

Специфика оценки потерь и разубоживания минерального сырья при комплексном освоении месторождений полиметаллических руд и сопутствующих техногенных образований

Я.А. Сребродольский¹✉, Е.Е. Швабенланд², Г.С. Курчин³

¹ Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

² Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского, г. Москва, Российская Федерация

³ Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация
✉ yasrebrodolskiy@grmining.ru

Резюме: Статья посвящена комплексному анализу и оценке количественных и качественных потерь ценных компонентов при разработке полиметаллических рудных месторождений совместным вовлечением в переработку техногенных георесурсов. Эмпирической базой исследований послужили материалы разработки трех жильных месторождений Южной Якутии (Верхне-Менкече, Сарылах, Сентачан), характеризующихся различными горно-геологическими и горнотехническими условиями и отличающихся типом оруденения. Ключевое внимание в статье сфокусировано на сравнительной оценке двух основных систем подземной разработки – с магазинированием руды и подэтажных штреков. Проанализированы базовые физико-механические характеристики руд и вмещающих горных пород (крепость по шкале проф. М.М. Протодяконова, трещиноватость, прочность массивов горных пород) в совокупности с технологическими особенностями добычи и переработки (параметры буровзрывных работ, схемы транспортирования и переработки), которые напрямую влияют на итоговые показатели извлечения. В ходе анализа выявлены и систематизированы основные факторы, формирующие потери и разубоживание руды для каждой из применяемых систем разработки месторождения. Так, для системы разработки с магазинированием руды, где общие потери достигают 10–15%, критическими являются процессы на стадии выпуска замагазинированной руды: оставление целиков в днище блока и неконтролируемое смешивание руды с породой при отбойке. В то же время система разработки подэтажными штреками демонстрирует более высокие потери (15–25%), генезис которых связан преимущественно с этапом отбойки – неполное извлечение руды из-за отсутствия оптимизации распределения сетки скважин в руде и интенсивное обрушение пород на ослабленных контактах рудного тела. Анализ отходов обогащения руд показал их высокий потенциал как вторичного сырья для дополнительного извлечения ценных компонентов. На основе выявленных проблем сформулирован ряд конкретных инженерно-технических рекомендаций, направленных на минимизацию потерь рудного сырья. Результаты работы позволяют выработать более эффективные подходы к освоению сложноструктурных месторождений полиметаллических руд.

Ключевые слова: потери руды, разубоживание, полиметаллические месторождения, Южная Якутия, система разработки с магазинированием руды, подэтажные штреки, буровзрывные работы, техногенные образования, хвостохранилище

Для цитирования: Сребродольский Я.А., Швабенланд Е.Е., Курчин Г.С. Специфика оценки потерь и разубоживания минерального сырья при комплексном освоении месторождений полиметаллических руд и сопутствующих техногенных образований. *Горная промышленность*. 2025;(5S):92–99. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-92-99>

Specific features of assessing losses and dilution of mineral raw materials in the integrated development of polymetallic ore deposits and associated man-made formations

Y.A. Srebrodolsky¹ ✉, E.E. Shwabenland², G.S. Kurchin³

¹ Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

² N.M. Fedorovsky All-Russian Research Institute of Mineral Resources (VIMS), Moscow, Russian Federation

³ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation
✉ yasrebrodolskiy@grmining.ru

Abstract: This article presents a comprehensive analysis and assessment of quantitative and qualitative losses of valuable components during the development of polymetallic ore deposits with concurrent processing of man-made georesources.

Materials from the development of three vein deposits in Southern Yakutia (Verkhne-Menkechye, Sarylakh, Sentachan) characterized by different mining-geological and mining-technical conditions and distinguished by their type of mineralization were used as the empirical basis of the research. The key attention in the article is focused on the comparative evaluation of the two main underground mining systems, i.e. shrinkage stoping and sublevel drifting. The basic physical and mechanical characteristics of ores and host rocks (Protodiakonov hardness, fracturing, rock mass strength) are analyzed in combination with technological features of mining and processing (drilling and blasting parameters, haulage and processing schemes) that directly affect the final recovery indicators. The analysis identified and systematized the main factors forming ore losses and dilution for each of the applied mining systems. Thus, for the shrinkage stoping system, where the total losses reach 10-15%, the critical processes occur when drawing the stored ore: the pillars left at the block bottom and uncontrolled mixing of ore with waste rock during blasting. Meanwhile, the sublevel drifting system demonstrates higher losses (15–25%), which primarily root back to the blasting stage, i.e. incomplete ore extraction due to the lack of optimization in the drill hole pattern in the ore and intensive rock caving at the weakened contacts of the ore body. Analysis of the ore processing tailings showed their high potential as secondary raw materials for additional extraction of valuable components. Based on the identified problems, a series of specific engineering and technical recommendations aimed at minimizing ore losses have been formulated. The research results enable development of more efficient approaches to mining structurally complex polymetallic ore deposits.

