательные стволы, как правило, располагаются в центральной части шахтного поля, вентиляционные – на флангах, и проходят сразу на всю глубину разведанных запасов.

Современные схемы вскрытия предусматривают:

– применение наклонных съездов для доставки самоходного оборудования (СО) в шахту и его перемещения между основными горизонтами. Преимуществом данной схемы является максимальная приспособленность данного типа выработки для спуска



СО собственным ходом, возможность ускорения вскрытия и подготовки запасов к выемке;

– сооружение концентрационных горизонтов для локомотивной откатки руды с оборудованием у главного ствола дробильно-загрузочного комплекса. Преимуществом данной схемы является повышение эффективности подземного транспорта и обеспечение стабильности качества руды за счет управления рудопотоками и объемом аккумулирующих емкостей;

– увеличение высоты этажа до 100 м и расстояния между доставочными откаточными ортами до 160 м в соответствии с мировыми тенденциями увеличения параметров вскрытия [6, 12] с целью сокращения объемов горнокапитальных работ (ГКР).

С учетом имеющегося опыта и тенденций развития схем вскрытия предложен комплекс организационно-технических решений, направленных на снижение капитальных и эксплуатационных затрат на процессы, связанные со вскрытием, а также сокращение сроков строительства шахты (табл. 1).

Таблица 1

Пути повышения эффективности вскрытия при комбинированной разработке крупных крутопадающих месторождений

Цель	Организационно-технические решения
Снижение капитальных затрат на ГКР	<ul style="list-style-type: none">– использование карьерного пространства для заложения подземных вскрывающих выработок (наклонных съездов, штолен, вентиляционных восстающих);– уменьшение сечения вспомогательного (воздухоподающего) ствола за счет снижения количества воздуха, необходимого для проветривания шахты, путем использования СО на аккумуляторных батареях;– отказ от фланговых вентиляционных стволов за счет сооружения вентиляционно-сборочного горизонта с группой коротких вентиляционных восстающих в карьере
Сокращение сроков ввода в эксплуатацию	<ul style="list-style-type: none">– разделение шахтного поля по высоте на ярусы или очереди вскрытия;– использование наклонных съездов для вскрытия и подготовки запасов основных горизонтов в период строительства стволов;– применение высокопроизводительных комплексов СО при проходке горизонтальных, наклонных и вертикальных выработок
Уменьшение эксплуатационных затрат на подъем и транспортирование руды	<ul style="list-style-type: none">– оптимизация длины шахтного поля и величины шага вскрытия;– организация концентрационных горизонтов для локомотивной откатки руды;– использование штольневого горизонта для транспортирования руды от скрапового ствола до перегрузочного пункта в карьере;– расположение устья штольни вблизи существующего перегрузочного пункта

Для условий комбинированной разработки Баженовского месторождения разработаны варианты вскрытия запасов шахтного поля, отличающиеся по основному признаку – по степени использования карьера для целей вскрытия, по вспомогательным признакам – по числу этапов (очередей) вскрытия, схеме вентиляции и схеме транспорта руды:

1) с частичным использованием карьера для вспомогательных целей – одноэтапное вскрытие четырьмя вертикальными (скраповым, клетевым и фланговыми вентиляционными) стволами с поверхности с организацией одного концентрационного горизонта;

2) с полным использованием карьера, в том числе для выдачи руды на поверхность – многоэтапное вскрытие двумя вертикальными (скраповым и клетевым) стволами с поверхности и двумярудовыдачными штольнями из карьера с организацией вентиляционно-сборочного и двух концентрационных горизонтов.



В обоих вариантах основные вскрывающие выработки располагаются за зоной сдвижения горных пород. На проходческих и очистных работах применяются современные комплексы СО преимущественно на аккумуляторных батареях, что позволяет сократить потребное количество воздуха для проветривания шахты в 2–3 раза [13].

Схема одноэтапного вскрытия четырьмя вертикальными стволами с поверхности с организацией одного концентрационного горизонта (рис. 1) предусматривает строительство скипового ствола с поверхности на глубину 770 м для выдачи руды и загрязненного воздуха из шахты, клетевого ствола с поверхности на глубину 740 м для спуска – подъема людей, подачи свежего воздуха в шахту и выдачи породы из шахты, двух вентиляционных стволов с поверхности на глубину 720 м для выдачи загрязненного воздуха из шахты, двух наклонных съездов из карьера под углом 10° для спуска СО в шахту и выдачи породы из шахты, квершлагов и вентиляционных штреков на вентиляционном горизонте, квершлагов, доставочных (откаточных) штреков и ортов на эксплуатационных и концентрационном горизонтах, выработок околосвольных дворов и служебных камер (комплекс дробления и загрузки скипов, комплекс главного водоотлива, камеры обслуживания СО и др.).

Способ проветривания – нагнетательный. Схема проветривания: клетевой ствол – эксплуатационный горизонт – добычной блок – блоковый восстающий – вентиляционный (вышележащий) горизонт – вентиляционный ствол – поверхность.

Схема транспорта руды: блоковый рудоспуск – концентрационный горизонт (электровозный транспорт) – скиповской ствол – поверхность (автомобильный транспорт) – рудный склад обогатительной фабрики (ОФ). Высота подъема составляет 770 м. Средняя длина транспортирования по концентрационному горизонту – 2,5 км, по поверхности – 14 км.

Схема многоэтапного вскрытия двумя вертикальными стволами с поверхности и рудовыдачными штолнями из карьера с организацией вентиляционно-сборочного и двух концентрационных горизонтов (рис. 2) предусматривает на первом этапе проходку скипового ствола с поверхности на глубину 570 м для выдачи руды и загрязненного воздуха из шахты, клетевого ствола с поверхности на глубину 540 м для спуска – подъема людей, подачи свежего воздуха в шахту и выдачи породы из шахты, двух штollen из карьера для транспортирования руды от скипового ствола до перегружочного пункта в карьере, двух наклонных съездов из карьера под углом 10° для спуска СО в шахту и выдачи породы из шахты, вентиляционного штрека и шурфов на вентиляционно-сборочном горизонте для сбора и выдачи загрязненного воздуха из шахты, квершлагов, доставочных (откаточных) штреков и ортов на эксплуатационных и концентрационном горизонтах, лифтовых восстающих на флангах шахтного поля, выработка околосвольных дворов и служебных камер. На втором этапе производится углубка скипового и клетевого стволов на глубину 200 м, проходка наклонного съезда, квершлагов, доставочных (откаточных) штреков и ортов на эксплуатационных и концентрационном горизонтах, лифтовых восстающих, выработка околосвольных дворов и служебных камер.

Способ проветривания – нагнетательный. Схема проветривания: клетевой ствол – эксплуатационный горизонт – добычной блок – блоковый восстающий – вышележащий горизонт – лифтовый восстающий – вентиляционно-сборочный горизонт – вентиляционный шурф – карьер.

Схема транспорта руды: блоковый рудоспуск – концентрационный горизонт (электровозный транспорт) – скиповской ствол – транспортный горизонт (электровозный транспорт) – перегружочный пункт – карьер (локомотивный транспорт) – рудный склад ОФ. Средняя высота подъема составляет 550 м. Средняя длина транспортирования по концентрационному горизонту – 2,5 км, по транспортному горизонту – 1,2 км, по карьеру – 6,5 км.

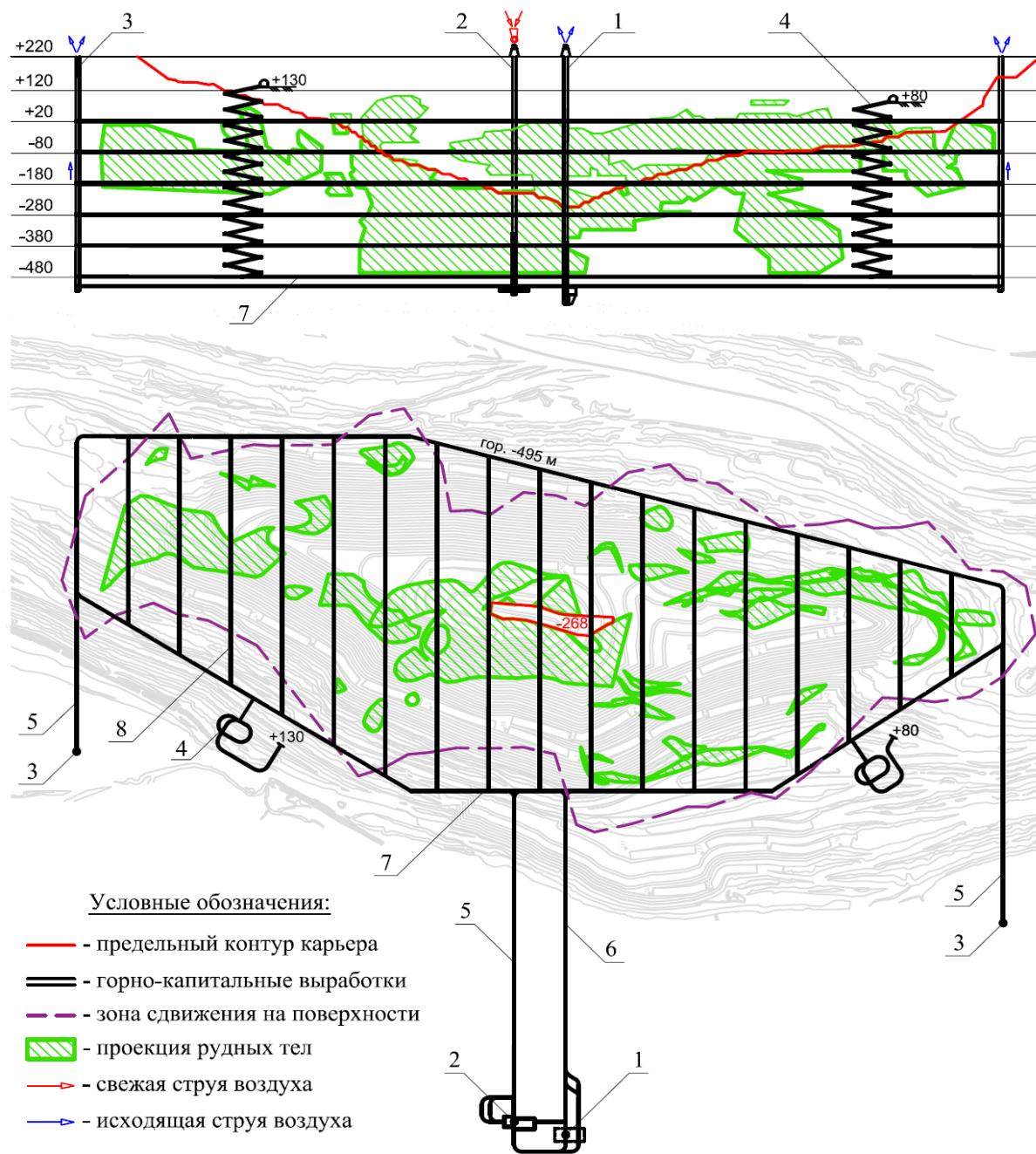


Рис. 1. Схема одноэтапного вскрытия четырьмя вертикальными стволами с поверхности с организацией одного концентрационного горизонта:

1 – скиповой ствол; 2 – клетевой ствол; 3 – вентиляционный ствол; 4 – наклонный съезд;
5 – вентиляционный квершлаг; 6 – откаточный квершлаг; 7 – откаточный штрек;
8 – откаточный орт

