

УДК 622.7

**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ИСХОДНОГО СЫРЬЯ
ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК**

С. В. Терещенко, Д. Н. Шibaева

Горный институт КНЦ РАН,

E-mail: sertereshchenko@mail.ru, ул. Ферсмана 24, 184209, г. Апатиты, Россия

Представлен алгоритм, обеспечивающий выбор технологии формирования регламентируемого качества питания процессов обогащения, основанный на оценке распределения полезного компонента в исследуемом объеме и количества слагающих его пустых пород. Заданное содержание полезного компонента реализуется сочетанием усреднительного и сепарационного принципов на дробленой руде крупностью менее 100 мм. Показано, что такой подход к формированию качества руды позволяет обеспечить регламентируемое содержание P_2O_5 в питании процессов обогащения на уровне 12.1–12.3 % и удалить в отвалы не менее 29 % пустых пород класса крупности –100+20 мм с содержанием P_2O_5 менее 1.9 %. Установлено положительное влияние применения представленной технологии управления качеством бедных апатитосодержащих руд на экологическую обстановку в районе горно-перерабатывающих предприятий.

Управление качеством руд, формирование эффективных технологических схем, усреднение, предконцентрация, рентгенолюминесцентная сепарация

DOI: 10.15372/FTPRPI20220114

Изучение геологических данных и опыта эксплуатации месторождений твердых полезных ископаемых показало преобладание неравномерного пространственного распределения полезных компонентов (ПК) как в границах месторождений, так и в отдельных добычных единицах. Особенно ярко это проявляется при эксплуатации сложноструктурных месторождений, для которых определение четких границ расположения рудного тела практически невозможно, поскольку густая сеть скважин эксплуатационной разведки экономически нецелесообразна. При извлечении полезных ископаемых из недр прогноз качественных характеристик становится вероятностным, что подтверждается широким диапазоном качественных характеристик руды, поступающей на обогащение. Инерционность обогатительных процессов при нестабильном их питании, учитывая современный уровень автоматизации, скажется на основных технологических показателях — содержании и выходе товарного продукта, потерях ПК с отходами производства. Данная проблема подтверждает необходимость стабилизации качества руд непосредственно перед их обогащением. Наиболее распространенным методом, применяемым на горно-обогатительных предприятиях, является усреднение, формирующее рудопоток стабильного состава посредством усреднительных складов. Пример успешного применения такого принципа формирования качества руды — Воронцовский золоторудный карьер ЗАО «Золото Северного

Урала”, использующий системы автоматизированного управления качественными характеристиками рудопотоков и данные спутниковой навигации [1]. В [2–7] описаны программные продукты, обеспечивающие возможность формирования требуемых параметров рудопотоков. Однако решить задачу стабилизации и поддержания содержания ПК на регламентируемом уровне с учетом допустимых отклонений только методом усреднения (при использовании валовой технологии отработки запасов с применением высокопроизводительного добычного оборудования, способствующего повышению уровня разубоживания добытой рудной массы, а также вовлечению в отработку запасов бедных руд) без снижения качества рудопотока, направляемого на обогащение, невозможно. Вся добытая разнокачественная горная масса вместе с разубоживающими пустыми породами благодаря усреднению, хотя и в разное время, но попадает на обогатительную фабрику.

В [8] при разработке мелких рудных месторождений предлагается разделять месторождения на разнокачественные участки и далее реализовывать их отработку с использованием передвижных модульных установок, способствуя процессам рудоподготовки и обогащения в соответствии с установленными типосортами.

На примере отработки сложноструктурного месторождения Хибинского массива сделан сравнительный анализ возможных технологий формирования качества рудопотока, использующих только селективную выемку и селективную выемку в сочетании с процессами разделения рентгенолюминесцентной (РЛ) сепарацией и усреднения.

На рис. 1 показаны созданные в системе MineFrame [9–10] две добычные единицы, подготовленные к отбойке. Предложено реализовать технологические операции по переработке рудной массы, используя либо селективную, либо валовую отработку с последующим управлением качеством посредством усреднительного и разделительного принципов. Возможность блочного моделирования в программном комплексе MineFrame позволила сформировать сортовые участки: рудные, представленные апатитсодержащими рудами с включениями в контуре рудного тела пустых и слабоминерализованных пород, и породные, сложенные исключительно вмещающими породами. Границы участков проходят по плоскостям, максимально приближенным к контактам рудного тела в нижней и верхней площадках уступа.

