

УДК 622.73; 622.765

**РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ СЕПАРАЦИЯ В ЦИКЛЕ РУДНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ  
ПРИ ОБОГАЩЕНИИ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД**

**Е. А. Бурдакова<sup>1,2</sup>, В. И. Брагин<sup>1,2</sup>, Н. Ф. Усманова<sup>1,2</sup>, А. И. Вашлаев<sup>1,2</sup>,  
Л. С. Лесникова<sup>3</sup>, Л. Е. Дьяченко<sup>1</sup>, А. И. Фертиков<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>*Сибирский федеральный университет,*

*E-mail: kate-groo@yandex.ru, пр. Свободный, 79, 660041, г. Красноярск, Россия*

<sup>2</sup>*Институт химии и химической технологии СО РАН,*

*ул. Академгородок, 50, стр. 24, 660036, г. Красноярск, Россия*

<sup>3</sup>*ЗФ ПАО “ГМК “Норильский никель”, г. Норильск, Россия*

<sup>4</sup>*R&D Центр Норильского никеля, пр. Свободный, 83А, 660041, г. Красноярск, Россия*

Исследована рудная галля, сформировавшаяся в мельнице полусамоизмельчения при переработке медно-никелевых руд на Талнахской обогатительной фабрике. Ее основной объем представлен в классах  $-80+40$  и  $-40+20$  мм. Тесты по рентгенометрической сепарации на материале рудной галли показали возможность получения обогащенного продукта данным методом и хвостов сепарации. Определены прочностные свойства концентрата рентгенометрической сепарации, индекс измельчаемости Бонда. Представлены результаты флотационных исследований, проведенных на концентрате рентгенометрической сепарации.

*Вкрапленные медно-никелевые руды, самоизмельчение, рудная галля, рентгенометрическая сортировка, контрастность руды, флотация*

DOI: 10.15372/FTPRI20190515

Процессы сокращения крупности — наиболее энергоемкие среди процессов первичной переработки руд. В зависимости от свойств исходной руды в цикле измельчения тратится 40–65 % от общего энергопотребления при обогащении [1–4]. На большинстве крупных обогатительных фабрик мира, перерабатывающих руды цветных металлов, в первой стадии измельчения установлены мельницы самоизмельчения и полусамоизмельчения. Эффективность их работы зависит от стабильности физико-механических характеристик исходного сырья, соотношения крупных и мелких фракций в питании, количества исходного и образующегося при измельчении материала промежуточной крупности.

С учетом физико-механических свойств перерабатываемой руды при самоизмельчении может формироваться 10–30 % класса критической крупности (рудной галли), склонного накапливаться в барабане, снижая производительность мельницы. В современных схемах самоизмельчения решение этой проблемы достигается рациональной добавкой шаровой загрузки (до 10 % от объема мельницы) либо выводом рудной галли из мельницы и додрабливанием ее в дробилке мелкого дробления. Дробленый материал возвращается в питание мельниц или направляется на вторую стадию измельчения в шаровой мельнице, что позволяет перераспределить нагрузку между стадиями. В мировой практике обогащения есть примеры концентрирования полезных компонентов рудной галли мельниц самоизмельчения методом радиометриче-

ской сортировки. В [2, 5] обоснована эффективность применения метода радиометрической сортировки в узле самоизмельчения для увеличения пропускной способности мельниц, повышения технологических показателей обогащения.

На медно-никелевых рудах Норильского узла в разное время проводились исследования, направленные на интенсификацию процессов обогащения, с использованием энергетических воздействий, совершенствовались реагентные режимы с целью снижения потерь металлов платиновой группы с хвостами флотационного обогащения [6–8]. Исходное содержание меди и никеля в исходной руде влияет на количество и качество получаемых концентратов [9, 10].