Keywords: ore loss, dilution, complex deposit, South Yakutia, ore shrinkage stoping system, sublevel drifting, drilling and blasting operations, man-made mineral formations, tailing dump

For citation: Srebrodolsky Y.A., Shwablenland E.E., Kurchin G.S. Specific features of assessing losses and dilution of mineral raw materials in the integrated development of polymetallic ore deposits and associated man-made formations. *Russian Mining Industry*. 2025;(5S):92–99. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-92-99>

Введение

Минерально-сырьевая база Российской Федерации требует постоянного восполнения, для чего, в свою очередь, требуется комплексное освоение существующих месторождений, поиск и ввод в отработку новых объектов. В современных условиях особую значимость приобретает проблема рационального использования полезных ископаемых, в том числе и полиметаллических руд, что обусловлено истощением запасов, вовлечением в отработку месторождений с низкими содержаниями полезных компонентов, со сложными горно-геологическими условиями разработки и повышением требований к эффективности добычи, увеличением глубины ведения горных работ и, как следствие, ростом издержек производства.

Эффективное освоение месторождений полиметаллических руд в современных условиях экономики требует системного подхода к оценке и снижению потерь минерального сырья на всех этапах горного цикла. Особенно это актуально при разработке жильных рудных тел сложной морфологии, где наблюдается неравномерное распределение ценных компонентов и высокая вариабельность геологических условий. В северных регионах России, обладающих значительными запасами полиметаллических руд, оптимизация процессов добычи и переработки сырья приобретает стратегическое значение для поддержания конкурентоспособности и экономической эффективности горнодобывающих предприятий.

Существующие методы оценки потерь и разубоживания руд чаще всего рассматривают отдельные стадии производственного процесса изолированно, что не позволяет учесть взаимное влияние технологических решений на разных этапах полного цикла комплексного освоения месторождений. В то же время комплексная оценка должна охватывать весь цикл – от добычи руды до получения товарных концентратов, а также анализировать возможности вовлечения техногенных образований в переработку как дополнительного источника ценных металлов [1; 2].

Необходимость проведения данных исследований обусловлена рядом современных тенденций в горнодобывающей отрасли России. Во-первых, наблюдается устойчивая тенденция истощения наиболее богатых и легко разраба-

тываемых месторождений, что вынуждает вовлекать в эксплуатацию объекты с более сложной геологией и пониженным содержанием ценных компонентов, расположенных в сложных географических условиях при неразвитой инфраструктуре, в таких условиях даже незначительное повышение извлечения металлов влияет на рост экономической эффективности проектов.

Особую значимость эта проблема приобретает для предприятий, работающих в арктических и субарктических районах, где эксплуатационные расходы весьма высоки, а климатические условия (вечная мерзлота, экстремальные температуры) создают дополнительные технологические ограничения. В этих условиях максимальное извлечение ценных компонентов становится критическим фактором обеспечения рентабельности производства.

Современное развитие горных технологий сопровождается ужесточением требований к экологической безопасности и рациональному использованию недр. Сокращение потерь ценных компонентов позволяет не только повысить экономическую эффективность горных работ, но и уменьшить нагрузку на окружающую среду за счет сокращения объемов отходов и более полного использования извлекаемых георесурсов.

Дополнительный фактор актуальности исследований – интерес к переработке техногенных образований. Десятилетиями накапливаемые хранилища отходов обогащения представляют собой значительный резерв дополнительного получения ценных металлов, и их вовлечение в переработку способно существенно улучшить экономические показатели горных предприятий при относительно низких капитальных затратах.

Главной научно-технической проблемой является отсутствие комплексной методики, учитывающей специфику жильных полиметаллических месторождений и взаимосвязь технологических процессов на всех стадиях освоения. Существующие нормативы и методические рекомендации зачастую носят общий характер и не отражают особенностей конкретных месторождений и применяемых систем разработки.

Сложность вызывает и оптимизация буровзрывных работ для жильных тел сложной морфологии. Традиционные

методы проектирования геотехнологии, основанные на усредненных характеристиках рудных тел, не обеспечивающих требуемого качества отбойки при резких изменениях мощности и контактов жил, что ведет к увеличению потерь и разубоживания руды.

Отдельно стоит отметить проблему количественной оценки потерь при транспортировке и переработке руд, особенно актуальных в северных регионах, где на геотехнологические процессы существенно влияют климатические факторы: налипание и намерзание горной массы, изменение физических свойств горных пород при низких температурах, что требует дополнительного изучения.

Наконец, недостаточно разработан вопрос комплексной эксплуатации техногенных образований. Хотя вовлечение хвостов обогащения в повторную переработку имеет очевидный экономический потенциал, методики оценки их ресурсного потенциала и технологии извлечения остаточных ценных компонентов остаются фрагментарными.

Необходимо отметить высокий потенциал техногенных образований как вторичного сырья, что особенно актуально в условиях истощения природных ресурсов и необходимости рационального природопользования. Поэтому важно обеспечить максимальное вовлечение техногенных объектов в повторную отработку и правовое регулирование данной деятельности. Такой подход обеспечит паритет интересов недропользователей и государства.

Анализ горно-геологических, горнотехнических условий освоения месторождений полиметаллических руд южной Якутии

Месторождение Верхне-Менкече – серебрено-полиметаллическая минерализация на месторождении Верхне-Менкече (относится к третьей группе сложности) локализуется в трех протяженных субпараллельных зонах смятия и дробления северо-восточного простирания (50–80°) с крутым винтообразным падением (70–90°), сопровождающихся более мелкими опережающими трещинами.

Мощность рудных зон варьирует от 0,5 до 10 и более метров (преобладающая мощность 1–3 м). Межжильное пространство обычно заполнено дроблеными породами с мелкими прожилками и вкрапленностью сульфидов (галенитом, пиритом, сфалеритом и др.) различной интенсивности.