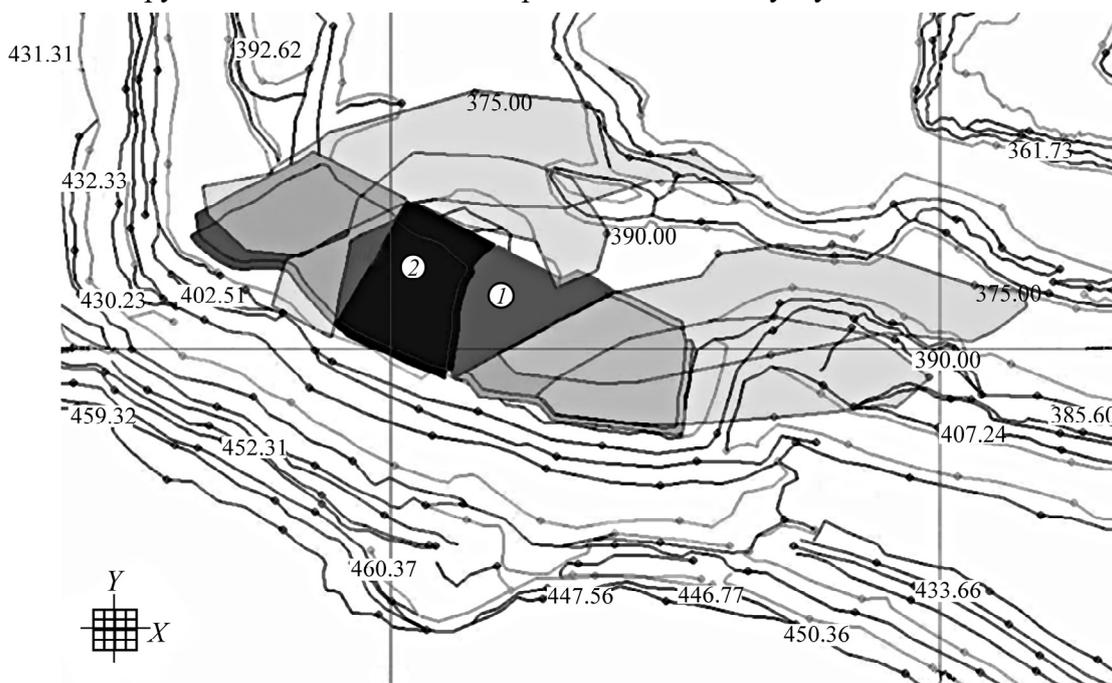


Рис. 1. Схема расположения добычных единиц и рудных тел в системе MineFrame

Количественная оценка объемов и качества добычных единиц, в контур которых попадает значительное количество вмещающих пород (35.9 и 44.5 % для первой и второй соответственно) представлена в табл. 1. В показанных объемах не учтены пустые и слабоминерализованные породы, включенные в контуры рудных тел.

ТАБЛИЦА 1. Характеристика добычных единиц

Участок	Добычная единица 1			Добычная единица 2		
	Содержание P ₂ O ₅ , %	Объем		Содержание P ₂ O ₅ , %	Объем	
		м ³ ·10 ³	%		м ³ ·10 ³	%
Рудный, в том числе:	7.17	36.9	64.1	9.77	36.8	55.5
апатитсодержащая руда	10.56	25.1	43.5	20.69	17.4	26.2
пустые породы в контуре рудного тела	1.25	11.8	20.6	1.25	19.4	29.3
Породный	1.25	20.8	35.9	1.25	29.5	44.5
Итого	4.53	57.7	100	5.47	66.3	100.0

Использование селективной выемки позволит повысить содержание пятиоксида фосфора в первой добычной единице с 4.53 до 7.17 % P₂O₅ (в 1.58 раза), во второй — с 5.47 до 9.77 % P₂O₅ (в 1.77 раза). Одним из вариантов, обеспечивающих повышение эффективности селективной выемки, является взрывоселекция, в результате которой под действием взрыва реализуется перемещение руды и пород в разные участки навала [11]. Однако даже в идеальном случае расположения рудных и породных объемов в отбитой рудной массе анализируемых добычных единиц достигнутое увеличение содержания P₂O₅ в рудопотоках не соответствует регламентированному уровню 12 – 13 % P₂O₅.