В настоящее время на Талнахской обогатительной фабрике перерабатывают шихту, состоящую из богатой руды рудника “Скалистый”, богатой, медистой и вкрапленной руды рудника “Октябрьский”, богатой руды рудника “Таймырский”. Типы руд, входящие в состав шихты, отличаются вариативностью технологических свойств и прочностных характеристик, однако вовлечение их в переработку связано с необходимостью обеспечения плановой загрузки фабрики. Добавка в питание вкрапленных руд “Октябрьского” рудника (~ 5 % от шихты) способствует периодическому накоплению критического класса крупности  $-80 + 10$  мм в мельнице самоизмельчения. Различия в свойствах исходной шихты приводят к повышенному ошламованию, переизмельчению руд других типов (богатых и медистых), что сказывается на дальнейшей флотации.

Для удаления в голове технологической схемы Талнахской обогатительной фабрики обедненных кусковых фракций, обладающих повышенной крепостью, исследована возможность предварительного концентрирования рудной гали методом рентгенорадиометрической сепарации. Выделение крупнокусковых хвостов в операциях рудоподготовки способствует повышению производительности фабрики и снижению потребления электроэнергии. Помимо определения ожидаемых показателей сортировки, важно оценить отличия технологических свойств получаемого чернового концентрата от свойств исходной руды. На основании полученных результатов станет возможным сделать вывод о целесообразности сортировки, додрабливания рудной гали и возврате ее в технологический процесс.

#### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ. МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

При опробовании технологического процесса Талнахской обогатительной фабрики взята проба рудной гали из разгрузки мельницы самоизмельчения с целью изучения ее физико-механических и технологических свойств. Материал класса критической крупности отбирался с ленточного конвейера, осуществляющего его возврат в мельницу (рис. 1).

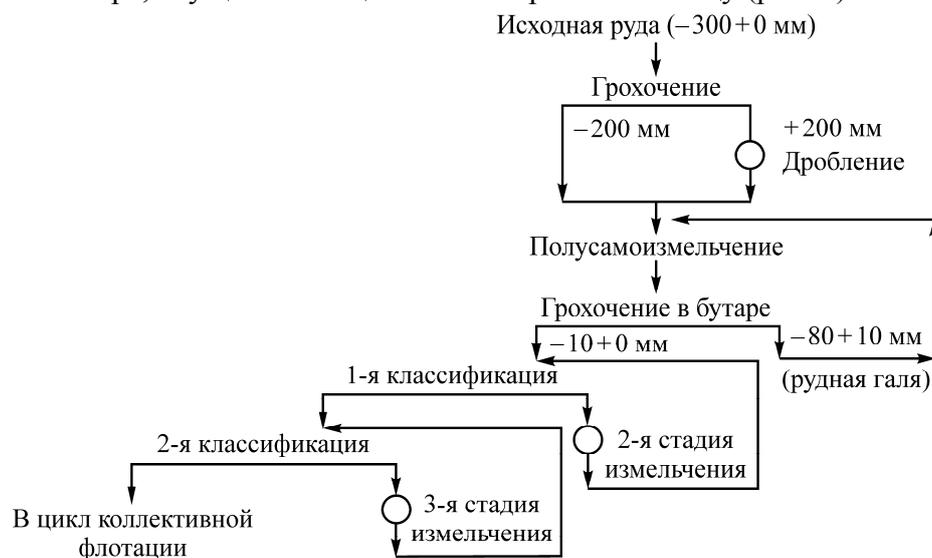


Рис. 1. Схема рудоподготовки второго пускового комплекса Талнахской обогатительной фабрики

Исследования проведены на кафедре обогащения Сибирского федерального университета и в R&D Центре Норильского никеля (г. Красноярск) методом рентгенорадиометрической сортировки на лабораторном сепараторе РСК-Л-01. В качестве метода разделения использован рентгенофлуоресцентный по характеристическому излучению меди и никеля. Признаком разделения выбран составной показатель, учитывающий содержание меди и никеля в кусках. Выполнены тесты по определению индекса измельчаемости по методике Ф. Бонда рудной гали, исследована кинетика ее измельчения. Флотационные тесты осуществлены в механической флотомашине “Механобр” с объемом камеры 0.75 л, содержание твердого в питании флотации ~ 30 %.