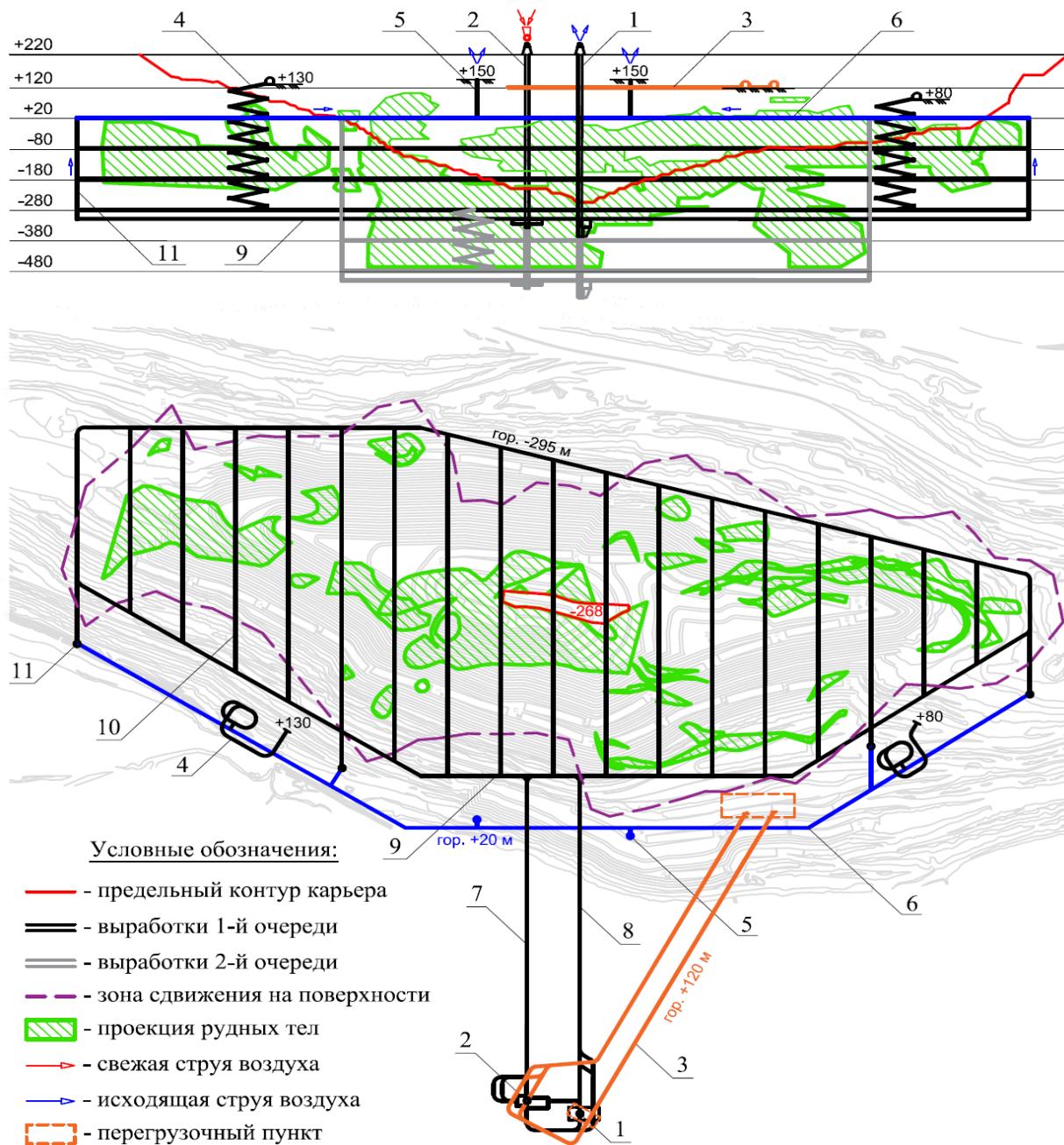


Рис. 2. Схема многоэтапного вскрытия двумя вертикальными стволами с поверхности и двумя рудовыдачными штольнями из карьера с организацией вентиляционно-сборочного и двух концентрационных горизонтов:
1 – скиповой ствол; 2 – клетевой ствол; 3 – транспортная штольня; 4 – наклонный съезд;
5 – вентиляционный шурф; 6 – вентиляционный штрек; 7 – вентиляционный квершлаг;
8 – откаточный квершлаг; 9 – откаточный штрек; 10 – откаточный орт;
11 – лифтовый восстающий

На основе экономико-математического моделирования (ЭММ) с использованием авторской методики и расчетной программы [12, 14 – 15] выполнена сравнительная оценка схем вскрытия по основным технико-экономическим показателям: срок строительства шахты, капитальные затраты на ГКР, эксплуатационные затраты на подъем и транспортирование руды в зависимости от производственной мощности шахты, изменяющейся от 2 до 5 млн т/год. Результаты ЭММ приведены на рис. 3.

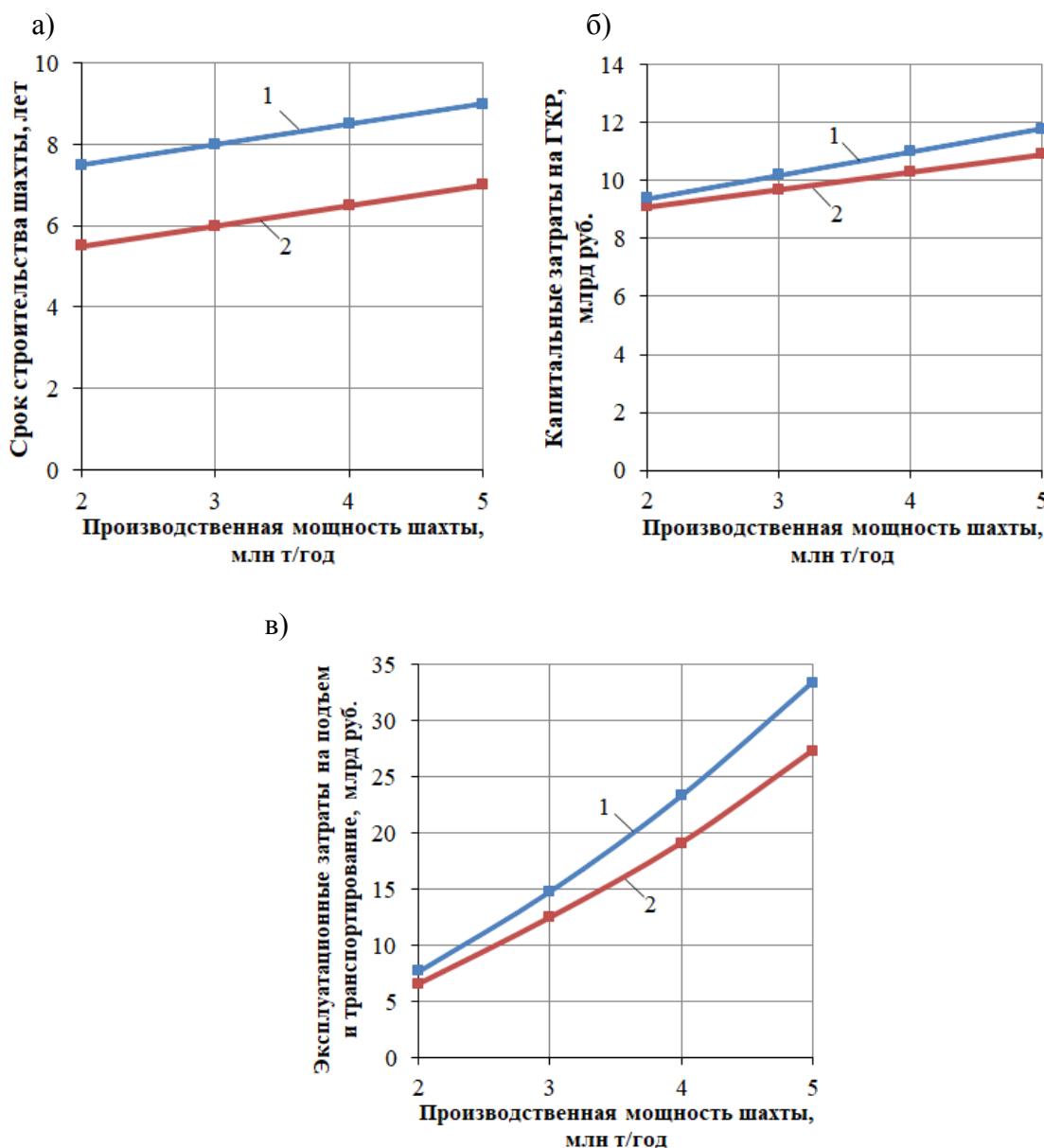


Рис. 3. Зависимости срока строительства шахты (а), капитальных затрат на ГКР (б), эксплуатационных затрат на подъем и транспортирование руды (в) от величины производственной мощности шахты:

- 1 – схема одноэтапного вскрытия вертикальными стволами с поверхности;
2 – схема многоэтапного вскрытия вертикальными стволами с поверхности и штолнями из карьера

В результате ЭММ установлено, что применение схемы многоэтапного вскрытия вертикальными стволами с поверхности и штолнями из карьера по сравнению со схемой одноэтапного вскрытия вертикальными стволами с поверхности обеспечивает:

– сокращение сроков строительства шахты на 28,6 – 36,4 % за счет отказа от фланговых вентиляционных стволов и квершлагов, уменьшения глубины скипового и клетевого стволов на 200 м;

– снижение капитальных затрат на ГКР на 3,5 – 8,3 % за счет сокращения объемов ГКР на 27–81 тыс. м³ вследствие замены фланговых вентиляционных стволов и квершлагов на выработки меньшего сечения и меньшей длины (вентиляционные шурфы, лифтовые восстающие, вентиляционные сбойки);



– снижение эксплуатационных затрат на подъем и транспортирование руды на 16,7–22,3 % за счет уменьшения средней высоты подъема на 220 м и сокращения среднего расстояния транспортирования до ОФ на 7,5 км.

Заключение

На основе анализа мирового опыта и тенденций развития схем вскрытия предложен комплекс организационно-технических решений, направленных на повышение эффективности вскрытия при комбинированной разработке крупных крутопадающих месторождений, основными из которых являются разделение шахтного поля по высоте на очереди вскрытия, организация вентиляционно-сборочного горизонта с группой коротких вентиляционных восстающих в карьер, использование штольневого горизонта для транспортирования руды от скипового ствола до перегрузочного пункта в карьере.

Для условий комбинированной разработки Баженовского месторождения хризотил-асбеста обоснована эффективная схема вскрытия запасов шахтного поля, позволяющая минимизировать объемы капитальных вложений при строительстве рудника и величину эксплуатационных расходов в период его эксплуатации за счет максимального использования карьерного пространства для целей вскрытия, в том числе для выдачи руды на поверхность.

Список литературы

1. Яковлев В.Л., Корнилков С. В., Соколов И.В., 2015. *Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья*; под ред. чл.-кор. РАН В.Л. Яковleva. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 360 с.
2. Калмыков В.Н., Гаврищев С.Е., Бурмистров К.В., Гоготин А.А., Петрова О.В., Томилина Н.Г., 2013. Обоснование рациональных вариантов перехода с открытого на подземный способ разработки месторождения «Малый Куйбас». *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 4, С. 132-139.
3. Леонтьев А.А., Белогородцев О.В., Громов Е.В., Казачков С.В., 2013. Вскрытие глубоких горизонтов карьера «Железный» Ковдорского ГОКа подземными выработками. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 4, С. 212-220.
4. Щелканов В.А., 1974. *Комбинированная разработка рудных месторождений*. Москва: Недра, 231 с.
5. Бурмистров К.В., Овсянников М.П., 2018. Обоснование параметров этапа открытых горных работ в переходные периоды разработки крутопадающих месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 6, С. 20-28.
6. Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., Барановский К.В., 2014. Об эффективности подземной разработки Тарыннахского и Горкитского железорудных месторождений. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*, № 3 (47), С. 5-11.
7. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Калмыков В.Н., 2003. *Комбинированная геотехнология*. Москва: Руда и металлы, 558 с.
8. Каплунов Д.Р., Юков В.А., 2007. *Геотехнология перехода от открытых к подземным горным работам*. Москва: Горная книга, 267 с.
9. Казикаев Д.М. 2008. *Комбинированная разработка рудных месторождений*. Москва: Горная книга, 361 с.
10. Демидов Ю.В., Звонарь А.Ю., 2009. Методические принципы проектирования схем вскрытия при комбинированной технологии разработки рудных месторождений. *Горный журнал*, № 6, С. 57-59.
11. Ивашов Н.А., 2007. Обоснование способов вскрытия запасов за предельным контуром карьеров. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*, № 1 (17), С. 9-13.



12. Соколов И. В., Антипин Ю. Г., Никитин И. В., 2021. *Методология выбора подземной геотехнологии при комбинированной разработке рудных месторождений*; под общ. ред. д-ра техн. наук И. В. Соколова. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 340 с.

13. Ильинов Н.Д., Мажитов А.М., Аллабердин А.Б., Важдаев К.В., 2021. Оптимизация схемы проветривания при увеличении производственной мощности подземного рудника. *Горная промышленность*, № 6, С. 89-93. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-6-89-93.

14. Никитин И.В., 2017. Оптимизация параметров вскрытия при подземной разработке подкарьерных запасов кимберлитового месторождения. *Проблемы недропользования*, № 1 (12), С. 21-28.

15. Никитин И.В., 2024. Исследование схем вскрытия подкарьерных запасов кимберлитовых месторождений. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 2, С. 262-274.

References

1. Yakovlev V.L., Kornilkov S. V., Sokolov I.V., 2015. Innovatsionnyi basis strategii kompleksnogo osvoeniya resursov mineral'nogo syr'ya [Innovative basis for the strategy of integrated development of mineral resources]; pod red. chl.-kor. RAN V.L. Yakovleva. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 360 p.
2. Kalmykov V.N., Gavrishev S.E., Burmistrov K.V., Gogotin A.A., Petrova O.V., Tomilina N.G., 2013. Obosnovanie ratsional'nykh variantov perekhoda s otkrytogo na podzemnyi sposob razrabotki mestorozhdeniya «Malyi Kuibas» [Substantiation of rational variations of the transition from the open to the underground mining method of the Maly Kuibas field]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 4, P. 132-139.
3. Leont'ev A.A., Belogorodtsev O.V., Gromov E.V., Kazachkov S.V., 2013. Vskrytie glubokikh gorizontov kar'era «ZHeleznyi» Kovdorskogo GOKa podzemnymi vyrabotkami [Opening of the deep horizons of the Zhelezny quarry of Kovdorsky GOK by underground workings]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 4, P. 212-220.
4. Shchelkanov V.A., 1974. Kombinirovannaya razrabotka rudnykh mestorozhdenii [Combined mining of ore deposits]. Moscow: Nedra, 231 p.
5. Burmistrov K.V., Ovsyannikov M.P., 2018. Obosnovanie parametrov etapa otkrytykh gornykh rabot v perekhodnye periody razrabotki krutopadayushchikh mestorozhdenii [Substantiation of parameters of the stage of open-pit mining in the transitional periods of development of declining deposits]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 6, P. 20-28.
6. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Baranovskii K.V., 2014. Ob effektivnosti podzemnoi razrabotki Tarynnakhskogo i Gorkitskogo zhelezorudnykh mestorozhdenii [On the effectiveness of underground mining of Tarynnakhsky and Gorkitsky iron ore deposits]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova*, № 3 (47), P. 5-11.
7. Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V., Kalmykov V.N., 2003. Kombinirovannaya geotekhnologiya [Combined Geotechnology], Moscow: Ruda i metally, 558 p.
8. Kaplunov D.R., Yukov V.A., 2007. Geotekhnologiya perekhoda ot otkrytykh k podzemnym gornym rabotam [Geotechnology of the transition from indoor to underground mining]. Moscow: Gornaya kniga, 267 p.