Месторождение расположено в криолитозоне (вечная мерзлота не вскрыта), не склонно к горным ударам, не относится к опасным по выбросу газа и пыли. Основные типы горных пород – алевролиты, алевролитовые сланцы и песчаники.

По буримости породы делятся на две категории: IX категория – вмещающие породы (алевролиты, песчаники) и VIII категория – породные зоны дробления. По классификации профессора С.В. Николаева руды относятся к породам III группы (средней прочности) и на отдельных участках рудных зон их можно отнести ко II или даже I классу (слабые и очень слабые). Основные физико-механические характеристики горных пород, слагающих месторождение, представлены в табл. 1.

Для подземной отработки рудных тел месторождения Верхне-Менкече приняты следующие системы разработки: с магазинированием руды, подэтажных штреков (основная). Для систем с магазинированием руды бурение шпуров осуществляют перфораторами, диаметр шпуров 43 мм, сетка 600х700 мм. Для системы подэтажных штреков бурение скважин осуществляется станком НКР-100МА, диаметр

Таблица 1
Физико-механические свойства пород месторождения Верхне-Менкече

Table 1
Physical and mechanical properties of rocks at the Verkhne-Menkechye deposit

Наименование физико-механических свойств, ед.изм.	Вмещающие породы	Зона дробления	Руда
Крепость пород f по шкале проф. М.М. Протодяконова	12	6	6
Трещиноватость (модуль трещиноватости, шт/м):	От 1–2 до 2–10	Более 10	2–10
Объемный вес, кг/м ³	2660	–	2860
Коэффициент разрыхления	1,4	1,4	1,47
Угол естественного откоса, град	33	32	30
Устойчивость (площадь обнажения (до), м ²	Висячий бок 100; лежащий бок 600	10	10

скважин 105 мм, или станком «SIMBA JUNIOR LATERAL», диаметр скважин 85 мм, расстояние между скважинами 2,5 и 2 м соответственно. При этом расстояние между забоями скважин около 1 м.

Взрывные работы проводят с применением «классических» для северных регионов ВВ – Аммонитом №6ЖВ и Игданитом, для заряжания скважин используются пневмоматричные зарядники.

Транспортирование горной массы с добычного блока предусмотрено погрузо-доставочной машиной Fabition FAML 2, емкость ковша 1,8 м³. Затем горнорудная масса перегружается в подземные самосвалы Fabition FAM 15, емкость кузова 15 м³, и выдается на поверхность при среднем расстоянии перемещения 1,3 км. Основные откаточные маршруты проходят по транспортным уклонам.

Для переработки свинцово-серебряной руды принята гравитационно-флотационная технология, рудоподготовка – крупное дробление и 2 стадии измельчения: полусамомельчение и шаровое. Затем технологическая схема предусматривает гравитационное обогащение – отсадка и доводка на концентрационных столах. Хвосты гравитации флотируются с получением селективных свинцово-серебряного и цинкового концентратов. Хвосты после флотации складываются в полусухое хвостохранилище в обезвоженном виде.

Техногенные образования представлены отфильтрованными хвостами флотации с влажностью 15–20%. В отходах флотации содержание цинка составляет в среднем – 0,3%, свинца – 0,2%, серебра – 19 г/т. Попутным компонентом в рудах месторождения является кадмий, потери которого при извлечении составляют 25,85%. Сквозное извлечение базовых элементов составляет 90–95%. Помимо кадмия в хвосты попадают такие элементы, как алюминий, марганец, магний, натрий, титан, бериллий. Исследований по извлечению этих элементов на настоящее время не проводилось¹.

Месторождение Сарылах расположено в 650 км от месторождения Верхне Менкече и представляет собой локализованные в зоне рудного разлома жилы. Месторождение является крупнейшим по запасам и уникальным по

1 Проектная документация «Рудник Верхне-Менкече». МСК; 2022.

Таблица 2
Физико-механические свойства
руд и вмещающих пород
месторождения «Сарылах»

Table 2
Physical and mechanical
properties of ores and host
rocks at the Sarylakh deposit

Наименование физико-механических свойств, ед. изм.	Вмещающие породы	Зона дробления	Руда
Крепость пород, f по шкале проф. М.М. Протодеяконова	6–8	6–8	7–9
Трещиноватость (модуль трещиноватости, шт/м):	3–5	Варьируется в интервальных пределах	12–15
Объемный вес, кг/м ³	2650	2500	2810
Коэффициент разрыхления	1,35	1,2	1,4

содержанию сурьмы и золота. Оно представлено основной кварц-антимонитовой жилой, залегающей в минерализованной зоне дробления с углом падения 75–80°. Форма рудного тела – относительно простая, характеризуется в целом довольно выдержанным залеганием как по простиранию, так и по падению с постепенным сокращением мощности к флангам и в глубине. Мощность жилы варьирует от 0,2–0,3 до 4,5 м, в редких случаях достигает 10 м. Сплошность оруденения непрерывная, рудные столбы приурочены к смыкающей части флексурных изгибов зоны рудного разлома, подчеркивая взбросо-сдвиговый характер перемещения вдоль него в ходе рудообразования.

Месторождение расположено в криолитозоне: вечная мерзлота вскрыта, фактические горные работы ведутся вне криолитозоны месторождения, не склонно к горным ударам, не относится к опасным по выбросу газа и пыли. Вмещающие породы месторождения представлены разнотекстурными переслаивающимися пачками песчаников, алевролитов и их переходными разностями. По свойствам вмещающие породы характеризуются как скальные, устойчивые.