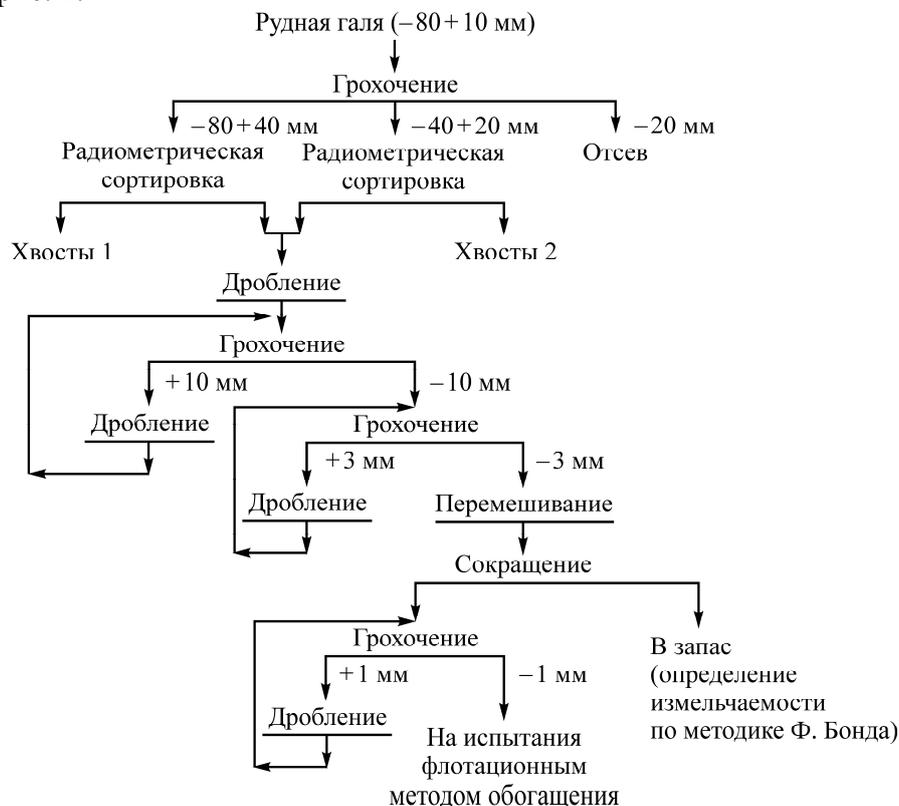
Определение содержания основных элементов Cu, Ni, S, Fe в рудной гале и продуктах флотационных опытов проводили рентгенофлуоресцентным методом в аналитической лаборатории R&D Центра Норильского никеля на мобильном комплексе Mobilab X-5000. Результаты определений выборочно контролировались независимой лабораторией ООО “Стюарт Геокемикл энд Эссей” различными методами. Рентгенофазовый анализ выполнен на дифрактометре ДРОН-3 (излучение  $\text{CuK}\alpha$ , шаг сканирования  $0.02^\circ$ , время накопления в точке 1 с). Расчет и расшифровка дифрактограмм осуществлены по стандартной методике с использованием картотеки эталонных порошковых спектров JCPDS.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гранулометрический состав рудной гали:

Класс крупности, мм	+80	-80+40	-40+20	-20+10	Итого
Выход, %	5	56	23	16	100

В исследуемой рудной гале на долю классов крупнее 80 мм приходится 5 % от общей массы. Основное количество материала сосредоточено в крупности -80+20 мм. Подготовка пробы к радиометрической сепарации и последующей флотации осуществлялась по схеме, представленной на рис. 2.