9. Kazikaev D.M. 2008. Kombinirovannaya razrabotka rudnykh mestorozhdenii [Combined mining of ore deposits]. Moscow: Gornaya kniga, 361 p.
10. Demidov Yu.V., Zvonar' A.Yu., 2009. Metodicheskie printsipy proektirovaniya skhem vskrytiya pri kombinirovannoj tekhnologii razrabotki rudnykh mestorozhdenii [Methodological principles of designing opening schemes for combined technology of ore deposits development]. Gornyi zhurnal, № 6, P. 57-59.
11. Ivashov N.A., 2007. Obosnovanie sposobov vskrytiya zapasov za predel'nym konturom kar'erov [Justification of the methods of opening reserves beyond the border contour of quarries]. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova, № 1 (17), P. 9-13.
12. Sokolov I. V., Antipin Yu. G., Nikitin I. V., 2021. Metodologiya vybora podzemnoi geotekhnologii pri kombinirovannoj razrabotke rudnykh mestorozhdenii [Methodology for the selection of underground geotechnology in the combined development of ore deposits]; pod obshch. red. d-ra tekhn. nauk I. V. Sokolova. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo universiteta, 340 p.
13. Il'inov N.D., Mazhitov A.M., Allaberdin A.B., Vazhdaev K.V., 2021. Optimizatsiya skhemy provetritvaniya pri uvelichenii proizvodstvennoi moshchnosti podzemnogo rudnika [Optimization of the ventilation scheme while increasing the production capacity of the underground mine]. Gornaya promyshlennost', № 6, P. 89-93. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-6-89-93.
14. Nikitin I.V., 2017. Optimizatsiya parametrov vskrytiya pri podzemnoi razrabotke podkar'ernykh zapasov kimberlitovogo mestorozhdeniya [Optimization of opening parameters during underground mining of sub-quarry reserves of kimberlite deposits]. Problemy nedropol'zovaniya, № 1 (12), P. 21-28.
15. Nikitin I.V., 2024. Issledovanie skhem vskrytiya podkar'ernykh zapasov kimberlitovykh mestorozhdenii [Investigation of schemes for opening sub-quarry reserves of kimberlite deposits]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle, № 2, P. 262-274.



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ПРИ ОСВОЕНИИ НЕДР**



УДК 622.235.674.3

Соколов Василий Владимирович
кандидат технических наук,
сектор устойчивости бортов карьеров,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: direct@igduran.ru, lubk_igd@mail.ru

Шимкив Екатерина Сергеевна
научный сотрудник,
сектор устойчивости бортов карьеров,
Институт горного дела УрО РАН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОВЕРХНОСТИ, СФОРМИРОВАННОЙ КОНТУРНЫМ ВЗРЫВАНИЕМ*

Аннотация:

В статье рассматриваются способы оценки качества контурного взрывания. Предлагается оценивать степень «гладкости» поверхностей, сформированных взрывными работами, с помощью фрактальной размерности и использовать данный показатель как критерий оценки контурного взрывания. В качестве объектов исследования использованы оцифрованные модели, полученные путем компьютерной обработки фотографий стенок горных выработок и откосов уступов. Приведена методика определения фрактальной размерности поверхности стенок горных выработок и откоса уступа карьера. Показано, что использование фрактальной размерности позволяет количественно оценить степень неровности поверхности горной выработки или откоса уступа карьера после производства контурного взрывания.

Ключевые слова: горные породы, горные выработки, контурное взрывание, поверхность откоса уступа, фрактальная размерность, массив, горные работы.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.04.066

Sokolov Vasily V.
Candidate of Technical Sciences,
Sector of stability of sides of quarries,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
58 Mamina-Sibiryaka Str.,
620075 Ekaterinburg
e-mail: direct@igduran.ru, lubk_igd@mail.ru

Shimkiv Ekaterina S.
Researcher,
Sector of stability of quarry boards,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS

USING FRACTAL DIMENSIONS TO EVALUATE THE SURFACE FORMED BY CONTOUR BLASTING

Abstract:

The article discusses ways to evaluate the quality of contour blasting. It is proposed to evaluate the degree of "smoothness" of the surfaces formed by blasting using fractal dimension and use this indicator as a criterion for evaluating contour blasting. Digitized models obtained by computer processing of photographs of the walls of mine workings and slopes of ledges were used as objects of research. A method for determining the fractal dimension of the surface of the walls of mine workings and the slope of the quarry ledge is presented. It is shown that the use of fractal dimension makes it possible to quantify the degree of unevenness of the mining surface or the slope of the quarry ledge after contour blasting.

Key words: rocks, mining operations, contour blasting, scarp slope surface, fractal dimension, massif, mining operations.

Введение

Массив, в котором ведутся горные работы, представляет собой измененную геологическую среду по сравнению с ее начальным состоянием. На устойчивость горных пород как в подземных, так и в открытых условиях влияет множество различных факторов (физико-механические свойства, трещиноватость, действующие напряжения, форма горной выработки или наклон откоса уступа, обводненность и т.д.).

В то же время ведение горных работ неотъемлемо связано с двумя ключевыми факторами – экономической целесообразностью и безопасностью ведения горных работ, поэтому этим вопросам уделяется большое внимание со стороны горнопромышленных предприятий.

* Статья подготовлена при выполнении Гос. задания №075-00410-25-00. № гос. рег. 125070908257-0. Тема 1 (2025-2027). Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России (FUWE-2025-0001).



Огромный ассортимент современной техники и технологий направлен на решение, по сути, единственной проблемы – безопасной и экономически выгодной добычи полезных ископаемых в сложных (неопределенных), меняющихся во времени условиях горного производства.

Известно, что технологические неровности контура горных выработок при ведении буровзрывных работ (БВР) оказывают на порядок большее влияние на величину концентрации напряжений, чем разница в проектной форме сечения выработок. Поэтому для снижения рисков обрушения выработок и уступов используется технология контурного взрыва, позволяющая максимально приблизить их форму к проектным размерам.

Использование технологии контурного взрыва для решения указанной проблемы позволяет не только максимально приблизить угол откоса уступа к предельному значению, но и снизить влияние взрыва на законтурное пространство, снижая нарушенность массива горных пород.

Следует отметить, что в случаях, когда угол откоса уступа превышает «предельный», то на некотором расстоянии от верхней бровки уступа формируется призма обрушения. В зависимости от размеров призмы с течением времени происходят осыпания горных пород. Процесс сдвижения продолжится до тех пор, пока угол наклона уступа не достигнет устойчивого положения. Общий объем обрушившихся пород с учетом объема обрушений на всех уступах борта карьера может достигать нескольких тысяч тонн. Данное обстоятельство не только затрудняет работу действующего предприятия с точки зрения безопасности, но и наносит экономический ущерб, связанный с необходимостью уборки обрушившихся пород.

При достаточно распространенном применении контурного взрыва (как для подземных, так и для открытых условий горного производства) оценка качества сводится к достаточно субъективным показателям. Так, согласно СП 122.13330.2023 «СНиП 32-04-97 Тоннели железнодорожные и автодорожные» эффективность контурного взрыва предлагается оценивать по следам шпурков на обнажившейся части грунта (не менее 75 %).

Другие показатели, применяемые в качестве критериев контурного взрыва, – величина отклонения контура выработки от линии между соседними шпурами (скважинами) [1] или оценка качества с помощью определения коэффициента излишка сечения горной выработки [2] – также не могут дать объективную, а главное, количественную оценку «гладкости» поверхности горных выработок.

В условиях ведения открытых горных работ часто возникает ситуация, когда требуется оценить качество контурного взрыва при отработке уступа карьера по результатам нескольких опытных взрывов с разными параметрами БВР. При этом оценка результатов контурного взрыва зачастую, за неимением других «инструментов», производится визуально. В случае, если результаты опытных взрывов визуально близки, оценка качества контурного взрыва осуществляется с некоторой долей субъективизма. Данное обстоятельство на практике может привести к ошибочному решению при оценке качества контурного взрыва, а следовательно, принимаемым неоптимальным параметрам БВР как с позиций безопасности, так и по экономическим потерям, связанным с необходимостью уборки и вывоза обрушившихся горных пород из-за недостаточной проработки уступа. Таким образом, задачей исследования является обоснование адекватного критерия, позволяющего оценить результаты контурного взрыва.

Методы исследований

В работе [2] обсуждается использование фрактальных характеристик линии контура горных выработок в качестве критерия оценки контурного взрыва. В то же время многочисленными исследованиями доказано, что фрактальная размерность может отра-



жать степень извилистости не только линейных, но и плоскостных или объемных объектов [3 – 6].

В основе определения фрактальной размерности линейного объекта длиной L положен закон Ричардсона [4]:

$$L(\delta) = \alpha \delta^\beta, \quad (1)$$

где α – некоторая константа; β – отрицательный показатель степени; δ – длина отрезков, на которые разбивается исходная линия L .

После преобразований закон Ричардсона выглядит следующим образом:

$$\log L = \beta \log \delta + \log \alpha, \quad (2)$$

где $\log \alpha = \text{const}$.

Тогда, пренебрегая константой, можно записать $\log L \sim \beta \cdot \log \delta$. С другой стороны,

$$\log L = \log[N(\delta) \cdot \delta] = \log N(\delta) + \log \delta, \quad (3)$$

где $N(\delta)$ – число отрезков длиной δ , покрывающих всю линию.

Из уравнений (2) и (3) следует:

$$\log N(\delta) \cong \beta \log \delta - \log \delta = (\beta - 1) \cdot \log \delta \quad (4)$$

Впервые понятие дробной размерности ввел Феликс Хаусдорф в 1919 г. Позднее, в 1975 г., Бенуа Мандельброт назвал объекты с дробной размерностью d_f фракталами.

В соответствии с размерностью Хаусдорфа [4]:

$$N(\delta) \cong 1/\delta^{d_H}, \quad (5)$$

следовательно,

$$\log N(\delta) \sim -d_H \cdot \log \delta. \quad (6)$$

Тогда из уравнений (4) и (6) получим

$$\beta - 1 = -d_H. \quad (7)$$

Принято, что при классическом описании линейных объектов их топологическая размерность d равна 1, плоскостных – $d=2$, объемных – $d=3$. Поскольку в уравнении (1) $\beta < 0$, то размерность Хаусдорфа d_H строго больше топологической размерности d , в соответствии с определением Мандельброта, такие объекты являются фракталами.

Определяя фрактальную размерность объекта, можно оценить степень его неровности (изломанности). И в этом качестве фрактальная размерность может служить надежным количественным показателем при оценке результатов контурного взрывания.

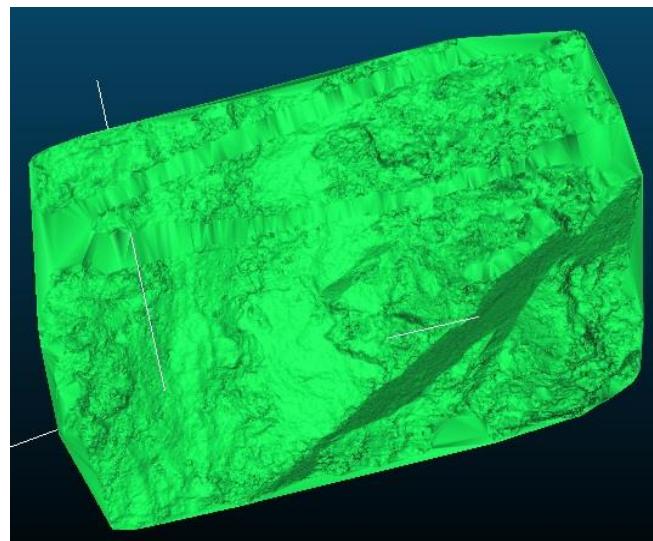
Результаты исследований

В качестве объектов исследования использованы оцифрованные модели, полученные путем компьютерной обработки фотографий сотрудниками ИГД УрО РАН с различных месторождений. Модель стенки горной выработки создана на основе фотографий с месторождения «Бозымчак» (Киргизия), модель поверхности откоса уступа карьера – на основе фотографий с месторождения «Волковское» (Волковский ГОК) (рис. 1).

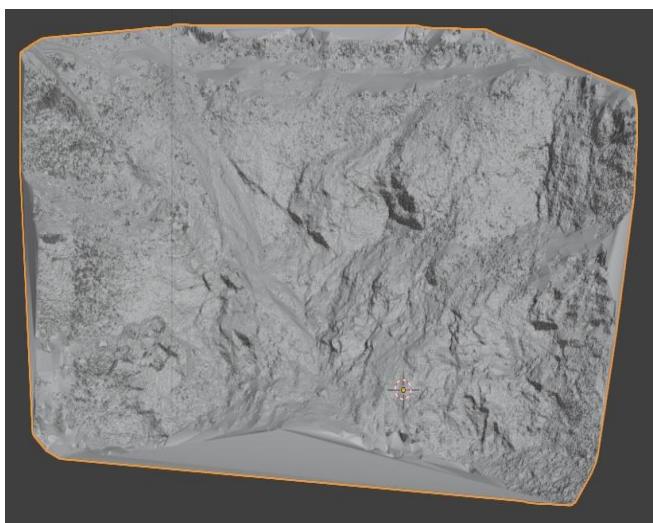
Основное положение фрактальной геометрии состоит в том, что если бесконечно изломанные и, следовательно, нигде не дифференцируемые кривые инвариантны к масштабным преобразованиям, то они обладают дробной размерностью, строго большей топологической размерности.