Повысить содержание полезного компонента позволит применение процесса предконцентрации на апатитсодержащих рудах, реализуемого посредством рентгенолюминесцентной сепарации. Это обеспечит удаление из рудопотока породных включений, представленных вмещающими и пустыми породами, которые находятся в контурах рудного тела. Обогащенный продукт предконцентрации сформирован только апатитсодержащей рудой с повышенным содержанием полезного компонента: в 2.33 раза (4.53 – 10.56 % P₂O₅) для первой и в 3.78 раза (5.47 – 20.69 % P₂O₅) для второй добычных единиц. Полученные качественные характеристики позволяют сформировать рудопоток с заданным содержанием ПК (13.0 % P₂O₅), применив дополнительно операцию усреднения путем объединения всего объема обогащенной руды добычной единицы 1 и 46 % обогащенной руды из добычной единицы 2. Процесс усреднения может быть реализован как на усреднительном складе, так и непосредственно в рамках сепарационного комплекса (рис. 2) с помощью формирования системы сортовых бункеров и дозаторов, регулирующих объемы выпуска. Необходимо отметить, что качественные и количественные результаты по обоим вариантам выемки запасов несколько идеализированы, в особенности для селективной выемки. При реализации процессов предконцентрации разделение происходит на основе анализа каждого куска, что свидетельствует о возможности максимально полного выделения породной составляющей и минимизации потерь полезного компонента с отходами сепарации. В [11 – 16] показано, что эффективность селективной выемки в большей мере зависит от информации о распределении полезного компонента по массиву [6]. Отсутствие оперативности получения данных о содержании полезного компонента в руде — питании обогатительной фабрики (ОФ), особенно в случае неравномерного распределения полезного ископаемого, колебания содержания ПК в пределах, превышающих допустимые значения, — негативно сказываются на технологических показателях: содержании и выходе товарного продукта, увеличивая потери ПК с отходами производства.