Для оценки контрастности минерального сырья, определяющей результаты сортировки, разработаны различные методы. Наиболее известна методика, предложенная В. А. Мокроусовым [11], где показатель контрастности изменяется от 0 (неконтрастное сырье) до 2 (для особо контрастных).

В ходе исследования контрастности изучено распределение металлов в каждом из сортируемых классов крупности рудной гали. Установлено, что распределение ценных компонентов в классах  $-80+40$  и  $-40+20$  мм сходное: наблюдается преобладание самой бедной фракции с содержанием меди менее 0.5% и никеля менее 0.1% при выходе фракции  $\sim 60\%$ . Бедная фракция представлена пустой породой и убого вкрапленной рудой. В более богатых фракциях, представленных обломками вкрапленных руд, выделяется мода с относительно низким содержанием никеля 1–2% и широким диапазоном вариации содержания меди от 1 до 15%, характерным для медистых руд. Встречаются единичные куски с содержанием никеля 3.0–4.5 и меди 3–5%, представленные богатой рудой. Распределение содержания металлов показано на рис. 3.

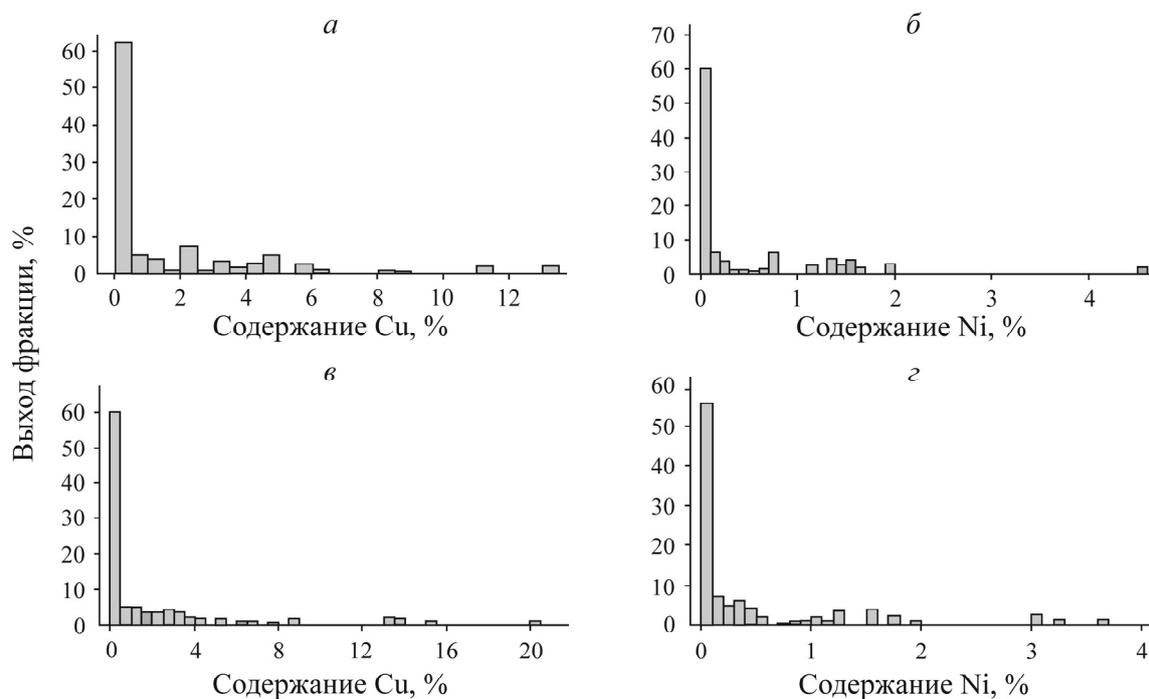


Рис. 3. Распределение содержания меди и никеля в рудной гале в классе крупности  $-80+40$  (а, б) и  $-40+20$  мм (в, г)

Рудная галля, образующаяся в процессе самоизмельчения на Талнахской обогатительной фабрике, по классификации В. А. Мокроусова является высококонтрастной ( $1.2 < M < 1.5$ ). В классе  $-80+40$  мм показатель контрастности по меди и никелю составил 1.26, в классе  $-40+20$  мм показатель контрастности по меди — 1.25, по никелю — 1.23.