С учетом вышеизложенного, в случае природных фракталов (типа поверхности стенки горной выработки или поверхности откоса уступа) фрактальная размерность должна оцениваться в диапазоне от 2 до 3.

На практике фрактальная размерность обычно определяется методом покрытия (box-counting method), однако могут быть использованы и другие способы [5 – 10].



а)



б)

Рис. 1. Оцифрованные модели:
а) стенки горной выработки (месторождение «Бозымчак»);
б) откоса уступа карьера (месторождение «Волковское»)

Классическая процедура определения фрактальной размерности поверхности методом покрытия заключается в следующем. На измеряемую поверхность наносится кубическая сетка с размером ячейки ε . Подсчитывается минимальное количество кубов, покрывающих данную поверхность $N(\varepsilon)$. Фрактальная размерность определяется из соотношения Минковского [11]:

$$d_f = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)}, \quad (8)$$

где $N(\varepsilon)$ – минимальное количество элементов, необходимых для полного покрытия поверхности при масштабе ε .

Поскольку исследованный диапазон изменения превышений (от 1 до 0,001 м) ис-следуемых поверхностей значительный, то для более точного определения неровности поверхностей покрытие рекомендуется производить параллелепипедами. С целью повы-шения точности определения фрактальной размерности (извилистости поверхности) по-верхность стенки горной выработки на месторождении «Бозымчак» покрывалась сеткой



из 11 277 180 точек, а поверхность откоса уступа – сеткой из 10 138 550 точек.

Следует отметить, что расчет фрактальной размерности методом покрытия с сеткой, охватывающей более десяти миллионов точек – это достаточно трудоемкая задача. Для автоматизации процесса расчета сотрудниками ИГД УрО РАН была разработана специальная компьютерная программа, позволяющая произвести расчет автоматически. Порядок выполненных расчетов можно представить в следующем виде:

1. На вход программы подается матрица координат сетки точек, покрывающих поверхность.

2. По минимальным и максимальным координатам матрицы определяются минимальные и максимальные размеры призм покрытия. В нашем случае размеры призм автоматически равномерно распределялись на логарифмической шкале между максимальными и минимальными значениями координат (в случае необходимости они могут быть определены графически (рис. 2 – 3) по формуле $\varepsilon = e^{-x}$, где $x = \log(1/\varepsilon)$ – значение по оси абсцисс).

3. Задается количество «розыгрышей» – вариантов размеров призм, покрывающих исследуемую поверхность (для конкретного расчета $n = 10$, см. точки на рис. 2, 3).

4. Определяется минимальное число призм N (размера ε), необходимых для полного покрытия поверхности. Вычисления повторяются в зависимости от установленного числа «розыгрышей», при этом на каждом этапе вычислений размер (масштаб) призм покрытия уменьшается.

5. Вычисленные значения наносятся на график $\log N = f(\log(1/\varepsilon))$ (см. рис. 2 – 3), угол наклона линии регрессии определит показатель фрактальной размерности d_f (см. рис. 2, 3).

Согласно расчетам, фрактальная размерность стенки горной выработки составила 2,074 (см. рис. 2), а поверхности откоса уступа – 2,206 (см. рис. 3).

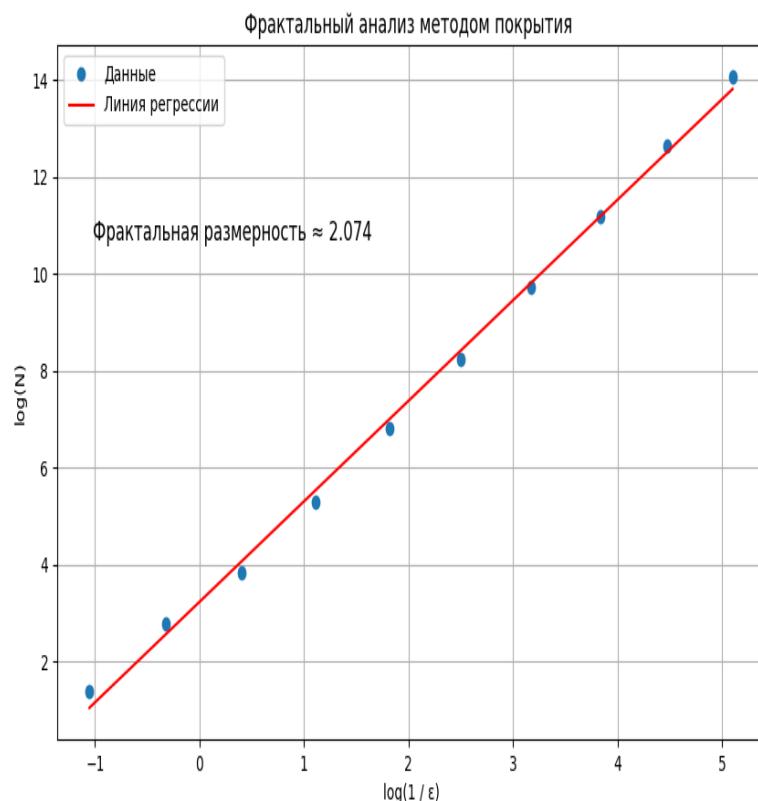


Рис. 2. График уравнения (8) для оцифрованной модели поверхности стенки горной выработки (месторождение «Бозымчак»)

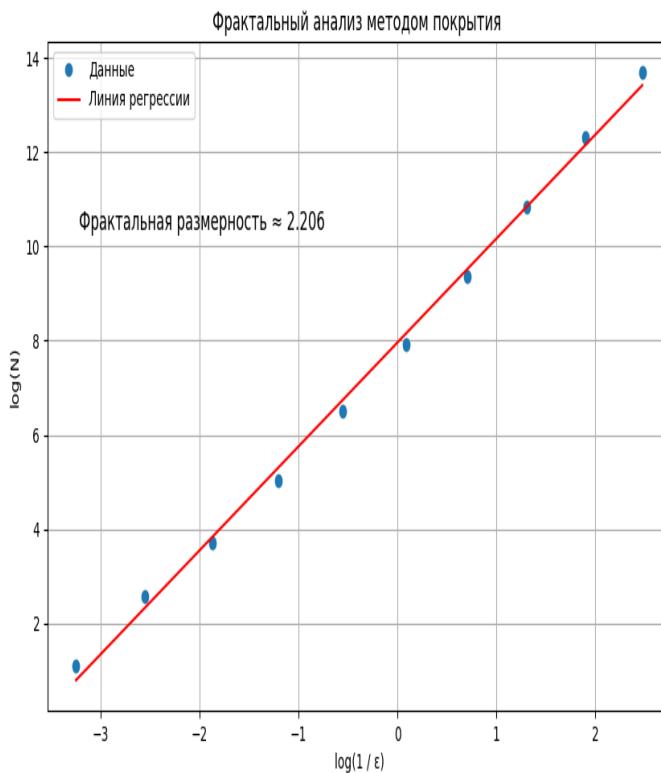


Рис. 3. График уравнения (8) для оцифрованной модели поверхности откоса уступа карьера (месторождение «Волковское»)

Результаты вычислений показывают, что фрактальная размерность, определенная по оцифрованным моделям стенки горной выработки и поверхности уступа, отражает неровности этих поверхностей. При сравнении результатов значение фрактальной размерности стенки горной выработки значительно меньше, чем у поверхности уступа. Данное обстоятельство подтверждает адекватность оценки степени неровности поверхности фрактальной размерностью, поскольку использование метода шпуровых зарядов является более «ювелирным» инструментом при придании формы контура горной выработке или уступу карьера по сравнению с методом скважинных зарядов. Поверхность при шпуровой отбойке будет значительно «глаже», что отражается в результатах расчетов.

Известно, что на устойчивость горных пород влияет большое количество различных факторов, поэтому оценивать качество взрывов по результату единичных взрывов достаточно проблематично. Несколько взрывов с одними и теми же параметрами БВР могут показать достаточно различные результаты. Для объективного анализа результатов контурного взрывания необходима серия взрывов. Использование фрактальной размерности для оценки результатов контурного взрывания позволит оценить результаты как каждого испытания, так и серии в целом при условии использования математического аппарата и исключения доли субъективизма. В этом смысле фрактальная размерность будет являться количественным показателем сформированной поверхности выработки или откоса уступа. Однако предложенная методика оценки гладкости поверхности, сформированной при контурном взрывании с помощью вычисленной фрактальной размерности, не позволяет оценить изменение свойств массива горных пород.

Главной задачей методики является устранение доли субъективизма при оценке качества контурного взрывания. Доля изменчивости свойств массива может быть косвенно оценена путем сравнения средних фрактальных размерностей серии испытаний. В этом случае средняя фрактальная размерность будет отражать среднюю степень изменчивости массива, это позволит получить более объективную информацию о параметрах контурного взрывания в зависимости от нарушенности пород.



Выходы

1. Фрактальная размерность, определенная на основе оцифрованных моделей, позволяет количественно оценить неровности поверхности как стенок горной выработки, так и поверхности откоса уступа.
2. Использование фрактальной размерности в качестве критерия оценки «гладкости» поверхностей горных выработок (как подземных, так и открытых) предоставляет накопленную информацию, являющуюся основой для баз данных о сформированных в результате контурного взрывания поверхностях и для анализа вариативных свойств массива горных пород.
3. Средняя фрактальная размерность будет отражать среднюю степень изменчивости массива и при условии накопления и анализа данных во времени позволит получить более объективную информацию о параметрах контурного взрывания и влиянии БВР в зависимости от нарушенности пород.

Список литературы

1. Петрушин А.Г., Лещуков Н.Н., 2005. Оценка эффективности метода контурного взрывания при проведении выработок в скальных трещиноватых породах. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 4, С. 93-96.
2. Латышев О.Г., Прищепа Д.В., 2018. Анализ фрактальных характеристик геометрии горных выработок для оценки качества контурного взрывания. *Горные науки и технологии*, № 3, С. 26-34. DOI 10.17073/2500-0632-2018-3-26-34.
3. Соколов В.В., Франц В.В., Яковлев А.В., 2025. Фрактальный анализ структуры поверхностей трещин. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 5, С. 48-57. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-5-48-57.
4. Mandelbrot B., 2021. *The fractal geometry of nature*. New York: Echo Point Books & Media, LLC, 490 p.
5. Имашев С.А., Чешев М.Е., 2021. Оценка фрактальной размерности поверхности разрушения образцов горных пород. *Геоинформатика*, № 1, С. 36–44.
6. Сулейманова Л.А., Рябчевский И.С., 2023. Фрактальная размерность формы пор ячеистого бетона. *Университетская наука*, № 2(16), С. 68–70.
7. Feder J., 2013. *Fractals*. NY: Springer, 284 p. DOI: 10.1007/978-1-4899-2124-6
8. Слётков Д.В., Хлебников В.В., Зубаков А.П., 2021. Методы вычисления фрактальной размерности изображений. *Наукосфера*, № 3-2, С. 173–180.
9. Маматов Э.У., Ташполотов Ы., Ибраимов Т.К., 2022. Исследование микрорельефа (фрактальные свойства) поверхности кристаллов базальтовых пород Кызыл-Кийского месторождения КР. *Вестник Ошского государственного университета*, № 1, С. 205–213.
10. Осипов И.С., Сынбулатов В.В., Карасев К.А., 2009. Исследование фрактальной размерности трещин в горных породах. *ГИАБ*, № 1, С. 150–156.
11. Richard M., 1995. *Crownover. Introduction to fractals and chaos*. Boston: Jones and Bartlett Publishers, Inc., 320 p.

References

1. Petrushin A.G., Leshchukov N.N., 2005. Otsenka effektivnosti metoda konturnogo vzryvaniya pri provedenii vyrabotok v skal'nykh treshchinovatykh porodakh . [Evaluation of the effectiveness of the contour blasting method during excavation in rocky fractured rocks]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal, № 4, P. 93-96.
2. Latyshev O.G., Prishchepa D.V., 2018. Analiz fraktal'nykh kharakteristik geometrii gornykh vyrabotok dlya otsenki kachestva konturnogo vzryvaniya [Analysis of fractal characteristics of the geometry of mine workings to assess the quality of contour blasting]. Gornye nauki i tekhnologii, № 3, P. 26-34. DOI 10.17073/2500-0632-2018-3-26-34.