Категория буримости для богатых руд составляет XIII–XV, для бедных – XI–XIII, вмещающих пород – X–XII. Основные физико-механические свойства пород, слагающих месторождение «Сарылах», представлены в табл. 2.

Для подземной разработки рудных тел месторождения «Сарылах» приняты две системы разработки: с магазинированием руды (основная) и подэтажных штреков. При системе с магазинированием руды бурение шпуров осуществляют перфораторами «ПП-63», диаметр шпуров 43 мм, сетка бурения – 700х700 мм. Для системы подэтажных штреков бурение скважин осуществляется станком «НКР-100МА», диаметр скважин 105 мм, расстояние между рядами веев 2,6 м, с равным расстоянием между забоями скважин. Взрывные работы проводят с применением Аммонита №6ЖВ в качестве патрона боевика и Игданита.

Принята схема транспортирования из добычного блока погрузо-доставочной машиной Fabition FAML 2, емкость ковша 1,8 м³, осуществляется перегруз в скип ёмкостью 1,8–2,5 м³ и далее подъем по уклонам через бункер до транспортного штрека, а затем рудная масса выдается на поверхность через главный ствол вагонетками с ёмкостью кузова 2,2 м³.

Для переработки золото-сурьмяных руд применяется гравитационно-флотационная схема обогащения. Соглас-

но технологической схеме сурьма извлекается методом флотации в виде сульфидного концентрат-антимонита, а свободная часть золота извлекается гравитацией в «золотую головку», при этом часть золота переходит во флотационный сурьмяный концентрат.

Технологическая схема обогащения руд отличается довольно высокой сложностью, можно условно выделить три блока в технологической схеме обогащения руд: основной блок, где производится рудоподготовка и классификация измельченного материала; затем цикл основной гравитации с получением конечных товарных концентратов, подлежащих дальнейшей доводке, и далее шламовый цикл, где после операций классификации выводятся шламовые фракции хвостов гравитации, которые направляются в отделение флотации.

Важной особенностью принятой технологии обогащения руд на Сарылахской обогатительной фабрике является максимально невысокий уровень выхода конечных гравеоконцентратов – 0,03–0,05%, при относительно большой разветвленной схеме гравитационного обогащения (комплекс перемешивания и контрольных операций с циркулированием потоков после двухстадийного измельчения), что обусловлено исключительно потребностями извлечения гравитационного золота в свободном виде. Извлечение сурьмы гравитационным методом не предусмотрено, а гравеоконцентрат по сурьме товарного значения не имеет, так как основная масса сурьмы извлекается флотацией.

Отходами технологического процесса обогащения на стадии первичной переработки руд являются отвальные хвосты двух видов – хвосты третьей контрольной флотации и слив сгустителя товарного концентрата, которые в ходе технологического процесса объединяются и складываются в виде пульпы в хвостохранилище. Технологические потери сурьмы с отвальными хвостами составляют по массе 9%, в них потерь золота – 18%, условное содержание золота в хвостах фабрики составляет 1 г/т, сурьмы – 0,7%. Попутные ценные ископаемые и полезные компоненты при обогащении отсутствуют. Помимо золота и сурьмы ни один из ценных компонентов не образует промышленных концентраций. Ввиду того что месторождение Сарылаха имеет богатую историю разработки, растянутую во времени (месторождение было выявлено в 1966 г.), хвостохранилище предприятия использовалось не только для нужд обогатительной фабрики Сарылах, но и для использования артелями в ранние периоды освоения месторождения, где после грохочения в хвосты попадает золото, а также при настройке цикла обогащения самодостаточность фабрики входят хвосты с повышенным содержанием сурьмы. Таким образом, Сарылахское хвостохранилище имеет значительный потенциал для повышения эффективности эксплуатации из-за изучения свойств руд и техногенного сырья. Достаточно высокое базовое содержание в рудах золота и сурьмы и несовершенные в ранние периоды освоения месторождения технологии переработки рудной массы определяют целесообразность изучения технологии переработки техногенного сырья для эксплуатации в комплексе с базовой разработкой месторождения².

Близрасположенное и схожее по минерализации Сентачанское полиметаллическое месторождение представлено тремя промышленными рудными телами, два из них приурочены к Центральной рудовмещающей зоне и одно к оперяющей ее системе тектонических разломов. Морфологически все рудные зоны относятся к жилам, выполненным

2 Проектная документация «Рудник Сарылах». МСК; 2023.

в трещинах разрыва. Минеральный тип руд – антимонит-золото-рудный. Рудное тело 1 представляет собой мало-мощную кварц-антимонитовую жилу прерывистой, сложноветвящейся морфологии, залегающей среди слабодробленых алевролитистых песчаников. Средняя мощность жили составляет около 1 м.

Месторождение расположено в криолитозоне, не склонно к горным ударам, не относится к опасным по выбросу газа и пыли. Основные типы вмещающих пород – алевролиты, алевролитовые песчаники.

Для подземной отработки рудных тел месторождения Сентачан приняты системы разработки: с магазинированием руды (основная) и подэтажных штреков. Для систем с магазинированием руды бурение шпуров осуществляют перфораторами «ПП-63», диаметр шпуров 43 мм, расположенных по сетке 1000 x 1000 мм. Для системы подэтажных штреков бурение скважин осуществляется станком НКР-100МА, диаметр скважины 105 мм, расстояние между верами скважин 2 м. При этом расстояние между забоями скважин около 1 м.

