

Анализ влияния горно-геологических параметров на показатели потерь и разубоживания руды при системах разработки с подэтажным обрушением

А. М. Гильдеев^{1✉}, Г. С. Курчин², С. А. Вохмин²,
А. К. Кирсанов², Д. В. Бархатов³

¹ООО «УК ЮГК», г. Челябинск, Российская Федерация

²ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

³ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», рудник «Скалистый», г. Норильск, Российская Федерация

✉ a.gildeev@ugold.ru

Резюме. Система подэтажного обрушения считается эффективным методом подземной разработки рудных месторождений, однако показатели потерь и разубоживания при ее использовании значительно варьируются между объектами. Традиционно предполагается, что эти различия обусловлены различиями в конструктивных параметрах добычного блока. В настоящем исследовании на основе анализа работы горнодобывающих предприятий установлено, что конструктивные параметры (расстояния между подэтажами, ширина выработок, параметры буровзрывных работ) не имеют статистически значимой связи с показателями извлечения. Напротив, горно-геологические параметры объясняют более 60 % вариативности разубоживания. На этой основе выделены три типа месторождений с различными ожидаемыми показателями эффективности. Полученные результаты свидетельствуют о доминирующей роли горно-геологических факторов и требуют переосмысления методологии проектирования систем подэтажного обрушения.

Ключевые слова: подэтажное обрушение, потери и разубоживание, конструктивные параметры, система разработки, полнота извлечения

Для цитирования: Гильдеев А.М., Курчин Г.С., Вохмин С.А., Кирсанов А.К., Бархатов Д.В. Анализ влияния горно-геологических параметров на показатели потерь и разубоживания руды при системах разработки с подэтажным обрушением. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (2): 14-18. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-14-18>.

Analysis of the influence of mining and geological parameters on the indicators of ore loss and dilution in sub-stage cladding mining systems

A. M. Gildeev^{1✉}, G. S. Kurchin², S. A. Vokhmin²,
A. K. Kirsanov², D. V. Barkhatov³

¹LLC "UK YUGK", Chelyabinsk, Russian Federation

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

³Polar Division of PJSC MMC Norilsk Nickel, Skalisty Mine, Norilsk, Russian Federation

✉ a.gildeev@ugold.ru

Abstract. Sublevel caving is considered the most efficient method for underground mining of ore deposits; however, its loss and dilution rates vary significantly between sites. This variability is traditionally assumed to be due to differences in the design parameters of the mining unit. This study, based on an analysis of mining operations, found that design parameters (spacing between sublevels, working width, and drilling and blasting parameters) have no statistically significant relationship with recovery rates. In contrast, geological parameters explain over 60% of the dilution variability. Based on this, three types of deposits with different expected performance indicators were identified. The obtained results indicate the dominant role of geological factors and require a rethinking of the design methodology for sublevel caving systems.

Keywords: sublevel caving, losses and dilution, design parameters, development system, completeness of extraction

For citation: Gildeev A.M., Kurchin G.S., Vokhmin S.A., Kirsanov A.K., Barkhatov D.V. Analysis of the influence of mining and geological parameters on the indicators of ore loss and dilution in sub-stage cladding mining systems. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (2): 14-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-14-18>.

Введение

Отработка рудных месторождений системами подэтажного обрушения – наиболее динамично развивающийся метод добычи полезных ископаемых (ПИ) подземным способом [1]. Он основан на гравитационном потоке ПИ, фрагментированных посредством результата действия взрыва, при котором вышележащие вмещающие породы подвергаются естественному обрушению по мере извлечения руды.

Исторически данная система считалась пригодной исключительно для крутопадающих (угол наклона рудного тела более 60°) рудных тел с высокой крепостью руды и неустойчивыми вмещающими породами [2, 3]. Основной проблемой рассматриваемой системы являются повышенные показатели потерь ПИ и его техногенного разубоживания, которые ограничивают полноту извлечения минерального сырья [4]. Практический опыт разработки подземных рудных месторождений указывает на то, что эффективность функционирования системы разработки с подэтажным обрушением в значительной мере определяется обоснованным выбором конструктивных параметров добычного блока, которые должны быть адаптированы к конкретным литолого-геотехническим условиям залегания и структурным особенностям рудного тела [5–9].