3. Sokolov V.V., Frants V.V., Yakovlev A.V., 2025. Fraktal'nyi analiz struktury poverkhnostei treshchin. [Fractal analysis of the structure of crack surfaces]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii . Gornyi zhurnal, № 5, P. 48–57. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-5-48-57.
4. Mandelbrot B., 2021. The fractal geometry of nature. New York: Echo Point Books & Media, LLC, 490 p
5. Imashev S.A., CHeshev M.E., 2021. Otsenka fraktal'noi razmernosti poverkhnosti razrusheniya obraztsov gornykh porod [Assessment of the fractal dimension of the fracture surface of rock samples]. Geoinformatika, № 1, P. 36–44.
6. Suleimanova L.A., Ryabchevskii I.S., 2023. Fraktal'naya razmernost' formy por yacheistogo betona . [Fractal dimension of the shape of pores of cellular concrete]. Universitetskaya nauka, № 2(16), P. 68–70.
7. Feder J., 2013. Fractals. NY: Springer, 284 p. DOI: 10.1007/978-1-4899-2124-6
8. Sletkov D.V., KHlebnikov V.V., Zubakov A.P. 2021. Metody vychisleniya fraktal'noi razmernosti izobrazhenii [Methods for calculating the fractal dimension of images]. Naukosfera, № 3-2, P. 173–180.
9. Mamatov E.U., Tashpolotov Y., Ibraimov T.K., 2022. Issledovanie mikrorel'efa (fraktal'nye svoistva) poverkhnosti kristallov bazal'tovykh porod Kyzyl-Kiiskogo mestorozhdeniya KR . [Investigation of the microrelief (fractal properties) of the crystals' surface of basalt rocks of the Kyzyl-Kiy deposit, Kyrgyz Republic]. Vestnik Oshskogo gosudarstvennogo universiteta, № 1, P. 205–213.
10. Osipov I.S., Synbulatov V.V., Karasev K.A., 2009. Issledovanie fraktal'noi razmernosti treshchin v gornykh porodakh [Investigation of the fractal dimension of cracks in rocks]. GIAB, № 1, P. 150–156.
11. Richard M., 1995. Crownover. Introduction to fractals and chaos. Boston: Jones and Bartlett Publishers, Inc., 320 p.



**ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ПРИ ОСВОЕНИИ НЕДР**



УДК 622.83:53.08

Усанова Анна Витальевна

научный сотрудник,
отдел геомеханики,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: anne.usanova@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ В СЛОЖНЫХ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ*

Аннотация:

В статье проводится детальный анализ проблемы установки реперов наблюдательной станции, расположенной на Промежуточном карьере золоторудного месторождения «Муртыкты». Исследование акцентирует внимание на сложности геологических и ландшафтных условий, включающих густую растительность и значительные перепады высот, что существенно ограничивает возможности размещения профильных линий в полном объеме.

Для оптимизации процесса мониторинга и повышения точности и надежности измерений предлагаются комплекс мер, направленных на улучшение методов закладки и контроля реперов. Эти меры позволяют не только оптимизировать процесс закладки реперов, но и значительно повысить точность и надежность данных, получаемых в ходе мониторинга сдвижения на наблюдательной станции. Таким образом, предложенные подходы способствуют повышению общей эффективности геотехнического контроля и минимизации рисков, связанных с возможными деформациями земной поверхности.

Ключевые слова: массив горных пород, сдвижение, деформации, наблюдательная станция, устойчивость бортов карьера, сложный рельеф.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.04.075

Usanova Anna V.

Researcher,
Geomechanics Department,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
58 Mamina-Sibiryaka Str.,
620075 Ekaterinburg,
e-mail: anne.usanova@gmail.com

FEATURES OF ORGANIZING AN OBSERVATION STATION IN COMPLEX GEOMORPHOLOGICAL CONDITIONS

Abstract:

This article provides a detailed analysis of the installation of benchmarks at a monitoring station located at the Promezhutochny quarry of the Murtykty gold deposit. The study emphasizes the complexity of geological and landscape conditions, including dense vegetation and significant elevation changes, which significantly limit the ability to fully deploy profile lines.

To optimize the monitoring process and improve the accuracy and reliability of measurements, a set of measures is proposed to improve benchmark installation and monitoring methods. These measures will not only optimize the benchmark installation process but also significantly improve the accuracy and reliability of data obtained during displacement monitoring at the monitoring station. Thus, the proposed approaches contribute to improving the overall effectiveness of geotechnical monitoring and minimizing the risks associated with potential ground deformation.

Key words: rock massif, displacement, deformation, observation station, quarry wall stability, complex relief.

Введение

Золоторудное месторождение «Муртыкты», известное с 1890 г., расположено на Восточном склоне Южного Урала. В административном отношении месторождение находится в центральной части Учалинского района Республики Башкортостан, в 30 км севернее г. Учалы (рис. 1). Также в 1890 г. была открыта Западная зона под названием «Ильинская жила», в последующие годы в пределах месторождения открыты новые рудные зоны: Ик-Давлят (1912 г.), Восточная (1931 г.) и Промежуточная (1969 г.) [1, 2].

Исследуемый участок, а именно Промежуточная рудная зона, находится в лесной зоне и характеризуется грядово-сопочным рельефом. Рельеф очень изменчивый, холмистый. Преобладающие отметки местности от 440 до 480 м.

* Работа выполнена в рамках Гос. задания №075-00410-25-00 (FUWE-2025-0003),
рег. № 123012300007-7.

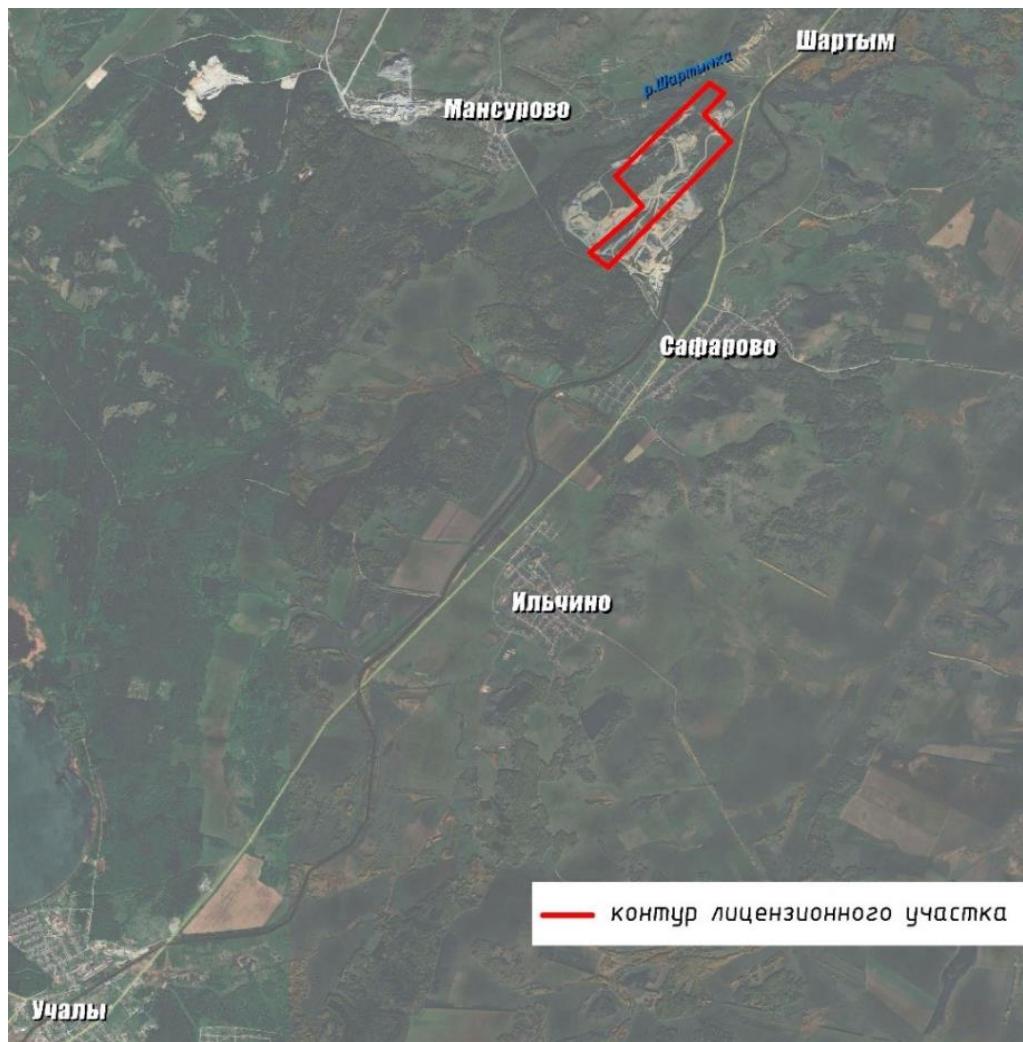


Рис. 1. Обзорная карта района

Чтобы обеспечить своевременный контроль состояния подрабатываемой поверхности и объектов инфраструктуры, находящихся в зоне влияния подработки, зафиксировать динамику изменений деформаций, оседаний, обеспечить оперативное выявление превышений от нормативных значений и снижение рисков аварийных ситуаций, организуются наблюдательные станции [3].

Проект наблюдательной станции

В рамках технического задания предусмотрена комплексная реализация проекта наблюдательной станции для Промежуточного карьера, включающая разработку проектной документации и последующее оборудование станции. Наблюдательная станция создается с учетом горно-геологических условий и параметров занимаемой территории. При инструментальном маркшейдерском мониторинге опорные реперы наблюдательной станции должны быть расположены за пределами зоны сдвижения, которая определяется исходя из высоты и особенностей деформирования бортов карьеров, разрезов и откосов отвалов в соответствии с таблицей 2 ФНИП [4]. Для конкретных условий – полное отсутствие неблагоприятных поверхностей ослабления, либо поверхности ослабления направлены под углами $-5^\circ < \beta < -60^\circ$, размер зоны сдвижения составляет $1,5H$, где H – глубина карьера, которая составляет 90 м, таким образом, размер зоны сдвижения составляет 135 м.

Реперы наблюдательной станции закладывают по прямым линиям, ориентированным, как правило, по простиранию и вкrest простирания рудных тел и выходящим за пределы ожидаемых границ сдвижения. Количество линий должно быть не менее двух вкrest простирания и одной по простиранию. Профильные линии состоят из опорных и рабочих реперов. В зависимости от фактической ситуации на местности допускается расположение опорных реперов только на одном конце линии или закладка линий без опорных реперов в увязке их со смежными линиями. При выносе проекта наблюдательной станции в натуру допускается корректировка местоположения реперов профильных линий в зависимости от текущих условий на местности. Фактические места закладки реперов выбираются таким образом, чтобы обеспечить их продолжительную сохранность [5, 6].

В рамках проекта наблюдательная станция на Промежуточном карьере включает 5 профильных линий (Iп, IIп, II^aп, IIIп, III^aп). Всего на Промежуточном карьере предполагалось установить 35 реперов с протяженностью профильных линий в 1075 м. Расстояние между опорными реперами 100 м, между рабочими реперами – около 30 м. Опорные реперы закладывают на концах линий вне зоны влияния горных разработок, то есть за пределами мульды сдвижения. Рабочие реперы располагаются в зоне вредного влияния горных работ (рис.2). В процессе анализа имеющихся данных было выявлено, что в пределах мульды сдвижения располагаются охраняемые объекты III категории. К числу таких объектов относятся три высоковольтные линии электропередачи (ЛЭП), транспортные съезды и дорога местного значения (табл.1).

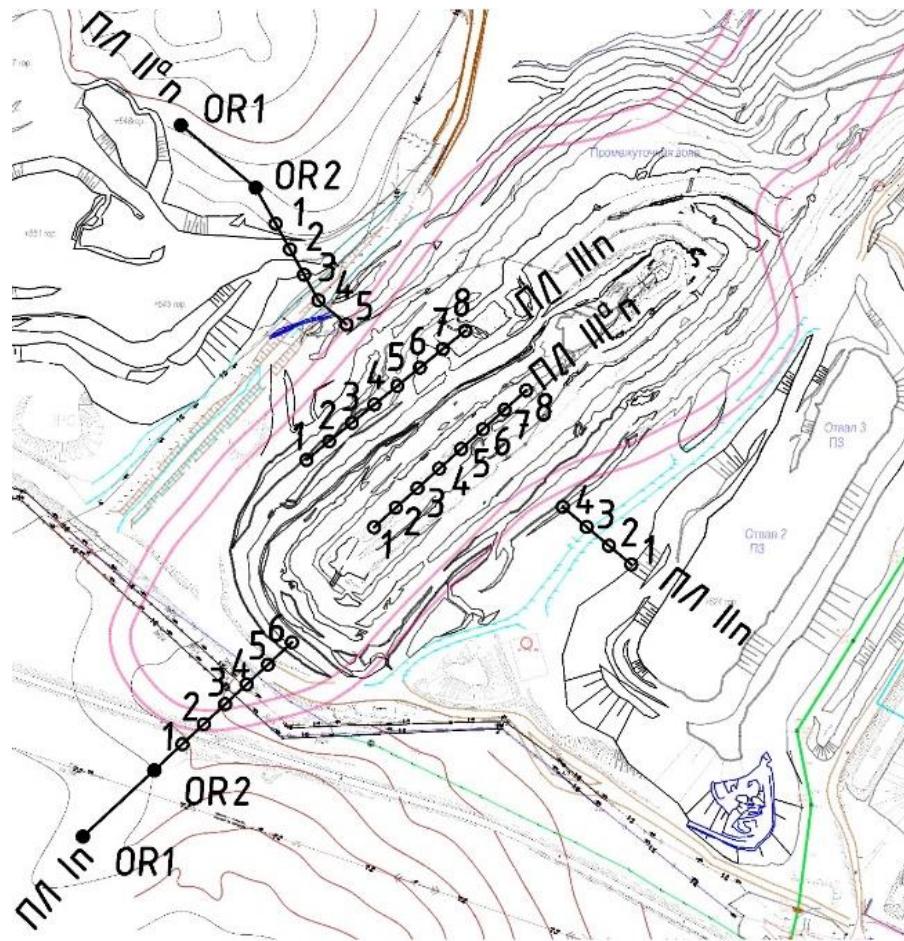


Рис. 2. Схема конструкции проектируемой наблюдательной станции на Промежуточном карьере



Таблица 1

**Характеристика проектной наблюдательной станции
на поверхности месторождения «Муртыкты»**

№ линии	Количество реперов			Расстояние между		Общая длина линии, м	Расположение линии относительно подземных горных работ	Охраняемые объекты
	рабо- чих	опор- ных	всего	рабо- чими	опор- ными			
Промежуточный карьер								
Iп	6	2	8	30 – 40	100	293	южный фланг месторождения по линии простирания	асфальти- рованная дорога местного значения, 3 высоко- вольтные линии
IIп	4	–	4	30 – 32	–	92	юго-восточный фланг месторождения вкрест линии простирания	
II ^a п	5	2	7	30 – 40	100	270	юго-западный фланг месторождения вкрест линии простирания	
IIIп	8	–	8	30	–	210	южный фланг месторождения, отклонение по часовой стрелке на 10° от оси простирания	транспорт- ный съезд
III ^a п	8	–	8	30	–	210	южный фланг месторождения, отклонение по часовой стрелке на 8° от оси простирания	транспорт- ный съезд
Всего	31	4	35			1075		

Корректировка станции с учетом осложняющих факторов

В процессе проведения выездного обследования и реализации проекта были выявлены значительные технические и природные трудности, существенно усложнившие выполнение запланированных мероприятий и требующие корректировки проектной документации. В частности, необходимо учитывать неблагоприятные условия для установки реперов наблюдательной станции, что может негативно повлиять на точность геодезических измерений и, как следствие, на эффективность всей системы мониторинга. Кроме того, произошло изменение числа охраняемых объектов, что определяет необхо-

димость адаптации проектного решения с целью обеспечения требуемого уровня контроля.