Взрывные работы проводят с применением традиционного для северных регионов Аммонита №6ЖВ в качестве патрона боевика и Игданита, зарядка скважин осуществляется пневмозарядчиками.

Для разработки месторождения принята транспортная схема, с транспортированием рудной массы из добычного блока погрузо-доставочной машиной Fabition FAML 2, емкость ковша – 1,8 м³, далее рудная масса перегружается в подземные самосвалы Fabition FAM 15, емкость кузова – 15 м³, и затем ими выдается на поверхность при среднем расстоянии транспортирования 5,5 км по транспортным уклонам³.

Основные факторы формирования потерь и разубоживания руд при освоении жильных месторождений, перспективные технологические решения

Факторы возникновения потерь и разубоживания руды при добыче

Нормативы эксплуатационных потерь и разубоживания руды для систем разработки с магазинированием и с подэтажными штреками существенно различаются ввиду принципиальных отличий в технологической схеме выемки руды. Здесь важно понимать, что показатели качества извлечения руд меняются в зависимости от конкретных горно-геологических условий.

К общерудничным потерям относят потери полезного ископаемого в предохранительных барьерных целиках и запасы, оставляемые в подработанных массивах, а также часть потерь, связанных с транспортировкой рудной массы как внутри шахты, так на поверхности до обоганительной фабрики.

Система разработки с магазинированием руды характерна для отработки маломощных рудных тел с крутым углом их падения, обеспечивающим выпуск руды самотеком. В этих условиях данная система разработки позволяет снизить до минимума потери и разубоживание руды.

При данной системе разработки отбитая руда накапливается (магазинируется) в очистном пространстве, служа одновременно рабочей площадкой для обурирования вышележащих запасов, является опорой для повышения устойчивости боковых пород. При данной системе разработки принято, что нормативные потери составляют 10–15%.

Основными источниками потерь при системе с магазинированием руды являются неизвлекаемые остатки в днище блока. При генеральном выпуске в подсечном штреке формируются воронки выпуска из отбитой руды, полностью извлечь которую безопасно невозможно. В процессе выпуска возникают значительные потери руды в результате смешивания её с вмещающими породами. При разработке тонких жил возможны потери из-за расклинивания пород висячего борта [3]. Также потери возникают в потолочине и межкамерных целиках, которые, как правило, не извлекаются.

При системе разработки с магазинированием руды обычно рассчитывается разубоживание в результате прирезки вмещающих пород на контактах рудных тел. Данная система позволяет обрабатывать тонкие жилы, часто жилы куда тоньше, чем разрешённая правилами безопасности выемочная мощность, из-за чего приходится извлекать вмещающие породы.

Разубоживание в результате выпуска разбуженной отбитой руды вследствие попадания в неё обрушенных вмещающих пород повышает потери качества рудной массы.

Система разработки с подэтажными штреками наиболее широко применяется при отработке крутопадающих рудных тел средней мощности. В сравнении с системой с магазинированием руды обладает рядом преимуществ: очистные работы ведутся из подэтажных выработок, при этом пребывание людей в опасной зоне очистного пространства не допускается; выпуск руды может вестись одновременно из нескольких подэтажей, это снижает концентрацию напряжений в массиве, вмещающем породы, и в рудной жиле, за счет этого повышается устойчивость подготовительно-нарезных выработок. Общий порядок отработки подэтажей нисходящий, сверху вниз, что снижает напряжения в опорных элементах горнотехнических комбинаций и вероятность проявлений горных ударов. Все это позволяет создать условия для более интенсивной и безопасной отработки выемочного блока.

Для систем разработки с подэтажными штреками характерны относительно большой удельный объем подготовительно-нарезных выработок, которые в дальнейшем требуется поддерживать весь срок отработки блока, и достаточно высокие ненормативные потери руды [4].

Основными источниками потерь руды являются потери в результате некачественной отбойки руды в блоке, неоптимального расположения скважин по контактам блока, сложная морфология жильных месторождений с неоднородной линией падения и простираения, уменьшающаяся мощность рудного тела. Специфика отбойки руды скважинами не позволяет быстро выпускать отбитую рудную массу и корректировать параметры буровзрывных работ, исключив влияние локального раздува жилы на потери руды, иначе при увеличении количества вееров взрывных скважин произойдет значительное разубоживание руды. Как и при системе с магазинированием руды, дополнительные потери возникают также при выпуске руды и в предохранительных целиках [5].

Значительным отличием применения систем разработки с подэтажными штреками от систем с магазинированием руды является более высокая интенсивность отбойки руды, при этом увеличивается и удельный расход взрывчатых материалов, более интенсивное воздействие массивов вмещающих пород ведет к активному отслаиванию лежащего и висячего боков и, как следствие, к повышенному разубоживанию руды.

3 Проектная документация «Рудник Сентачан». МСК; 2023.

Факторы возникновения потерь при транспортировании и переработке руд

При перемещении руды с вмещающими породами в пространстве основные потери возникают в ходе транспортирования рудной массы в местах ее загрузки, перегрузки и перевалки. Для железнодорожного транспорта наиболее узким местом является место загрузки вагона, повороты, смены сечения транспортных выработок. При использовании подземных автосамосвалов потери полезных ископаемых возникают при транспортировании руды по подземным уклонам, спиральным съездам или по участкам со сменой характеристик трассы в плане и в профиле [6].