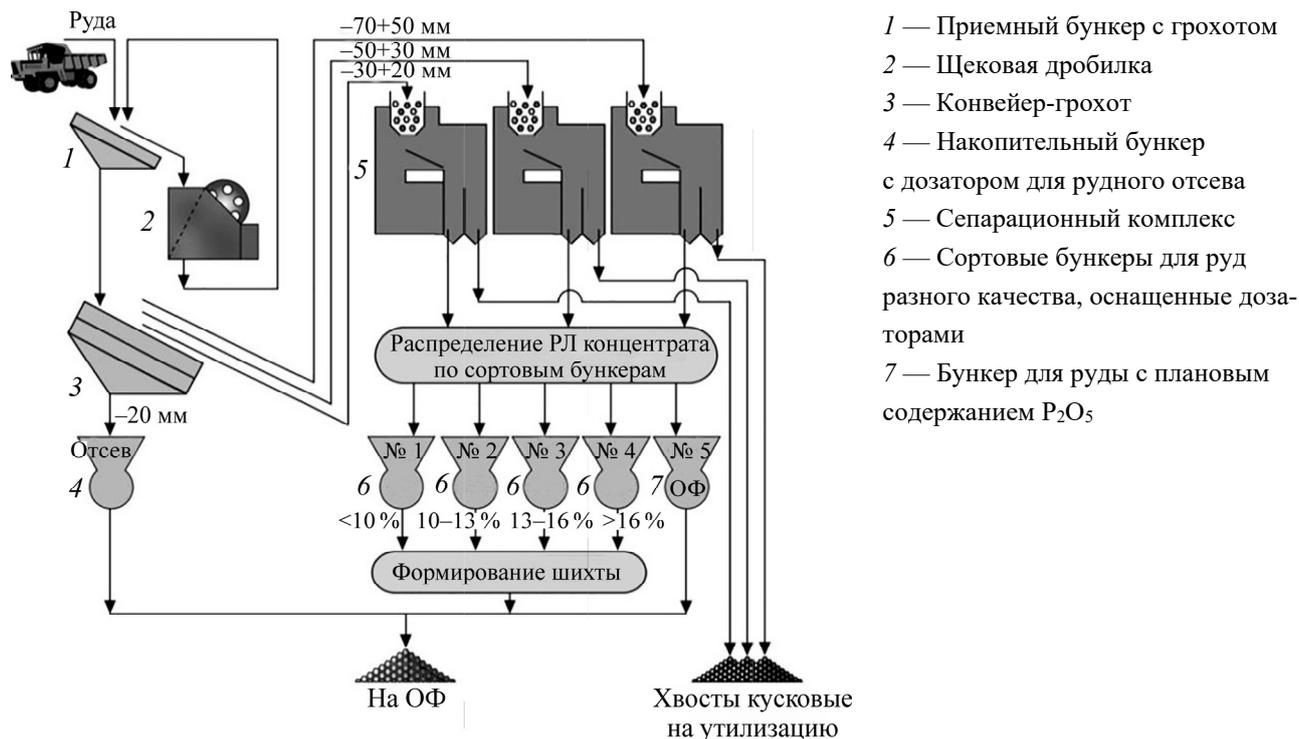


Рис. 2. Схема формирования качества рудной массы на сепарационном комплексе

Необходимость стабилизации качества рудопотока, поступающего на обогащение, и обоснованного выбора технологии для его реализации приводит к систематизации существующих подходов формирования качества рудной массы перед процессами переработки. Поиск дополнительных решений при использовании высокопроизводительного оборудования позволит и в весьма сложных условиях залегания запасов, и в ситуации с пониженным (по отношению к регламентируемому) содержанием полезного компонента обеспечивать высокие объемы добытой руды и низкие затраты на добычу [17].

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СТАБИЛИЗАЦИИ КАЧЕСТВА ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО

Для анализа эффективности применения процессов предконцентрации использованы два критерия: показатель контрастности M , характеризующий распределение полезного компонента в исследуемом объеме, и показатель наличия пустых пород N . Качественная оценка рудной массы основана на значениях содержаний полезных ископаемых, принятых на предприятии при анализе соответствия рентабельности эксплуатации запасов полезного ископаемого и эффективности его переработки.

На рис. 3 представлена блок-схема, систематизирующая процесс формирования качества добытой рудной массы для обогащения. Одним из важнейших параметров, определяющих работу горно-перерабатывающего предприятия, является содержание полезного компонента в добываемых рудах. Необходимость поддержания его значения в установленных пределах (на уровне заданного обогатительной фабрикой качества с минимальным размером колебаний) обусловлена инерционностью обогатительного производства, сложностью оперативного внесения изменений в технологический процесс.