Факторы, оказавшие влияние на реализацию проекта:

- **Рельеф местности и уклон поверхности:** значительные перепады высот (отметки варьируются от 420 до 550 м) и сложный холмистый рельеф – создавали препятствия для прокладки профильных линий и установки реперов, особенно на участках с крутым уклоном (прибрежная территория с восточного и южного флангов). Высота отвалов, располагающихся вблизи верхней бровки карьера, достигает 40 м.
- **Инфраструктура и техногенные объекты:** наличие технологических дорог, насыпей и других инженерных сооружений ограничивало доступ к целевым участкам для закладки реперов, требуя дополнительных логистических и технических решений.
- **Технологические изменения контуров отвалов:** динамика изменения контуров отвалов, связанная с геологическими факторами, не позволила осуществить установку реперов в соответствии с исходными проектными решениями.
- **Антropогенный фактор и природная растительность:** густая растительность и наличие антропогенных объектов усложняли проведение полевых работ по закладке реперов.

В связи с особенностями рельефа местности и другими осложняющими факторами, фактическая конфигурация станции включает лишь 4 профильные линии с 17 реперами.



Рис. 3. Промежуточный карьер, выходы подземных горных выработок на поверхность

Профильная линия Iп состоит из 2 рабочих реперов – заложена по простиранию зоны рудных тел, она контролирует процесс сдвижения на южном борту карьера и съезд в штольню. Профильная линия IIп состоит из 2 рабочих реперов – заложена вкрест простирания рудного тела, контролирует деформации массива горных пород над выездом с горизонта 395 м и процесс деформаций в подошвенной части породного отвала № 2 (рис. 3). На профильных линиях Iп и IIп располагаются новые объекты охраны – выходы подземных горных выработок на поверхность, которые также относятся к III категории. Профильная линия II^aп включает в себя 7 реперов, из них 2 опорных – располагается вкрест простирания рудной залежи. Начало профильной линии заложено у верхней бровки карьера, где происходит процесс обрушения бортов от глинистых отложений. Профильная линия IIIп состоит из 6 рабочих реперов – заложена на недействующем транспортном съезде. Съезд закрыт из-за начавшейся деформации борта вследствие отработки подземной камеры. Пятый и шестой реперы профильной линии располагаются непосредственно над локальным обрушением борта (рис. 4, табл. 2).

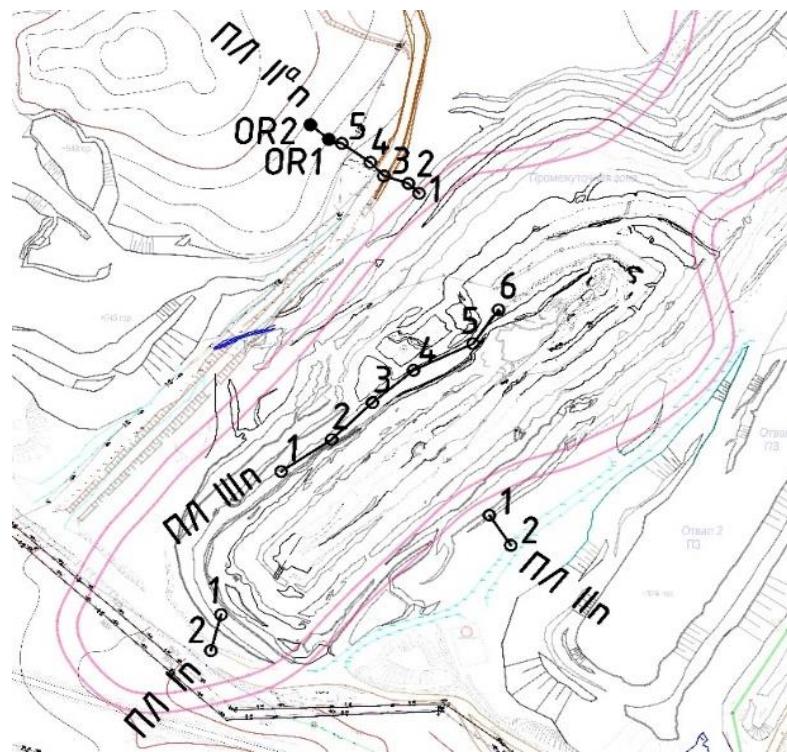


Рис. 4. Схема конструкции фактической наблюдательной станции на Промежуточном карьере

Таблица 2
Характеристика фактической наблюдательной станции на поверхности
месторождения «Муртыкты»

№ линии	Количество реперов			Расстояние между		Общая длина линии, м	Расположение линии относительно подземных горных работ	Охраняемые объекты
	рабо- чих	опор- ных	всего	рабо- чими	опор- ными			
Промежуточный карьер								
Iп	2	—	2	41	—	41	южный фланг месторождения по линии про- стирания	съезд в штолнию на южном борту
IIп	2	—	2	40	—	40	юго-восточный фланг место- рождения вкрест линии простирания	выезд из штолни с горизонта -395 м
II ^a п	5	2	7	16 – 36	26	140	юго-западный фланг место- рождения вкрест линии простирания	в/в ЛЭП
IIIп	6	—	6	46 – 69	—	293	южный фланг месторождения, отклонение по часовой стрелке на 10° от оси простирания	транспорт- ный съезд
Всего	15	2	17			514		



Рис. 5. Промежуточный карьер, вид с южного фланга

Влияние неблагоприятных условий на точность мониторинга

Ограничение числа реперов и их неравномерное распределение в условиях сложного рельефа может негативно сказаться на точности и полноте получаемых данных [7]. Снижение плотности наблюдательной сети увеличивает вероятность пропусков локальных сдвигов и снижает общую информативность мониторинга. В условиях, когда реперы размещены с недостаточным интервалом, возникает риск недооценки масштабов и характера деформаций, что может привести к некорректным выводам и ошибочным решениям [8, 9].

Рекомендации по оптимизации мониторинга в сложных условиях

С целью повышения эффективности мониторинга процесса сдвижения в зонах с неблагоприятными условиями следует учитывать особенности местности и применять специализированные методы установки реперов [10]. Для соответствия проекта нормативным требованиям необходимо:

- провести детальный геоморфологический и топографический анализ района для определения оптимальных мест размещения реперов с учетом уклона, растительности и инфраструктуры;
- использовать современные геоинформационные технологии, такие как БПЛА, методы GNSS и лазерное сканирование, для точного определения координат реперов и минимизации погрешностей;
- разработать адаптивные методики закладки реперов, учитывающие местные природные и техногенные условия, что позволит минимизировать влияние неблагоприятных факторов;
- внедрить систему регулярного мониторинга состояния реперов, включая их техническое обслуживание и корректировку при выявлении деформаций или смещений;
- рассмотреть возможность дополнения наблюдательной станции новыми профильными линиями или дозакладкой дополнительных опорных реперов на существующих линиях.



Заключение

Несмотря на возникшие технические и природные трудности, проведенный анализ подтверждает важность и необходимость создания наблюдательной станции для мониторинга состояния подрабатываемой поверхности и охраняемых объектов в Промежуточной рудной зоне (рис. 5). Заложенные профильные линии позволяют достичь поставленных целей, включая оперативное выявление начальных признаков деформационных процессов и непрерывное наблюдение за всеми стадиями изменения геометрии бортов, а также своевременный контроль за состоянием объектов охраны в зоне влияния подработки, что является критически важным для обеспечения безопасности производственной деятельности.

Для достижения максимальной точности и полноты данных необходимо учитывать местные геоморфологические и геотехнические условия, а также применять специализированные методики работы. Комплексный подход к реализации проекта позволит значительно повысить эффективность мониторинга и обеспечить безопасность горных работ.

Автор выражает благодарность за помощь в создании статьи Усанову С.В.

Список литературы

1. Знаменский С.Е., 2016. Геолого-структурная позиция золото-сульфидного месторождения Муртыкты (южный Урал). *Вестник академии наук РБ*, Том 21, № 3 (83).
2. Салихов Д.Н., Ковалев С.Г., Беликова Г.И., Бердников П.Г., 2003. *Полезные ископаемые Республики Башкортостан (золото)*. Часть 1. Уфа: «Экология», 222 с.
3. Викторов С.Д., Гончаров С.А., Иофис М.А., Закалинский В.М., 2019. *Механика сдвижения и разрушения горных пород*. Отв. ред. акад. Трубецкой К.Н. Москва: РАН, 360 с.
4. *ФНПП в области промышленной безопасности "Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов"*. № 439 от 13.11.2020 г. URL: <https://tk-expert.ru/uploads/files/ntd/ntd-809-20210108-191105.pdf> (дата обращения 10.12.2025)
5. *Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений ВНИМИ*, 1988. ВНИПИгорцветмет. Москва: Недра, 112 с.
6. *Инструкция по безопасному ведению горных работ при комбинированной (совмещенной) разработке рудных инерудных месторождений полезных ископаемых*. РД 06-174-97, 2011. Серия 06. Выпуск 4. 2-е изд. Москва: ЗАО «НТИ ПБ», 28 с.
7. Усанов С.В., Усанова А.В., 2017. Мониторинг сдвижения поверхности при ликвидации и затоплении горных выработок Лебяжинского месторождения. *Горный журнал*, № 1, С. 18-22.
8. Усанов С.В., Коновалова Ю.П., Ефремов Е.Ю., Харисова О.Д., Усанова А.В., 2022. Внезапные деформационные процессы в горном массиве при недропользовании: факторы проявления и возможности предупреждения. *Горная промышленность*, № S1, С. 111-118.
9. Хоружая Н.В., Доценко О.Г., 2019. Сравнение методики наблюдений за оседаниями земной поверхности с помощью традиционной и короткой наблюдательных станций. *Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ»*, №14 (57), С. 28-33.
10. Усанов С.В., Усанова А.В., 2021. Исследование обрушений грунта над неглубокой заброшенной шахтой для определения геотехнических условий индивидуального строительства. *Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов*, Т. 332, № 8, С. 168-176.