Стоит отметить, что в последние годы наблюдается переоценка возможностей данной системы. Так, согласно результатам ряда исследований, система разработки с подэтажным обрушением успешно внедряется не только на классических крутопадающих месторождениях, но и на объектах с более сложной пространственной ориентацией рудного тела, наклонных залежах, а также комбинированных системах разработки [10–15]. Это разнообразие практических применений выходит далеко за рамки классических описаний метода в учебной литературе и требует отдельного анализа.

В частности, остается недостаточно изученным вопрос о том, какие факторы наиболее существенно влияют на показатели потерь и разубоживания руды в различных горно-геологических условиях и параметров системы разработки. Традиционная гипотеза предполагает, что параметры системы разработки с подэтажным обрушением являются определяющими факторами для показателей полноты извлечения. Вместе с тем возникает вопрос: имеются ли другие факторы, которые также определяют технико-экономические показатели данной системы.

Цель исследования: систематизировать влияние комплекса геологических, горнотехнических, технологических и экономических факторов на показатели полноты извлечения руды при разработке месторождений системой подэтажного обрушения.

Методология исследований

Исследование основано на анализе производственных и технических данных более 30 горнодобывающих предприятий, ведущих отработку системой с подэтажным обрушением. География рассматриваемых объектов представлена рядом стран: Китаем, Австралией, Сербией, Казахстаном, Канадой, ЮАР, Швецией и Колумбией.

В ходе исследования для каждого рассматриваемого месторождения была систематизирована информация по ряду технологических параметров, охватывающих следующие группы показателей:

1. Производственные показатели – запасы, тип добываемого ПИ, годовая производительность, фактические объемы потерь и разубоживания и т. д.

2. Параметры добычного блока – расстояние между подэтажами, расстояние между выработками в подэтаже, ширина выработки и т. д.

3. Параметры буровзрывных работ – длина взрывных скважин, схема расположения скважин (веерная или параллельная), характеристики взрывчатых веществ, глубина зарядания и т. д.

4. Горно-геологические условия – угол падения рудного тела, мощность рудного тела и вышележащих вмещающих пород, прочностные характеристики руды, наличие и характер естественной трещиноватости и т. д.

Результаты и обсуждение

Анализ собранных производственных показателей (по данным [10, 16–18]) выявил значительное разнообразие показателей извлечения ПИ.

Так, на горнодобывающих предприятиях, ведущих добычу кимберлита (Kimberley, Diavik, Ekati, Koffiefontein, Venetia), зафиксированы минимальные показатели потерь (9–15 %). Это объясняется приоритетом качества над объемом производства – алмазы имеют значительно более высокую удельную стоимость на единицу массы в сравнении с другими ПИ, что обуславливает необходимость максимального их извлечения.

В свою очередь на золоторудных и медных месторождениях среднее значение потерь и разубоживания равняется 14 и 20 % соответственно, а на железорудных месторождениях показатели потерь могут варьироваться в диапазоне 20–25 %, разубоживания – 25–35 %.

На основе данного анализа можно сделать промежуточный вывод о том, что каждое месторождение функционирует в соответствии со своей уникальной экономической целевой функцией, включающей удельную стоимость добываемого сырья, стоимость его переработки, а также допустимого процента содержания примесей на этапе обогащения.

Для проведения комплексного корреляционного анализа была собрана подробная информация по пяти ключевым конструктивным параметрам добычного блока:

1. Расстояние между подэтажами варьировалось в диапазоне 15–35 м. На исследуемых месторождениях преобладали значения 18–25 м, что является стандартом для большинства предприятий, ведущих отработку такой системой разработки.

2. Расстояние между выработками в подэтаже варьировалось в диапазоне 12–24 м. Месторождения с расстоянием менее 16 м (Diavik, Ernest Henry) использовали плотную сетку для повышения уровня селективности отработки ПИ. Месторождения с расстоянием 20–24 м (Kiruna, Malmberget) применяли более редкую сетку для повышения производительности.