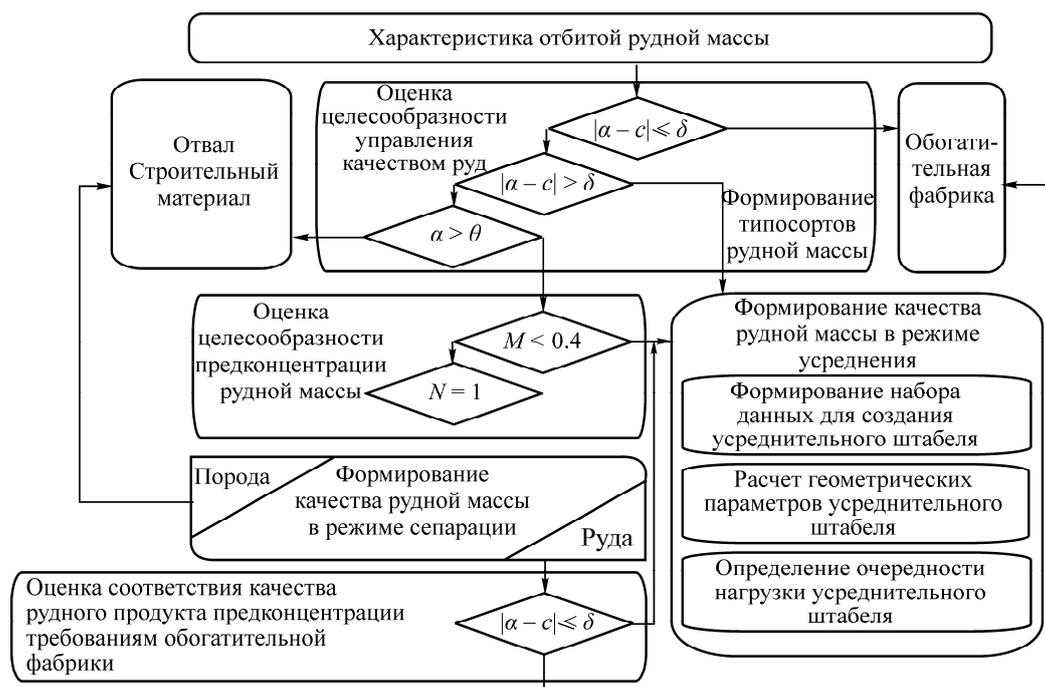


Рис. 3. Блок-схема алгоритма управления качеством руд: α — исходное содержание полезного компонента; c — регламентируемое содержание полезного компонента; δ — среднеквадратичное отклонение содержания ПК; θ — бортовое содержание ПК; M — показатель контрастности; N — показатель наличия пустых пород

Среднеквадратичное отклонение δ (СКО) — количественный критерий изменчивости качественных характеристик руды, поступающей на обогащение. Значение СКО принимается из условия обеспечения наилучших возможных технологических показателей (максимально возможного выхода товарного продукта соответствующего качества и минимальных потерь полезного компонента с отходами производства) и минимальных экологических последствий. На уменьшение колебаний содержания ПК направлены технологические решения, способствующие повышению информации о распределении полезного ископаемого в массиве и отбитой рудной массе, а также стабилизации качества поступающей на переработку руды.

Определение типосортов руды и выбор применяемых для формирования качества принципов управления по разработанному алгоритму производится в процессе последовательной оценки характеристик руды в массиве по данным эксплуатационного опробования скважин и бурового шлама на карьере. При этом учитываются характеристики отбитой рудной массы: неравномерность распределения ПК, наличие пустых и слабоминерализованных пород, среднее содержание ПК в анализируемом объеме. Принимаются во внимание условия, накладываемые горно-перерабатывающим предприятием: регламентируемое при добыче бортовое содержание ПК и содержание ПК в рудной массе, направляемой на обогащение и размер его среднеквадратичного отклонения.

Лабораторная апробация предложенного алгоритма проведена на разнокачественных пробах апатитсодержащей руды. Бортовое содержание P_2O_5 принято равным 4 %, регламентируемое содержание P_2O_5 — 12 %, значение СКО δ — 1 %. Схема формирования качества горной массы перед процессом ее обогащения представлена на рис. 4.

Применяя указанные в алгоритме условия и критерии оценки необходимости формирования качества перед процессами обогащения, определения эффективного способа повышения и стабилизации содержания полезного компонента в рудопотоке, направляемом на обогати-

тельную фабрику, установлено отсутствие целесообразности управления качеством руд объема № 2 в связи с соответствием регламентированному содержанию ПК — 12.1 % P_2O_5 ; отсутствие целесообразности управления качеством руд объема № 3, поскольку содержание ПК ниже бортового — 3.8 % P_2O_5 ; целесообразность формирования качества рудной массы объемов № 1 и 4 в режиме усреднения; целесообразность предконцентрации рудной массы объемов № 5 и 6.