References

1. Znamenskii S.E., 2016. Geologo-strukturnaya pozitsiya zoloto-sul'fidnogo mestorozhdeniya Murtykty (yuzhnyi Ural) [Geological and structural position of the Murtykty gold-sulfide deposit (Southern Urals)]. Vestnik akademii nauk RB, Vol. 21, № 3 (83).
2. Salikhov D.N., Kovalev S.G., Belikova G.I., Berdnikov P.G., 2003. Poleznye iskopaemye respubliki Bashkortostan (zoloto) chast' 1 [Useful minerals of the Republic of Bashkortostan (gold) part 1]. Ufa: «Ekologiya», 222 p.
3. Viktorov S.D., Goncharov S.A., Iofis M.A., Zakalinskii V.M., 2019. Mekhanika svizheniya i razrusheniya gornykh porod [Mechanics of rock shear and fracture]. Otv. red. akad. Trubetskoi K.N. Moscow: RAN, 360 p.
4. FNIP v oblasti promyshlennoi bezopasnosti "Pravila obespecheniya ustoichivosti bortov i ustupov kar'erov, razrezov i otkosov otvalov" [Federal Scientific and Industrial Regulations in Industrial Safety "Rules for Ensuring the Stability of Quarry Slopes, Open Pits, and Dump Slopes"]. № 439 ot 13.11.2020 g. URL: <https://tk-expert.ru/uploads/files/ntd/ntd-809-20210108-191105.pdf> (data obrashcheniya 10.12.2025)
5. Instruktsiya po nablyudeniyam za svizheniem gornykh porod i zemnoi poverkhnosti pri podzemnoi razrabotke rudnykh mestorozhdenii VNIMI, 1988 [Instructions for Monitoring Rock and Earth Surface Movements during Underground Mining of Ore Deposits, VNIMI, 1988]. VNIPiGortsvetmet. Moscow: Nedra. 112 p.
6. Instruktsiya po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot pri kombinirovannoj (sovmeshchennoi) razrabotke rudnykh i nerudnykh mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh [Instructions for the Safe Conduct of Mining Operations during Combined (Combined) Development of Ore and Non-Metallic Mineral Deposits]. RD 06-174-97, 2011. Seriya 06. Vypusk 4. 2-e izd. Moscow: ZAO «NTTS PB», 28 p.
7. Usanov S.V., Usanova A.V., 2017. Monitoring svizheniya poverkhnosti pri likvidatsii i zatoplenii gornykh vyrabotok Lebyazhinskogo mestorozhdeniya. [Monitoring surface displacement during liquidation and flooding of mine workings at the Lebyazhinskoje deposit]. Gornyi zhurnal, № 1, P. 18-22.
8. Usanov S.V., Konovalova Yu.P., Efremov E.Yu., Kharisova O.D., Usanova A.V., 2022. Vnezapnye deformatsionnye protsessy v gornom massive pri nedropol'zovanii: faktory proyavleniya i vozmozhnosti preduprezhdeniya [Sudden deformation processes in rock mass during subsoil use: factors of manifestation and possibilities of prevention]. Gornaya promyshlennost', № S1, P. 111-118.
9. Khoruzhaya N.V., Dotsenko O.G., 2019. Sravnenie metodiki nablyudenii za osedaniyami zemnoi poverkhnosti s pomoshch'yu traditsionnoi i korotkoi nablyudatel'nykh stantsii [Comparison of the methodology for observing land surface subsidence using traditional and short observation stations]. Sbornik nauchnykh trudov GOU VPO LNR «DonGTU», №14 (57), P. 28-33.
10. Usanov S.V., Usanova A.V., 2021. Issledovanie obrushenii grunta nad ne-glubokoi zabroshennoi shakhtoi dlya opredeleniya geotekhnicheskikh uslovii individual'nogo stroitel'stva [Study of soil collapses above a shallow abandoned mine to determine geotechnical conditions for individual construction]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov, Vol. 332, № 8, P. 168-176.



УДК 622.235.6:550.83

Григорьев Данила Вячеславович
научный сотрудник,
лаборатория технологии снижения
риска катастроф при недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: danielging@gmail.com

Веденников Андрей Сергеевич
научный сотрудник,
лаборатория технологии снижения
риска катастроф при недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: avedernikov@igduran.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ*

Аннотация:

В статье рассматриваются исследования по применению сейсморазведки для разработки методики оптимизации параметров буровзрывных работ. Приведены теоретические основы для перехода от скоростей упругих волн к физико-механическим характеристикам горных пород, слагающих блоки, запланированные для рудоподготовки. Приведены результаты практического опытного применения методики в карьере Качканарского месторождения, показан переход от разрезов скоростей продольной и поперечной волн к коэффициенту Пуассона, а затем и к прочности на одноосное сжатие. Сделаны выводы о перспективах применения на производстве.

Ключевые слова: сейсморазведка, скорость упругих волн, коэффициент Пуассона, прочность пород, буровзрывные работы.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.04.084

Grigoriev Danila V.
Researcher,
Laboratory of technology reducing
the risk of disasters in subsurface use,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
58 Mamina-Sibiryaka Str.,
620075 Ekaterinburg
e-mail: danielging@gmail.com

Vedernikov Andrey S.
Researcher,
Laboratory of technology reducing
the risk of disasters in subsurface use,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: avedernikov@igduran.ru

APPLICATION STUDIES ON SEISMIC SURVEYS FOR DEVELOPMENT OF METHODS TO OPTIMIZE THE PARAMETERS OF DRILLING AND BLASTING OPERATIONS

Abstract:

The article deals with research on the use of seismic exploration to develop methods for optimizing drilling and blasting parameters. It provides the theoretical basis for the transition from elastic wave velocities to the physical and mechanical characteristics of the rocks in the blocks planned for ore preparation. The results of practical experimental application of the methodology in the pit of the Kachkanar deposit are presented, showing the transition from primary and shear wave velocity sections to Poisson's ratio, and then to uniaxial compressive strength. Conclusions are made about the prospects for industrial application.

Key words: seismic survey, elastic wave velocity, Poisson's ratio, rock strength, drilling and blasting operations.

Введение

Взрывные работы играют ключевую роль в эффективном извлечении ценных ресурсов из недр земли: угля, металлических руд, строительного щебня и других материалов. С помощью взрывных работ можно быстро и эффективно разрушать горные породы и тем самым создавать условия для последующего извлечения полезных ископаемых.

В настоящее время основным видом добычи полезных ископаемых в мире является открытый способ, с помощью которого в России добывается около 90 % железных руд, 60 % руд цветных металлов и угля [1].

Количество взрывов для рудоподготовки на открыто разрабатываемых горных предприятиях Урала может измеряться сотнями и тысячами в год. И их количество только растет, как растут и требования к качеству проводимых работ. Зачастую бурение

* Работа выполнена в рамках Гос. задания №075-00410-25-00. Г.р. № 1022040300093-0-1.5.1.

Тема 3 (2025-2027). Выявление закономерностей развития геодинамических процессов в условиях техногенного преобразования недр и разработка мер по повышению безопасности горного производства (FUWE-2025-0003).



ведется по осредненным параметрам для всего карьера или его большого участка, вследствие чего результат взрыва бывает неоптимальным как количественно, так и качественно: негабаритные куски руды, несоответствие запланированным объемам и прочее [2].

Основная идея данных исследований – определение параметров буровзрывных работ (БВР) на основе уточненной информации о прочностных свойствах массива горных пород, получаемой по данным геофизических сейсморазведочных работ.

Информация о распределении структурных неоднородностей в границах выемочного блока, подготовленного для взрыва, может быть использована для проектирования БВР: для расчета оптимальных параметров бурения скважин, выбора типа и количества ВВ для достижения необходимого результата и пр. [3, 4].

В дополнении к информации о строении блока в разрабатываемой методике предлагаются использовать и физико-механические (прочностные) параметры, что позволит более полно и точно спланировать БВР, что приведет к улучшению качества отработки исследуемого участка.

Материалы и методы

Физической основой для использования сейсмических методов с целью оценки прочностных свойств горных пород является наличие их достаточно тесной связи с сейсмическими характеристиками.

Исходными данными для расчета являются полученные в результате сейсморазведочных работ разрезы скоростей продольных и поперечных волн, плотность горных пород, априорная геологическая информация.

Сейсморазведка в целом основана на изучении распространения в среде упругих волн, возбуждаемых чаще всего искусственным путем. Упругие волны распространяются во всех направлениях от места их возбуждения и проникают на большую глубину в толщу земной коры.

Под упругими характеристиками среды понимают показатели, определяемые линейным законом связи между напряжениями и деформациями (законом Гука) и характеризующие особенности ее упругого (обратимого) деформирования. Упругие свойства однородной изотропной среды полностью определяются значениями модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Для характеристики упругих свойств среды используют также модуль сдвига и модуль всестороннего сжатия [5, 6].

Представление об однородной изотропной идеально упругой среде с тем или иным приближением можно распространить на горные породы, в соответствии с чем перечисленные модули широко применяются для описания упругих свойств пород [7].

На представлениях линейной теории упругости базируется и теория распространения сейсмических волн.

Скорость продольных волн определяется по формуле:

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{3}{4}G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}},$$

скорость поперечных волн определяется по формуле:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\mu)}},$$

где K – модуль всестороннего сжатия, ГПа,

G – модуль сдвига, МПа;

E – модуль Юнга, ГПа;

μ – коэффициент Пуассона;

ρ – плотность, г/см³.



Расчет коэффициента Пуассона выполняется по формуле

$$\mu = \frac{Vp^2 - 2Vs^2}{2(Vp^2 - Vs^2)},$$

расчет модуля сдвига:

$$G = \rho \cdot Vs^2,$$

расчет модуля Юнга:

$$E = \rho \cdot Vs^2 \frac{3Vp^2 - 4Vs^2}{Vp^2 - Vs^2},$$

расчет модуля всестороннего сжатия:

$$K = \rho \cdot (Vp^2 - \frac{4}{3}Vs^2).$$

Связь предела прочности на одноосное сжатие и скоростей распространения продольных и поперечных волн выражается в виде формулы

$$\sigma_{cжс} = \frac{Vp^2 \cdot \rho(1 - 2\mu)}{2C(1 - \mu)},$$

где коэффициент C зависит от состава пород [8].

Опытные работы выполнялись на Качканарском железорудном месторождении, расположенном на восточном склоне Среднего Урала, в пределах одноименного интрузивного массива и включающем два месторождения – Гусевогорское и собственно Качканарское. Месторождение находится по восточному склону горы Качканар, в западном крыле Тагильского мегасинклиория.

Качканарский интрузивный массив сложен в основном перidotитами, пироксенитами и в меньшей степени габбро. Общая площадь массива – около 110 км². Руды вкрапленные, комплексные. Главные рудные минералы: титаномагнетит, ильменит, второстепенные – минералы платиновой группы, хрома и др.

Содержание железа в рудах 16 – 17 %. Кроме железа, руды содержат ванадий (около 80 % в титаномагнетите), извлекаемый попутно. Месторождение разрабатывается открытым способом. Руда добывается из пяти карьеров.

С учетом объемов выполняемых работ по рудоподготовке, в первую очередь БВР, всегда актуален вопрос оптимизации этих процессов.

Экспериментальные исследования по проверке методики оптимизации параметров БВР на основе результатов сейсморазведки в условиях Качканарского месторождения выполнялись в карьере Северный Качканарского ГОКа, северо-восточный борт, нижние горизонты.

Основная задача состояла в проверке работоспособности методики сбора полевого материала сейсморазведки в условиях карьера.

При выполнении экспериментальных сейсморазведочных исследований применялась разработанная и изготовленная авторами буксируемая сейсморазведочная коса. В таком исполнении стандартные сейсмоприемники и сейсмокосы крепятся на гибкую стропу (рис. 1). Сами сейсмоприемники в таком варианте не выгибаются на каждой установке в почву, а прикреплены к «салазкам», которые за счет своего значительного веса обеспечивают надежную передачу упругих колебаний [9].

Затем, при переходе на следующую расстановку, такая коса просто протягивается по прямой вдоль профиля на необходимое количество каналов (рис. 2, 3). Для улучшения соотношения сигнал/помеха, особенно в условиях действующего карьера, использовалось накопление сигнала (многократные записи на каждой расстановке).

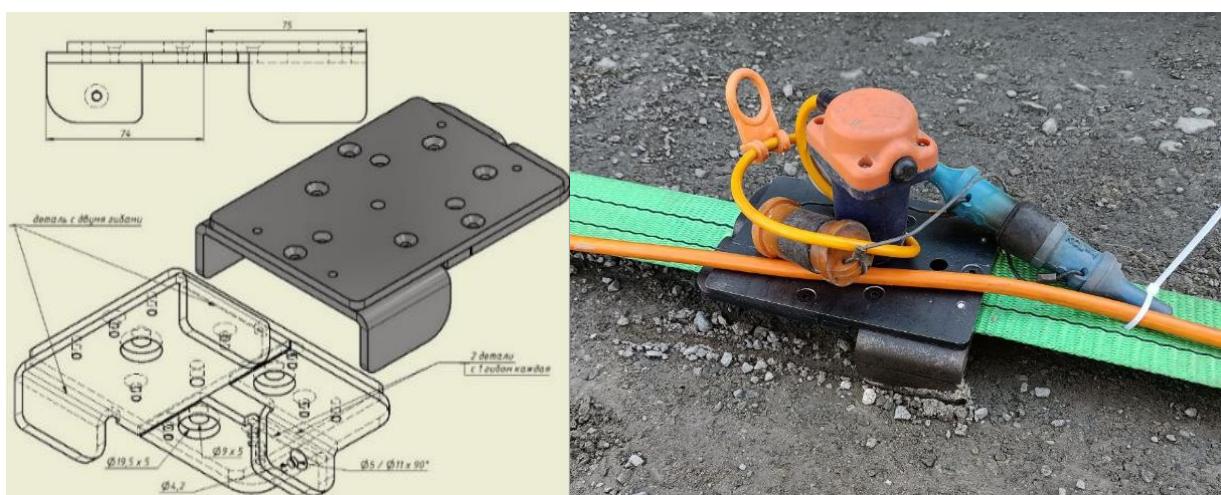


Рис. 1. Салазки и буксируемая сейсморазведочная коса в сборе

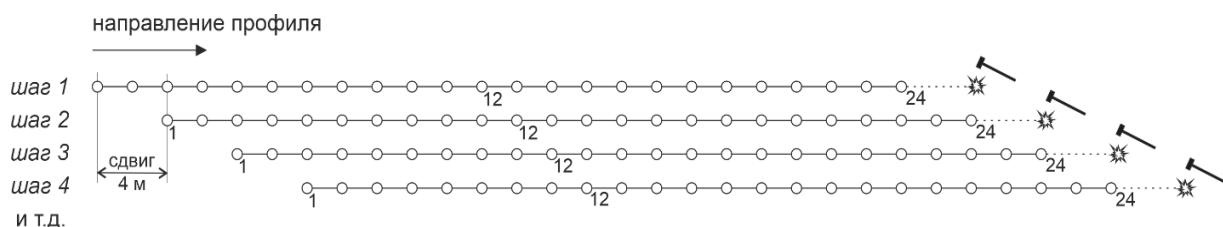


Рис. 2. Схема работы с буксируемой сейсморазведочной косой



Рис. 3. Расстановка буксируемой косы

Использование буксируемой сейсмической косы позволяет

- повысить производительность полевых работ;
- увеличить детальность за счет рассмотрения цельного длинного профиля;
- производить исследования методом отраженных волн МОВ-ОСТ малоканальной сейсмостанцией (24 канала);
- обрабатывать полевой материал по методам: а) МПВ на продольных волнах с получением скоростного разреза продольных волн V_p ; б) MASW-CMPCC с получением

скоростного разреза поперечных волн V_s ; в) МОВ-ОСТ с получением временного разреза отраженных продольных волн;

– как следствие, упрощает расчет на глубину распределения отношения V_s/V_p , коэффициента Пуассона, модуля сдвига, модуля упругости [10].