Рентгенорадиометрической сортировке на лабораторной установке подвергали рудную галлю в сортируемых классах  $-80+40$  и  $-40+20$  мм. Для расчета сепарационной характеристики аппарата от каждого класса отобрана проба объемом 50 и 130 кусков соответственно. Куски нумеровались, измерялась интенсивность рентгеновского излучения и вычислялся аналитический параметр для каждого куска. После этого назначалась граница разделения сепаратора,

равная по меди 0.08, по никелю — 0.08 усл. ед. Граница разделения выбиралась из условия получения максимального количества отвальных хвостов с содержанием металлов не выше, чем в хвостах коллективной флотации Талнахской обогатительной фабрики. Отсев крупности –20 + 10 мм радиометрической сепарации не подвергали, учитывая низкую эффективность метода в такой крупности, а также то, что имеется возможность направить его в мельницу второй стадии измельчения (рис. 1).

Проведенные испытания на лабораторном сепараторе показали, что высокая контрастность рудной гали позволяет вывести из технологического процесса в хвостовую фракцию, методом рентгенорадиометрической сепарации, практически половину материала, тем самым увеличив пропускную способность мельницы самоизмельчения (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Результаты рентгенорадиометрической сортировки рудной гали, %

Продукт	Выход		Содержание		Извлечение			
			Cu	Ni	Cu	Cu	Ni	Ni
	сквозной	от операции	сквозное	от операции	сквозное	от операции	сквозное	от операции
Класс – 80 + 40 мм								
Концентрат	28	46	2.57	0.86	56.0	94.3	53.9	87.6
Хвосты	33	54	0.13	0.11	3.4	5.7	7.6	12.4
Исходная	61	100	1.26	0.46	59.4	100.0	61.5	100.0
Класс – 40 + 20 мм								
Концентрат	11	48	2.65	0.85	22.6	94.6	20.8	91.6
Хвосты	12	52	0.14	0.07	1.3	5.4	1.9	8.4
Исходная	23	100	1.35	0.45	23.9	100.0	22.7	100.0
Несепарируемый класс								
Отсев – 20 мм	16	—	1.35	0.45	16.7	—	15.8	—
Суммарные показатели								
Концентрат + + отсев – 20 мм	55	—	2.23	0.74	95.3	—	90.5	—
Хвосты	45	—	0.14	0.10	4.7	—	9.5	—
Исходная рудная галля	100	—	1.30	0.45	100.0	—	100.0	—

Рентгенофазовый анализ концентрата радиометрической сепарации показал наличие в исследуемой пробе рудных минералов: халькопирита, борнита, пирита, пирротина, пентландита, арсенопирита. Минералы пустой породы представлены слюдами, пироксенами, полевым шпатом и глинистыми минералами. По содержанию основных ценных компонентов Cu и Ni исследованная рудная галля беднее исходной руды, подаваемой в мельницу самоизмельчения: 1.30 и 0.45 % против 2.84 и 2.10 % меди и никеля соответственно, так как при самоизмельчении вначале разрушаются куски богатой руды (табл. 2). В результате сепарации материала класса – 80 + 20 мм получен концентрат с содержанием меди 2.65 %, никеля 0.86 % и хвосты, в которых содержание меди и никеля 0.14 и 0.10 % соответственно не превышает содержание в хвостах коллективной флотации по технологической схеме действующей фабрики.