При анализе транспортировки руды до обогатительной фабрики условно выделяются механические потери (просыпи), которые возникают при перевозке рудной массы любым видом транспорта. Причинами этих потерь чаще всего служат зоны перегрузки на транспортных сосудах, износ кузовов, плохая стыковка или прорывы конвейерных лент, а также просыпи в точках разгрузки и перегрузки руды. Норматив потерь руды при транспортировании находится в интервале от 0,2% для конвейерного транспорта до 1,5% для самоходного автотранспорта.

Кроме того, так как рассматриваемые месторождения территориально расположены в районах Крайнего Севера, возникают потери от налипания к транспортным сосудам и намерзания горной массы. Влажная и глинистая руда обычно прилипает к стенкам кузова, ковша и конвейерной ленты, не выгружаясь полностью, а в зимний период ситуация усугубляется намерзанием, когда толстый слой руды смерзается и остается в транспортном сосуде, для руд с высокой природной влажностью данные потери могут достигать 1,5%.

Оценивая потери при обогащении полиметаллических руд, следует учитывать, что на рассмотренных месторождениях применяют гравитационно-флотационную схему обогащения. Высокие потери ценных компонентов при использовании гравитационно-флотационных схем обогащения являются комплексной проблемой, обусловленной как свойствами самого минерального сырья, так и необходимостью совершенствования технологических параметров процессов добычи и переработки руд. Основные факторы потерь можно условно разделить на две группы: связанные с гравитационным обогащением и связанные с последующей флотацией.

На стадии гравитационного обогащения основная задача заключается в выделении тяжелых и относительно крупных зерен полезного компонента, при этом величина потерь определяется следующими факторами. Если ценные минералы не удалось отделить во время дробления и измельчения от пустой породы, эффективность их разделения методами гравитации существенно снижается и вместе с пустой породой ценные компоненты уходят в хвосты либо в промежуточные продукты, что приводит к прямым потерям или необходимости введения дополнительного цикла переработки.

При измельчении руды неизбежно образуются шламы. Из-за малой плотности они практически не извлекаются на концентрационных столах, винтовых сепараторах и других аппаратах гравитационного обогащения, а уносятся с водным потоком в хвосты. Основой гравитационного разделения является контраст в удельном весе полезных компонентов и пустой породы. При близких значениях плотности эффективность процесса гравитации резко па-

дает, что приводит к потерям ценных компонентов в хвостах.

Методы флотации, используемые для доизвлечения тонких классов минералов, также сопровождаются достаточно высокими потерями и требуют значительных затрат. Шламовые частицы оказывают наиболее сильное негативное влияние на результаты флотации. Из-за высокой удельной минеральной поверхности они интенсивно поглощают флотационные реагенты, снижая их концентрацию в пульпе. Кроме того, тонкодисперсные частицы шлама часто адсорбируются на поверхности более крупных зерен, препятствуя их контакту с пузырьками воздуха. Это ведет не только к потере металлов, но и к ухудшению качества товарного концентрата.

Излишнее дробление минеральных агрегатов способствует дополнительному их раскрытию, но при этом сопровождается образованием избыточного количества тонких шламовых частиц. Слишком мелкие зерна полезных компонентов из-за малой массы плохо прикрепляются к воздушным пузырькам и переходят в хвосты, снижая показатели извлечения.

При наличии в исходном сырье минералов с близкими флотационными характеристиками, селективность разделения минералов резко снижается. Это приводит либо к потерям ценных минералов в хвостах, либо к повышенному содержанию примесей в концентрате, что снижает его товарное качество.

Ошибки в реагентном режиме. Подбор типа и дозировки собирателей, пенообразователей и депрессоров определяет эффективность флотации. При недостаточном введении реагентов часть ценных минералов не гидрофобизируется и не переходит в концентрат. При их избытке процесс становится неселективным, что также вызывает потери и загрязнение концентрата.

Анализ потерь при переработке Сарылахской обогатительной фабрики показал, что потери золота по схеме происходят исключительно за счет свободного золота, размерность которого меньше 0,044 мм, а также за счет переизмельченных золотин и нераскрытого тонко-вкрапленного золота, связанного с кварцем.

Совместно с этим свободное золото мелких фракций, которое не извлекается в гравито-концентраты, способно циркулировать по гравитационной схеме обогащения, что приводит к увеличению содержания золота в циркуляционной нагрузке мельниц за периоды безостановочной работы фабрики и требует определенных технологических решений вывода из технологического цикла промпродуктов в отдельное производство. Накопление мелкого циркулирующего золота в технологической схеме гравитационного обогащения фабрики связано с переизмельчением или диспергированием золота в процессе многократного циркулирующего измельчения. В частности, было подтверждено, что при циклическом измельчении на лабораторной шаровой мельнице уровень извлечения золота в гравито-концентрат имеет тенденцию к снижению от 33,72 до 18,24% прежде всего за счет увеличения доли золота в тонких классах, более половины которого составляют фракции $-0,044$ мм.

Перспективные решения по снижению потерь и разубоживания руды

При добыче руды системой разработки с магазинированием для снижения разубоживания и риска расклинивания руды в блоке при выпуске при выявлении крупноблоч-

ной сланцеватости следует применять предварительное анкерное крепление пород висячего бока, использовать фугасные заряды в местах формирования воронок выпуска для полноты извлечения запасов блока.