3. Ширина откаточных выработок варьировалась от 4 до 7 м. Узкие выработки (4–5 м) использовались на месторождениях с тонкими залежами (Finsch, Venetia). Широкие выработки (6–7 м) применялись на месторождениях с мощными залежами (Kiruna, Malmberget).

4. Длина взрывных скважин зависела от высоты подэтажей.

5. Схема расположения скважин была представлена тремя видами:

- веерным расположением (большинство рассмотренных предприятий),
- параллельным расположением,
- комбинированными схемами.

Результаты корреляционного анализа влияния конструктивных параметров блока показали отсутствие статистически значимых связей с показателями потерь и разубоживания.

В отличие от конструктивных параметров блока горно-геологические характеристики рассматриваемых месторождений показывают статистически значимые корреляции с показателями потерь и разубоживания. Корреляционным анализом выявлена положительная связь между углом падения рудного тела и коэффициентом извлечения из недр. Так, на месторождениях с углом падения более 60° средний процент извлечения из недр – 86 %, тогда как на объектах с углом падения рудного тела 30–45° этот показатель не превышает 80 %, а на пологих залежах (менее 30°) отмечается критическое снижение до 70–75 %. Эта закономерность объясняется геомеханикой гравитационного потока: крутопадающие залежи обеспечивают контролируемое направленное движение обрушаемой горной массы к выемочным точкам, в то время как пологие залежи способствуют его скоплению и застреванию, что в конечном итоге затрудняет контроль выпуска и увеличивает процент разубоживания.

Индекс геологической прочности (GSI) обрушаемого массива также значительно влияет на контролируемость процесса обрушения – в условиях прочных горных пород этот процесс происходит предсказуемо с минимальным дроблением, что позволяет оператору точнее управлять выемкой. А в условиях слабых пород происходит интенсивное дробление вышележащих кусков породы при обрушении, что приводит к повышенному разубоживанию и непредсказуемости процесса.

Для оценки значения горно-геологических параметров был проведен анализ коэффициента детерминации, включающий угол падения, индекс GSI, мощность рудного тела и тип ПИ. Данная модель позволила объяснить 64 % общей вариативности разубоживания ($R^2 = 0,64$). В контрасте с этим модель, построенная исключительно на конструктивных параметрах добычного блока, объяснила лишь 12 % наблюдаемой вариативности ($R^2 = 0,12$). Полученная разница моделей свидетельствует о существенном преобладании горно-геологических факторов в формировании и последующем определении показателей потерь и разубоживания при разработке месторождений системами с подэтажным обрушением.

Полученные результаты имеют прямое практическое применение при оценке целесообразности использования системы подэтажного обрушения и оптимизации стратегий управления выемкой на новых месторождениях. Традиционный подход к проектированию системы разработки предпо-

лагает, что инженер может независимо выбирать конструктивные параметры добычного блока с целью достижения целевых показателей потерь и разубоживания ПИ. Однако проведенный авторами анализ показал, что конструктивные параметры не являются инструментом оптимизации, а скорее являются следствием горно-геологических ограничений, которые инженер не может преодолеть изменением параметров добычного блока.

На основе проанализированных данных были выявлены три основных сценария, характеризующихся различными горно-геологическими и горнотехническими параметрами, а также ожидаемыми показателями извлечения ПИ:

1. Месторождения с благоприятными условиями – угол падения рудного тела более 60° и индексом GSI более 60. Ожидаемые прогнозные показатели потерь при таких условиях составят порядка 10–15 %, а разубоживание будет на уровне 8–15 % (при корректно подобранных параметрах добычного блока).

2. Месторождения со средними условиями (угол падения рудного тела 45–60° и индекс GSI 40–60). Прогнозные значения потерь ПИ будут составлять 15–25 %, а разубоживание – в диапазоне от 15 до 30 %. Данная группа характерна для золоторудных и меднорудных месторождений.

3. Месторождения с неблагоприятными условиями. Угол падения рудного тела менее 45°, индекс GSI менее 40. При отработке таких месторождений системами с подэтажным обрушением потери могут достигать порядка 20–40 %, а разубоживание ПИ – 25–40 %.