Изучена измельчаемость концентрата рентгенорадиометрической сортировки по методике Ф. Бонда. Индекс Бонда  $W_i$  для концентрата радиометрической сепарации рудной гали составил 23 кВт·ч/т, при этом результаты определения  $W_i$  пробы исходной руды, поступающей на самоизмельчение — 14 кВт·ч/т. Высшая степень крепости рудной гали зафиксирована при

определении крепости по М. М. Протодяконову. Повышенные прочностные свойства класса критической крупности в сравнении с исходной шихтой обусловлены составляющими его вкрапленными рудами, отличающимися высокой крепостью, а также породной составляющей, представленной габбродолеритами, роговиками, метасоматитами, базальтами и кварцевым песчаником.

Технологические свойства концентрата рентгенорадиометрической сепарации из рудной гали оценивались применительно к схеме и режиму коллективной флотации, принятой на Талнахской фабрике. В настоящее время здесь реализована коллективно-селективная схема, включающая коллективный цикл флотации минералов меди и никеля при крупности 65 % класса – 0.044 мм; получение медного концентрата в одноименном цикле при доизмельчении коллективного концентрата до 93 % класса – 0.044 мм; флотацию никельсодержащих минералов из хвостов медного цикла после доизмельчения до 93 % класса – 0.044 мм.

Для определения оптимальных условий флотационного обогащения продукта, полученного методом рентгенорадиометрической сепарации, оценено влияние тонины помола и степени раскрытия минералов на показатели обогащения. Реагентный режим во флотационных опытах на рудной гале принят аналогичным тому, что применяется в операции коллективной флотации на фабрике. Для достижения требуемой тонины помола 65 % класса – 0.044 мм в операции коллективной флотации время измельчения концентрата рудной гали в лабораторной мельнице составило 40 мин при условиях Т:Ж:Ш = 1:0.5:12. Время измельчения в разных опытах варьировало для оценки степени раскрытия сростков в концентрате сортировки на процесс флотации.

Результаты лабораторных флотационных исследований приведены на рис. 4. При увеличении тонины помола питания (класса – 0.044 мм от 65 до 85 %) выход флотационного концентрата возрастает незначительно, в то же время растет извлечение меди на 3.4 % и никеля на 1.8 %. Рост извлечения ценных компонентов во флотационный концентрат сопровождается снижением их содержания в хвостах флотации при увеличении тонины помола, при этом качество коллективного концентрата практически не меняется. Повышение извлечения в коллективный концентрат при увеличении времени измельчения объясняется вскрытием тонкой вкрапленности рудных минералов в породе при сохранении богатых сростков и сростков халькопирита и пентландита с пирротинном.