При добыче руды системой разработки с подэтажными штреками следует оптимизировать параметры буровзрывных работ в привязке к конкретным горно-геологическим условиям с учетом результатов опытно-промышленных испытаний с варьированием параметров межэтажных целиков, длины и диаметра скважин, определением реальной линии наименьшего сопротивления, испытанием инновационных конструкций скважинных зарядов. При разбуривании блоков с учетом перспективы расширений рудного тела в контурные скважины целесообразно применять заряды меньшей мощности, массы, оптимизировать очередность взрывания преимущественно в направлении от центра к контактам рудного тела [7; 8].

Также предложено при транспортировке руды по горным выработкам на автосамосвалы наваривать с четырех сторон «kozyрьки» для поднятия борта кузова, при этом грузоподъемность самосвала не увеличивается, но сокращается объем просыпи руды на трассе. При этом необходимо постоянно поддерживать приемлемое качество дорог. Для транспортировки руды до обогатительной фабрики после загрузки использовать высотный ограничитель для сбивки «горки» в кузове.

При переработке руды для минимизации потерь минерального сырья в процессе переработки по гравитационно-флотационной схеме требуется комплексный подход, направленный на совершенствование параметров и решений отдельных технологических стадий и повышение согласованности работы оборудования за счет внедрения автоматизации как отдельных процессов, так и всего технологического цикла [9].

Установлено, что применение гидроциклонов или спиральных классификаторов в замкнутом цикле с мельницей является одним из наиболее эффективных решений для оптимизации гранулометрического состава перерабатываемого сырья. Такая схема позволяет выделять материал, достигший требуемой степени измельчения, и осуществить его своевременный вывод из дальнейшего измельчения. Частицы крупнее заданного размера возвращаются на повторное измельчение, что способствует формированию стабильного гранулометрического состава. В результате снижается избыточное образование шламов и засчёт этого повышается эффективность последующих стадий гравитационного и флотационного обогащения.

Использование комбинированных схем, включающих магнитную или электрическую сепарацию, тонкую классификацию и контрольные стадии флотации, позволяет повышать полноту извлечения металлов.

При гравитационном обогащении для повышения эффективности процесса требуется оперативная корректная настройка рабочих параметров: расхода воды, частоты пульсаций в отсадочных аппаратах, скорости вращения ротора и давления флюидизирующей воды в центробежных концентраторах.

Флотационный процесс отличается высокой чувствительностью как к химическому, так и к физическому состоянию пульпы. Для совершенствования процесса требуется индивидуальный подбор собирателей, вспенивателей и депрессоров применительно к минеральному составу рудной массы. Наиболее результативной являлась комби-

нация лабораторных исследований и промышленных испытаний. Автоматизация дозировки реагентов позволяет поддерживать их оптимальную концентрацию в пульпе.

Для полноты освоения и комплексного освоения месторождений следует непрерывно проводить дополнительные геологические изыскания для доизвлечения попутных компонентов из техногенных образований.

Выводы

В результате проведенного исследования были выявлены ключевые факторы формирования потерь и разубоживания при различных системах разработки крупных месторождений полиметаллических руд Южной Якутии. Определены специфические особенности влияния горно-геологических условий на показатели извлечения ценных компонентов при добыче руд. Предложены технологические рекомендации по снижению количественных и качественных потерь при добыче и переработке руд. Установлено, что техногенное сырье (хвосты обогащения) обладает значительным потенциалом для повторного извлечения ценных компонентов, однако его вовлечение в эксплуатацию требует обеспечения единства правового и технического регулирования вопросов эксплуатации.

Анализ техногенных образований показал значительный ресурсный потенциал хвостов обогащения. Содержание ценных компонентов составило: цинк – 0,3%, свинец – 0,2%, серебро – 19 г/т (Верхне-Менкече); золото – 1 г/т, сурьма – 0,7% (Сарылах). Эти данные подтверждают целесообразность комплексной переработки техногенных материалов [10].

Для минимизации потерь предложен комплекс инженерно-технических мероприятий: для системы с магазинированием руды: использование анкерного крепления висячего бока при наличии крупноблочной сланцеватости; применение фугасных зарядов в точках формирования воронок выпуска для увеличения полноты извлечения блоков. При системе подэтажных штреков: оптимизация параметров буровзрывных работ через опытно-промышленные испытания с изменением длины и диаметра скважин; применение зарядов пониженной мощности в контурных скважинах; направленное взрывание от центра рудного тела к контактам жил.

Транспортировка: установка защитных козырьков на автосамосвалы для снижения просыпей; использование высотных ограничителей при загрузке; поддержание качества дорог.

Переработка руды: внедрение замкнутых циклов измельчения с гидроциклонами для оптимизации гранулометрического состава; автоматизация дозировки флотационных реагентов; использование комбинированных схем обогащения с магнитной и электрической сепарацией.

Полученные результаты расширяют теоретическую базу по оценке потерь минерального сырья при комплексном освоении жильных месторождений полиметаллических месторождений и могут быть эффективно использованы в аналогичных горно-геологических условиях северных регионов.

Внедрение предложенных решений позволит повысить сквозное извлечение металлов на 3–5%, что при текущих ценах обеспечит положительный экономический эффект. Комплексная переработка техногенных образований создает возможности расширения ресурсной базы месторождений.