Результаты исследований

В ходе экспериментальных исследований пройден профиль сейсморазведки длиной 156 м, с числом точек удара 40, шаг между сейсмоприемниками 2 м, шаг смещения расстановки сейсмоприемников и точек удара составил 4 м. Число активных каналов сейсмостанции – 24, длина расстановки составила 46 м, буксировка косы осуществлялась вручную либо автомобилем. Время, затраченное непосредственно на получение полевого материала, составило 2 ч. В результате полевое исследование взрываемого блока с помощью сейсморазведки составит до 1 рабочего дня.

Качество полевого материала получилось хорошее, отчетливо выделяются интересующие нас типы волн для использования скоростного анализа, помехи от карьерной техники оказались на приемлемом уровне.

Последующая обработка служила для оценки качества, выявления особенностей в полевом материале, оценке шумов, выводов о перспективности данного подхода.

Были построены скоростные разрезы по продольным (рис. 4) и поперечным (рис. 5) волнам. На разрезе продольных волн отчетливо выделяются две зоны снижения их скоростей. Предположительно они связаны с особенностями распространения систем трещин на данном участке, возникших при отработке предыдущего блока.

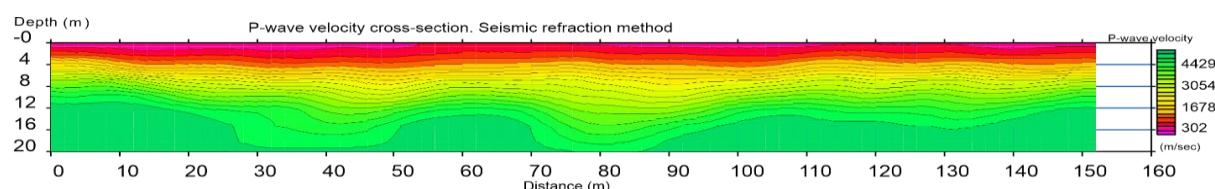


Рис. 4. Скоростной разрез продольных волн V_p в пределах исследуемого участка

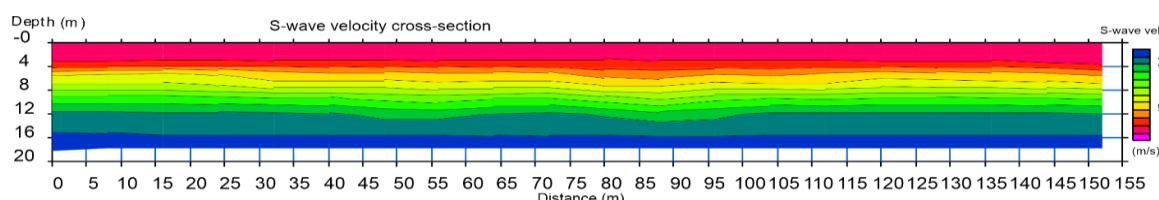


Рис. 5. Скоростной разрез поперечных волн V_s в пределах исследуемого участка

Из разрезов продольных и поперечных скоростей был построен разрез распределения коэффициента Пуассона (рис. 6), на нем выделяются два участка аномально низких значений, совпадающих с участками снижения скоростей продольных волн. На следующем этапе исследований запланировано определение физико-механических свойств пород, слагающих массив, с целью однозначной интерпретации данных аномалий.

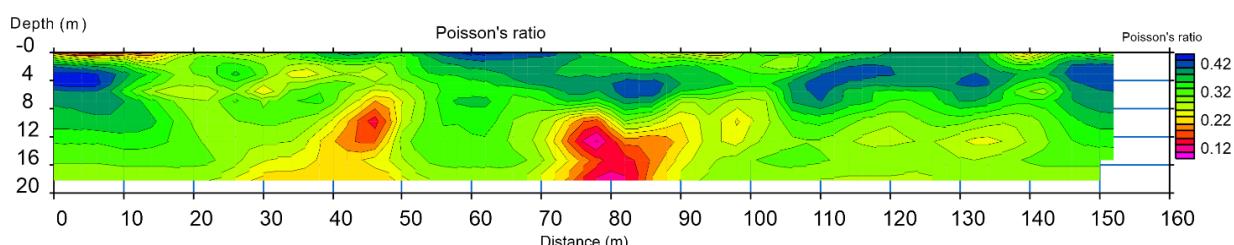


Рис. 6. Распределение значений коэффициента Пуассона в пределах исследуемого участка

В данном исследовании был пройден один профиль. При выполнении исследований двумя и более параллельными профилями появляется возможность оценить направления распространения систем трещин, а также построения псевдо-3D-разрезов.

На основании скоростных разрезов и коэффициента Пуассона по формуле (1) вычислен и построен разрез предела прочности на одноосное сжатие. Плотность пород принята постоянной $3,5 \text{ г}/\text{см}^3$. Степень нарушенности массива четко отслеживается в значениях предела прочности на одноосное сжатие (МПа). Данный разрез демонстрирует возможности перехода от результатов сейсморазведки в прочностные характеристики массива (рис. 7).

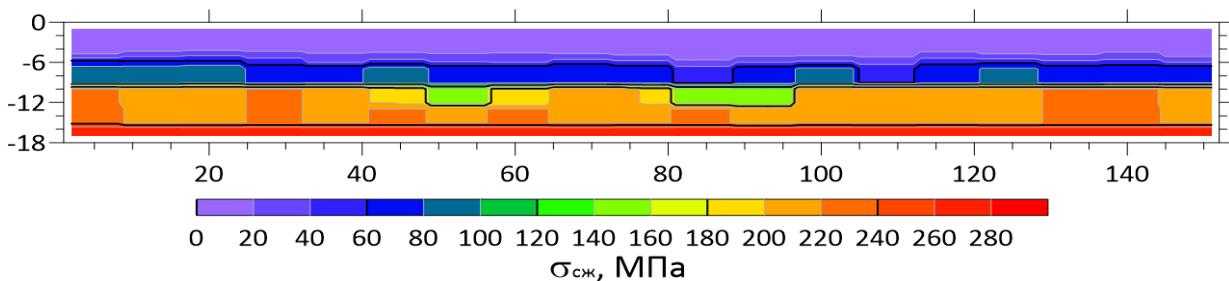


Рис. 7. Разрез предела прочности на одноосное сжатие (МПа) в пределах исследуемого участка горного массива

Исходя из результатов аналитических и экспериментальных исследований, разработана методика выполнения сейсморазведочных исследований для оптимизации параметров БВР, состоящая из следующих этапов:

1. Полевые работы с применением буксируемой сейсмической косы (оптимизированный способ по сравнению с конвенциональным).
2. Обработка полевого материала сейсморазведки по методике МПВ с получением разрезов скоростей продольных волн V_p .
3. Обработка полевого материала сейсморазведки по методике MASW-СМРСС с получением разрезов скоростей поперечных волн V_s .
4. Расчет упругих характеристик горных пород в пределах выемочного блока. Расчет прочностных характеристик (предела прочности на сжатие и растяжение).
5. Расчет параметров БВР с учетом результатов сейсморазведки.

Разрезы наглядно демонстрируют пространственную изменчивость прочности массива и упругости пород, что является критически важной информацией для проектирования БВР.

Таким образом, разрабатываемая методика, сочетающая аналитический алгоритм перехода от сейсмических характеристик к прочностным в сочетании с эффективной технологией полевых измерений, является научно обоснованным и практически реализуемым инструментом. Ее внедрение позволяет перейти от усредненного проектирования БВР к дифференциальному и оптимальному выбору параметров бурения и взрывания, учитывающему реальную неоднородность горного массива в границах выемочного блока. Это открывает путь к повышению эффективности взрыва, снижению себестоимости и улучшению контроля над результатами БВР.

Список литературы

1. Трубецкой К.Н., Рыльникова М.В., 2015. Состояние и перспективы развития открытых горных работ в XXI веке. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 45-1, С. 21-32.
2. Берсенев Г.П., Жариков С.Н., Реготунов А.С., Кутуев В.А., 2022. Результаты исследования технологического развития буровзрывных работ на карьерах Уральского региона. *Проблемы недропользования*, № 3(34), С. 43-54.



3. Казаков Н.Н., Викторов С.Д., Шляпин А.В., Лапиков И.Н., 2020. *Дробление горных пород взрывом в карьерах: монография*. Под научной редакцией академика К.Н. Трубецкого. Москва: РАН, 519 с.
4. Клочко И.И., Манжос Ю.В., Касьяненко Д.Л., 2025. Влияние условий инициирования зарядов ВВ на эффективность дробления горных пород. *Труды РАНИМИ*, № 6(44), С. 41-50.
5. Яновская Т.Б., Ратникова Л.И., Ляховицкий Ф.М. и др., 1981. *Сейсморазведка: Справочник геофизика*. Под ред. И.И. Гурвича, В.П. Номоконова. Москва: Недра, 464 с.
6. Котяшев А.А., Маторин А.С., Меньшиков П.В., 2010. Применение сейсмометрии для совершенствования параметров буровзрывных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 302-306.
7. Савич А.И., 1979. *Исследование упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами*. Под ред. А.М. Епинатьевой. Москва: Недра, 214 с.
8. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии. ВНИИ гидрогеологии и инж. геологии; Сост. Т. Майкут и др.; Под ред. Н. Н. Горянинова. Москва: Недра, 1992, 259 с.
9. Van der Veen M., Spitzer R., Green A.G. and Wild P., 2001. Design and Application of a Towed Land-Streamer System for Cost-Effective 2-D and Pseudo-3-D Shallow Seismic Data Acquisition. *Geophysics*, 66, P. 482-500.
10. Зуев П.И., Григорьев Д.В., Ведерников А.С., 2021. Геофизическое обследование участков асBESTового карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5-1, С. 131-141.

References

1. Trubetskoi K.N., Ryl'nikova M.V., 2015. Sostoyanie i perspektivy razvitiya otkrytykh gornykh rabot v XXI veke [State and prospects of open-pit mining in the 21st century]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 45-1, P. 21-32.
2. Bersenev G.P., Zharikov S.N., Regotunov A.S., Kutuev V.A., 2022. Rezul'taty issledovaniya tekhnologicheskogo razvitiya burovzryvnykh rabot na kar'erakh Ural'skogo regiona [Results of a study of the technological development of drilling and blasting operations in the quarries of the Ural region]. Problemy nedropol'zovaniya, № 3(34), P. 43-54.
3. Kazakov N.N., Viktorov S.D., Shlyapin A.V., Lapikov I.N., 2020. Droblenie gornykh porod vzryvom v kar'erakh: monografiya [Crushing of rocks by explosion in quarries: a monograph]. Pod nauchnoi redaktsiei akademika K.N. Trubetskogo. Moscow: RAN, 519 p.
4. Klochko I.I., Manzhos Yu.V., Kas'yanenko D.L., 2025. Vliyanie uslovii initisirovaniya zaryadov VV na effektivnost' drobleniya gornykh porod [Influence of explosive charge initiation conditions on the efficiency of rock crushing]. Trudy RANIMI, № 6(44), P. 41-50.
5. Yanovskaya T.B., Ratnikova L.I., Lyakhovitskii F.M. i dr., 1981. Seismorazvedka: Spravochnik geofizika [Seismic exploration: Handbook of Geophysics]. Pod red. I.I. Gurvicha, V.P. Nomokonova. Moscow: Nedra, 464 p.
6. Kotyashev A.A., Matorin A.S., Men'shikov P.V., 2010. Primenenie seismometrii dlya sovershenstvovaniya parametrov burovzryvnykh rabot [Use of seismometry to improve the parameters of drilling and blasting operations]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 11, P. 302-306.
7. Savich A.I., 1979. Issledovanie uprugikh i deformatsionnykh svoistv gornykh porod seismoakusticheskimi metodami [Investigation of elastic and deformation properties of rocks by seismoacoustic methods]. Pod red. A.M. Epinat'evoi. Moscow: Nedra, 214 p.
8. Primenenie seismoakusticheskikh metodov v gidrogeologii i inzhenernoi geologii . [Application of seismoacoustic methods in hydrogeology and engineering geology]. VNII gidrogeologii i inzh. geologii; Sost. T. Maikut i dr.; Pod red. N. N. Goryainova. Moscow: Nedra, 1992, 259 p.



9. Van der Veen M., Spitzer R., Green A.G. and Wild P., 2001. Design and Application of a Towed Land-Streamer System for Cost-Effective 2-D and Pseudo-3-D Shallow Seismic Data Acquisition. *Geophysics*, 66, P. 482-500.

10. Zuev P.I., Grigor'ev D.V., Vedernikov A.S., 2021. Geofizicheskoe obsledovanie uchastkov asbestovogo kar'era [Geophysical survey of asbestos quarry sites]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 5-1, P. 131-141.