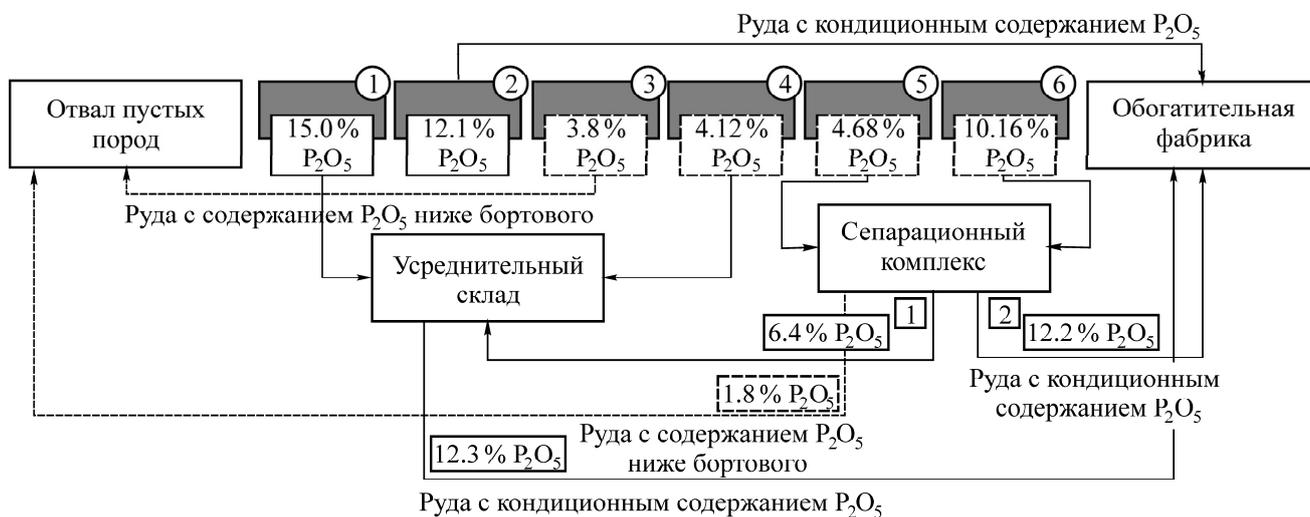


Рис. 4. Схема формирования качества горной массы перед процессом ее обогащения

Реализация процесса предконцентрации позволила повысить содержание P_2O_5 в обогащенном продукте для объемов № 5 в 1.4, для № 6 — в 1.2 раза. Оценка соответствия качества обогащенного продукта предконцентрации требованиям обогатительной фабрики (выполнение условия $|\alpha - c| > \delta$) свидетельствует о необходимости формирования обогащенного продукта 1 в режиме усреднения. Обогащенный продукт 2 с кондиционным, регламентированным содержанием ПК, равным 12.3 %, напрямую направляется на обогатительную фабрику. Хвосты предконцентрации, содержащие менее 2 % P_2O_5 , складировываются в отвал.

Таким образом, оценка исследуемого объема руды выявила не менее 29 % горной массы, представленной полностью и частично пустыми и слабоминерализованными породами (объемы № 3, 5 и 6), которые в кусковом виде целесообразно направить в отвал, минуя ОФ. При этом на обогатительную фабрику направляются рудопотоки стабильного качества, в которых содержание P_2O_5 соответствует регламентируемому уровню 12.1 – 12.3 %. Представленные результаты апробации предложенного алгоритма (рис. 3) свидетельствуют о возможности его применения на этапах планирования горных работ, учета повышения и стабилизации качества посредством комбинации разделительных и усреднительных мероприятий.

ВЛИЯНИЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ РУД НА РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРЕРАБОТКИ

В результате проведенных исследований на пробах апатит-нефелиновой руды месторождения “Олений Ручей” (Мурманская область) [18–20] установлено, что за счет включения процессов предконцентрации обеспечивается не только повышение содержания полезного компонента с сохранением объема извлечения его в апатитовый концентрат, но и улучшение вещественного состава руд, поступающих на флотацию, путем удаления из рудопотока пород, содержащих темноклетчатые минералы (табл. 2). Кроме того, пустые и слабоминерализованные породы, как правило, обладают повышенной крепостью по сравнению с рудой, поэтому при дроблении и измельчении обогащенного продукта предконцентрации наблюдается снижение энергоемкости этих процессов.