Список литературы / References

1. Вохмин С.А., Брагин В.И., Курчин Г.С., Ананенко К.Е., Требуш Ю.П. Нормирование разубоживания при добыче полезных ископаемых. *Маркшейдерия и недропользование*. 2016;(2):43–46.
Vokhmin S.A., Bragin V.I., Kurchin G.S., Ananenko K.E., Trebush Yu.P. Rationing dilution during mining. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2016;(2):43–46. (In Russ.)
2. Курчин Г.С., Ананенко К.Е., Прокопьев И.В., Кирсанов А.К. Методические основы нормирования потерь и разубоживания при добыче с учетом их влияния на технологические показатели при обогащении. *Маркшейдерия и недропользование*. 2017;(6):55–59.
Kurchin G.S., Ananenko K.E., Prokopiev I.V., Kirsanov A.K. Methodical bases for normalization of losses and impoverishment during production with the account of their impact on technological data during treatment. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2017;(6):55–59. (In Russ.)
3. Мельниченко А.М. Особенности оценки разубоживания руд при подземной разработке маломощных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016;(1):408–412. Режим доступа: https://www.giab-online.ru/files/Data/2016/1/408_412_1_2016.pdf (дата обращения: 19.07.2025).
Mel'nichenko A.M. Special aspects of dilution evaluation in underground mining of thin deposits. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2016;(1):408–412. (In Russ.) Available at: https://www.giab-online.ru/files/Data/2016/1/408_412_1_2016.pdf (accessed: 19.07.2025).
4. Туртыгина Н.А., Охрименко А.В., Фролов Н.А., Мельницкая М.Е. Влияние системы разработки на потери и разубоживание при подземной добыче вкрапленных руд. *Научный вестник Арктики*. 2023;(15):5–14.
Turtygina N.A., Okhrimenko A.V., Frolov N.A., Melnitskaya M.E. The influence of the development system on losses and dilution during underground extraction of interspersed ores. *Nauchnyi Vestnik Arktiki*. 2023;(15):5–14. (In Russ.)
5. Delentas A., Benardos A., Nomikos P. Analyzing stability conditions and ore dilution in open stope mining. *Minerals*. 2021;11(12):1404. <https://doi.org/10.3390/min11121404>
6. Xingwana L. Monitoring ore loss and dilution for mine-to-mill integration in deep gold mines: A survey-based investigation. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2016;116(2):149–160. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2016/v116n2a6>
7. Арно В.В., Колесниченко Е.П., Гарифулина И.Ю., Гузенко А.Д. Мероприятия по снижению потерь и разубоживания руды при подземной добыче. *Наукофера*. 2025;(6-1):235–238. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15632582>
Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Guzenko A.D. Measures to reduce losses and dilution of ore during underground mining. *Naukosfera*. 2025;(6-1):235–238. (In Russ.) <https://doi.org/10.5281/zenodo.15632582>
8. Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Рожков А.А., Никитин И.В., Соломеин Ю.М. Исследование влияния показателей извлечения на эффективность подземной отработки месторождений бедных комплексных руд. *Горная промышленность*. 2022;(1S):46–52. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1S-46-52>
Antipin Yu.G., Baranovsky K.V., Rozhkov A.A., Nikitin I.V., Solomein Yu.M. Research of extraction indicators influence on the efficiency of underground mining of low-grade complex ore deposits. *Russian Mining Industry*. 2022;(1S):46–52. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1S-46-52>
9. Евдокимов С.И., Евдокимов В.С. Повышение извлечения золота на основе совместной переработки руды и отходов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017;(2):160–169.
Evdokimov S.I., Evdokimov V.S. Enhanced gold recovery based on joint ore and waste processing. *Journal of Mining Science*. 2017;53(2):358–366. <https://doi.org/10.1134/S1062739117022236>
10. Кузнецова Е.А., Мишенин М.В., Филимонова И.В., Саматова А.П. Техногенные месторождения как объект недропользования. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(1):5–15. <https://doi.org/10.56195/2079-3332-2025-25-1-5-15>
Kuznetsova E.A., Mishenin M.V., Filimonova I.V., Samatova A.P. Technogenic deposits as an object of subsoil use. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(1):5–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.56195/2079-3332-2025-25-1-5-15>

Информация об авторах

Сребродольский Ярослав Александрович – аспирант, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: yasrebrodolskiy@grmining.ru
Швабенланд Елена Егоровна – кандидат технических наук, заведующий сектором анализа проектов на разработку месторождений цветных, редких, благородных металлов, Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: shvabenland@vims-geo.ru
Курчин Георгий Сергеевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры шахтного и подземного строительства, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация; e-mail: kurchings@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 03.08.2025
Поступила после рецензирования: 15.10.2025
Принята к публикации: 21.10.2025

Information about the authors

Yaroslav A. Srebrodolskiy – Postgraduate Student, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: yasrebrodolskiy@grmining.ru
Elena E. Shvabenland – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Sector of Projects Analysis for the Development of Non-Ferrous, Rare, and Noble Metal Deposits, N.M. Fedorovsky All-Russian Research Institute of Mineral Resources (VIMS), Moscow, Russian Federation; shvabenland@vims-geo.ru
Georgy S. Kurchin – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor, Department of Mine and Underground Construction, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation; e-mail: kurchings@mail.ru

Article info

Received: 03.08.2025
Revised: 15.10.2025
Accepted: 21.10.2025