Закключение

Полученные результаты указывают на то, что конструктивные параметры добычного блока не являются независимыми проектными переменными, а скорее представляют собой следствие горно-геологических условий месторождения. Расстояния между подэтажами и выработками, ширина откаточных выработок и параметры буровзрывных работ фактически определяются качеством горных пород, мощностью рудного тела, прочностными характеристиками массива и возможностями буровой техники. Таким образом они являются следствием, а не причиной вариативности показателей потерь и разубоживания. Это объясняет отсутствие корреляций: варьирование конструктивных параметров с одного месторождения к другому обусловлено различиями в геологии, а не стратегическим выбором инженеров.

Выводы

1. Попытка улучшить показатели извлечения полезного ископаемого при добыче подземным способом при использовании системы разработки с подэтажным обрушением путем изменения расстояний между подэтажами, ширины выработок или параметров буровзрывных работ эффективна, только если в инженерных расчетах будут учтены горно-геологические параметры. В ином случае путем изменения горнотехнических параметров системы может быть достигнуто лишь краткосрочное улучшение показателей извлечения ПИ.

2. Проектирование системы подэтажного обрушения должно начинаться с определения места месторождения в горно-геологической классификации, на основе которого прогнозируются ожидаемые показатели, а затем выбирается оптимальная стратегия управления выемкой запасов ПИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Русин Е.П., Стажевский С.Б. О современном состоянии и перспективах шведского варианта системы добычи руд с подэтажным обрушением. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2017, 2 (2): 112-116.
Rusin E.P., Stazhevsky S.B. Swedish version of sublevel caving ore mining system: state-of-the-art and prospects. *InterExpo Geo-Siberia*. 2017; 2(2): 112-116. (In Russ.).
2. Xia K., Si Zh., Chen C. et al. Numerical and theoretical study of large-scale failure of strata overlying sublevel caving mines with steeply dipping discontinuities. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2024; 31 (8): 1799-1815. <https://doi.org/10.1007/s12613-024-2838-3>.
3. Xie P., Huang B., Wu Y., et al. Stability analysis of rock fracture and support performance in steeply dipping ore deposits with massive mining stopes. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2023; 14 (1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2250529>.
4. Зубков В.П., Петров Д.Н. Влияние расстояния между выпускными выработками на потери руды от смерзания при выпуске. *Горная промышленность*. 2024; 2: 104-110. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-104-110>.
Zubkov V.P., Petrov D.N. Impact of the distance between the draw holes on the ore loss due to congealing during ore drawing. *Russian Mining Industry*. 2024; 2: 104-110. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-104-110>. (In Russ.).
5. Смирнов А.А., Барановский К.В. Критический анализ теоретических положений по выпуску руды под обрушенными породами. *Проблемы недропользования*. 2022; 3 (34): 136-145. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.03.136>.
Smirnov A.A., Baranovsky K.V. Critical analysis of theoretical provisions on the production of ore under caved rocks. *Problems of subsoil use*. 2022; 3 (34): 136-145. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.03.136>. (In Russ.).
6. Isabek T., Orynbek Ye., Kozhogulov K., et al. Geomechanical substantiation of the parameters for the mining system with ore shrinkage in the combined mining of steep-dipping ore bodies. *Mining of Mineral Deposits*. 2022; 16 (4): 115-121. <https://doi.org/10.33271/mining16.04.115>.
7. Tan Yu., Guo M., Hao Y., et al. Structural Parameter Optimization for Large Spacing Sublevel Caving in Chengchao Iron Mine. *Metals*. 2021; 11 (10): 1619. <https://doi.org/10.3390/met11101619>.
8. Sun M., Ren F., Ding H. Optimization of Stope Structure Parameters Based on the Mined Orebody at the Meishan Iron Mine. *Advances in Civil Engineering*. 2021; 1: 8052827. <https://doi.org/10.1155/2021/8052827>.
9. Li G., Ren F., Ding H., et al. A Dynamic Intersecting Arrangement Model Based on Isolated Draw Zones for Stope Structure Optimization during Sublevel Caving Mining. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021; 2021: 6669558. <https://doi.org/10.1155/2021/6669558>.