ТАБЛИЦА 2. Сравнительные показатели флотации исходной и предварительно обогащенной бедной апатит-нефелиновой руды месторождения “Олений Ручей”

Продукт	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃
Исходная руда					
Апатитовый концентрат	11.25	39.69	0.37	84.68	0.33
Тонкоизмельченные хвосты апатитовой флотации	88.75	0.91	14.19	15.32	99.67
Исходная руда	100.00	5.27	12.64	100.00	100.00
Обогащенная руда					
Апатитовый концентрат	11.38	40.17	0.30	84.69	0.27
Тонкоизмельченные хвосты апатитовой флотации	61.27	0.88	14.67	9.99	70.44
Кусковые хвосты предконцентрации	27.35	1.05	13.67	5.32	29.29
Исходная руда	100.00	5.40	12.67	100.00	100.00

Сравнительные результаты флотации исходной и предварительно обогащенной руды свидетельствуют о незначительных различиях в выходе апатитового концентрата и его качественных характеристиках. Выделение перед процессами обогащения пустых пород крупностью более 20 мм не вызвало повышения общих потерь полезного компонента. Для исходной руды с содержанием P₂O₅ 5.27 % извлечение P₂O₅ в концентрат составило 84.68 %, для обогащенной — 84.69 %. При этом в 1.45 раза снизилось количество тонкоизмельченных хвостов апатитовой флотации и, соответственно, уменьшилось их влияние на окружающую среду в районе горно-обогатительного комбината. По гранулометрическому составу они на 85–90 % представлены тонкодисперсной фракцией (0.25–0.05 мм), что позволяет им в сухом виде при скорости ветра 4–6 м/с полностью переходить в аэрозольное состояние и переноситься на десятки километров от источников пылевыделения [20]. Преимущество формирования кусковых отходов определяется технологиями складирования, приводящими к уменьшению занимаемых площадей, а также снижением затрат на эксплуатацию данных техногенных образований. Кроме того, возможно вторичное использование кусковых отходов предконцентрации в качестве щебня для строительных работ по различным направлениям как для обеспечения собственных потребностей, так и для реализации их стороннему потребителю.

ВЫВОДЫ

Предложенный подход к управлению качеством руд на этапе планирования добычных работ способствует формированию регламентируемого содержания полезного компонента в питании процессов обогащения, в том числе и из бедной руды, при использовании высокопроизводительных валовых технологий добычи полезного ископаемого. Для апатитсодержащих руд предложен алгоритм управления их качеством, состоящий из следующих этапов:

— качественная оценка рудной массы по значениям содержаний полезных ископаемых, принятых на предприятии при рассмотрении соответствия рентабельности эксплуатации запасов полезного ископаемого и эффективности его переработки;

— совместный анализ показателя контрастности руды (характеризующего неравномерность распределения полезного компонента в исследуемом объеме) и показателя наличия пустых пород, позволяющий сделать обоснованный выбор технологии формирования регламентируемого качества питания процессов обогащения с применением усреднительного и сепарационного принципов.

Показано, что такой подход способствует оптимизации технологии рудоподготовки, формированию типосортов и применению для каждого своего набора операций. Удаление в отвал перед процессами обогащения не менее 29 % пустых пород крупностью более 20 мм, содержа-