10. Campbell A.D. A global review of recovery, dilution and draw control in sublevel caving mines. *Caving 2022: Proceedings of the Fifth International Conference on Block and Sublevel Caving*. Australian Centre for Geomechanics, Perth. 2022: 909-926. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/2205_62.
11. Антипин Ю.Г., Рожков А.А., Барановский К.В. Обоснование параметров камерной системы разработки с оставлением неизвлекаемых целиков. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2021; 4: 15-23. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-4-15-23>.
Antipin Yu.G., Rozhkov A.A., Baranovskii K.V. Substantiation of the parameters of open stoping mining method with abandonment of unrecoverable pillars. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 4: 15-23. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-4-15-23>. (In Russ.).
12. Смирнов А.А., Барановский К.В., Дьячков П.С. Система подэтажного обрушения с торцовым выпуском для выемки целиков при отработке пологих рудных тел. *Проблемы недропользования*. 2023; 4 (39): 6-15. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.04.006>.
Smirnov A.A., Baranovskiy K.V., Dyachkov P.S. Sublevel caving system with frontal ore drawing for excavating pillars of sloping ore deposits. *Problems of subsoil use*. 2023; 4 (39): 6-15. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.04.006>. (In Russ.).
13. Конурин А.И., Щукин С.А., Неверов С.А., Неверов А.А. Подэтажное обрушение под защитой рудо-породной подушки при переходе от открытых работ к подземной выемке. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2018; 5 (2): 67-74.
Konurin A.I., Shchukin S.A., Neverov S.A., Neverov A.A. Sublevel caving under protection of ore-rocks pad during transition from open works to underground mining. *Fundamental And Applied Issues Of Mining Sciences*. 2018; 5 (2): 67-74. (In Russ.).
14. Brand L., Haider K. Sublevel Shrinkage (SLSh). Mining – A State-of-the-art Review. *BHM Berg- und Huttenmannische Monatshefte*. 2023; 168 (6): 274-280. <https://doi.org/10.1007/s00501-023-01354-3>.
15. Konurin A.I., Shchukin S.A., Neverov S.A., Neverov A.A. Sublevel caving under protection of ore-and-barren rock cushion during transition from open pit to underground mining. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 262: 012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/262/1/012033>.
16. Jakubec J., Lagace D., Boggis B., et al. Underground mining at Ekati and Diavik diamond mines. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*. Australian Centre for Geomechanics, Perth. 2018: 73-88. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1815_03_Jakubec.
17. Khazaei S., Pourrahimian Ya. Mathematical Programming Application in Sublevel Caving Production Scheduling. *Mining*. 2021; 1 (2): 180-191. <https://doi.org/10.3390/mining1020012>.
18. Lapčević V., Torbica S. Numerical investigation of caved rock mass friction and fragmentation change influence on gravity flow formation in sublevel caving. *Minerals*. 2017; 7 (4): 56. <https://doi.org/10.3390/min7040056>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Маликович Гильдеев –
директор по развитию производства ООО «УК ЮГК», г.
Челябинск, Российская Федерация; e-mail: a.gildeev@ugold.ru

Георгий Сергеевич Курчин –
д-р техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет», г. Красноярск, Российская
Федерация

ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr M. Gildeev –
Director of Production Development, UK UGK LLC,
Chelyabinsk, Russian Federation; e-mail: a.gildeev@ugold.ru

George S. Kurchin –
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russian Federation

Сергей Антонович Вохмин –

канд. техн. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

Александр Константинович Кирсанов –

канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

Денис Владимирович Бархатов –

аспирант, ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», г. Норильск, Российская Федерация; e-mail: barhatov1997@gmail.com

Критерии авторства:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 11.02.2026

Поступила после рецензирования: 15.03.2026

Принята к публикации: 20.03.2026

Sergei A. Vokhmin –

Cand. Sci. (Eng.), Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Aleksandr K. Kirsanov –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Denis V. Barkhatov –

Postgraduate Student, Polar Division of PJSC MMC Norilsk Nickel, Skalisty Mine, Norilsk, Russian Federation; e-mail: barhatov1997@gmail.com

Contribution:

The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 11.02.2026

Revised: 15.03.2026

Accepted: 20.03.2026