щих менее 1.9% P_2O_5 , позволило сформировать рудопоток регламентируемого качества на уровне 12.1–12.3% P_2O_5 . Установлено положительное влияние применения представленной технологии управления качеством для бедных апатитсодержащих руд на экологическую обстановку в районе горно-перерабатывающих предприятий. Вывод на ранней стадии кусковых отходов способствует уменьшению количества тонкоизмельченных хвостов обогащения с 88.7% до 61.3%, являющихся источником дополнительного химического загрязнения территорий, находящихся за границами, определенными для их складирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рыльников А. Г., Новиков А. Н.** Автоматизированная система управления качеством руды при добыче полезных ископаемых // Горн. журн. — 2015. — № 12. — С. 72–75.
2. **Zarubin M., Statsenko L., Zarubina V., and Fionin E.** Developing information systems of operation schedules to stabilize the grade of a mineral, *Min. Miner. Deposits*, 2017, Vol. 11. — P. 59–70.
3. **Галиев Д. А.** Повышение эффективности внутрикарьерного управления качеством руды с использованием новых информационных технологий: автореф. дисс. ... докт. фил. наук. — Алматы, 2018. — 9 с.
4. **Сапонов А. И., Смирнов А. П., Антонов В. В.** Оптимизация процесса разработки железорудного месторождения // Горн. журн. — 2010. — № 1. — С. 61–63.
5. **Баяк О. В., Штыкова И. В.** Способы формирования транспортных технологических схем рудопотоков на карьере // Материалы XIX Междунар. заочной научно-практической конф. “Инновации в науке”. — Новосибирск: СибАК, 2013. — С. 160–166.
6. **Адилханова Ж. А., Фарахов К. А.** Информационное обеспечение автоматизированной системы оперативного управления процессом рудоподготовки на открытых разработках // Докл. Всерос. науч. конф. с междунар. участием “Информационные технологии в горном деле”. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012. — С. 7–12.
7. **Зобнин Б. Б., Сурин А. А., Головырин С. С.** Автоматизированные системы управления усреднительными комплексами, конфликтные ситуации и способы их разрешения (Опыт построения автоматизированной системы участка усреднения концентратов на магнитогорском металлургическом комбинате) // Докл. Всерос. науч. конф. с междунар. участием “Информационные технологии в горном деле”. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012. — С. 53–58.
8. **Федоров Ф. М., Матвеев А. И., Ларионов В. Р., Горохова Л. Н.** Обоснование выбора порядка раздельной отработки разнокачественных участков мелких рудных месторождений // ГИАБ. — 2011. — № 12. — С. 48–55.
9. **Лукичев С. В., Наговицын О. В.** Компьютерная технология инженерного обеспечения горных работ при освоении месторождений твердых полезных ископаемых // Горн. журн. — 2010. — № 9. — С. 11–15.
10. **Ломоносов Г. Г.** Горная квалиметрия. — М.: МГГ, 2000. — 201 с.
11. **Шестаков В. А., Яковлев М. А., Дронов Н. В.** Оценка ущерба от потерь и разубоживания руды и установление их допустимого уровня. — Фрунзе: Илим, 1970. — 122 с.
12. **Шестаков В. А.** Научные основы выбора и экономической оценки систем разработки рудных месторождений. — М.: Недра, 1976. — 272 с.
13. **Агошков М. И., Никаноров В. И., Панфилов Е. И., Рыжов В. П., Синдаровская Н. Н., Шитарев В. Г.** Техничко-экономическая оценка извлечения полезных ископаемых из недр. — М.: Недра, 1974. — 312 с.

14. **Ермолин Ю. Н.** Результаты и направление исследований технологии селективной добычи и раздельной переработки руд // Селективная разработка полиметаллических месторождений открытым способом. — М., 1971. — С. 36–41.
15. **Боголюбов Б. П., Грачев Ф. Г.** Раздельная разработка месторождений сложного состава. — М.: Недра, 1964. — 138 с.
16. **Литовченко Т. В.** Технико-экономическое обоснование оптимальных рудопотоков и технологии подземной добычи многокомпонентных и разноразрядных руд: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Новочеркасск, 1999. — 19 с.
17. **Шестаков В. А.** Рациональное использование недр. — М.: Недра, 1990. — 233 с.
18. **Павлишина Д. Н.** Управление качеством руд с использованием радиометрических методов контроля содержания полезных компонентов (на примере месторождения “Олений Ручей”): автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Апатиты, 2016. — 27 с.
19. **Tereshchenko S. V., Shibaeva D. N., and Alekseeva S. A.** X-ray luminescence separation of Khibiny low-grade apatite ore, *J. Min. Sci.*, 2019, Vol. 55, No. 1. — P. 124–133.
20. **Стриженок А. В.** Управление экологической безопасностью намывных техногенных массивов ОАО “Апатит” в процессе их формирования: автореф. дис. ... канд. тех. наук. — СПб., 2015. — 21 с.

Поступила в редакцию 13/VII 2021

После доработки 10/X 2021

Принята к публикации 24/XII 2021