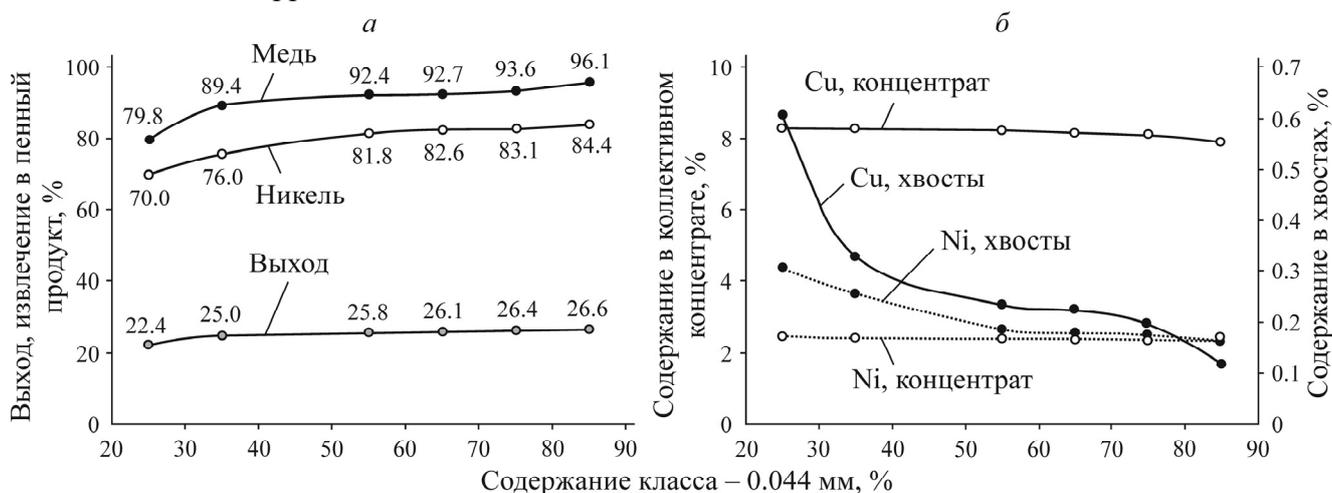


Рис. 4. Зависимость извлечения меди и никеля в коллективный концентрат от тонины помола питания (а) и влияние тонины помола питания на содержание металлов в хвостах и концентрате коллективной флотации (б)

Исследования показали существенные различия технологических свойств концентрата методом рентгенорадиометрической сепарации, полученного при сортировке рудной гали мельницы полусамоизмельчения, от свойств исходной шихты. Материал характеризуется трудной измельчаемостью, плохим раскрытием и трудной обогатимостью. Отвальное содержание меди и никеля в хвостах флотации достигается при более тонком помоле до 90% класса –0.044 мм. Материал не выделяется в отдельный продукт, а обрабатывается в одном потоке с более легкообогатимыми разностями исходной шихты, что приводит к ухудшению обогатимости результирующей смеси, снижению показателей извлечения и качества концентрата.

Выделение труднообогатимого материала в отдельный продукт может дать дополнительные возможности в оптимизации технологии, но сопряжено с определенными издержками. Обработка концентрата методом рентгенорадиометрической сепарации в условиях фабрики может осуществляться в трех вариантах, отличающихся сложностью, капитальными затратами и получаемым эффектом, в которых достигается увеличение производительности и некоторое снижение удельных энергозатрат фабрики за счет вывода из процесса кусковых хвостов:

1) обработка концентрата в отдельном цикле коллективной флотации при тонком помоле до 90% –0.044 мм. Вариант наиболее сложен и дорог, однако позволяет получить из труднообогатимого материала отвальные хвосты. Основной поток, освобожденный от труднообогатимой составляющей, улучшит показатели извлечения и качества;

2) разупрочнение концентрата при мелком дроблении в валках высокого давления с возвратом продукта валков в мельницу самоизмельчения либо с обработкой его в шаровой мельнице второй стадии. Вариант менее затратный, не требует организации отдельного флотационного цикла, но позволяет, хоть и в меньшей степени, улучшить показатели обогащения труднообогатимых фракций руды за счет улучшения их раскрытия;

3) возврат концентрата в мельницу самоизмельчения сразу либо после додрабливания в конусной дробилке мелкого дробления. Здесь достигается только увеличение производительности цикла и некоторое снижение удельных энергозатрат за счет вывода из процесса кусковых хвостов повышенной прочности.

Выполнен укрупненный сравнительный технический расчет вариантов с использованием и без использования рентгенорадиометрической сепарации (PPC) для сортировки рудной гали в условиях фабрики по третьему варианту, требующему минимального объема реконструкции:

Показатель	Без PPC	С PPC
Свежая руда с рудника, тыс. т/год	10 000	10 450
Циркулирующая нагрузка мельницы полусамоизмельчения, %	10	10
Питание мельницы (свежая руда + концентрат PPC), тыс. т/год	11 000	11 000
Рудная галля, тыс. т/год	1 000	1 000
Питание PPC, тыс. т/год		1 000
Выход хвостов PPC, %		45
Хвосты PPC, тыс. т/год		450
Концентрат PPC, тыс. т/год		550
Содержание Cu в исходной руде, %	2.91	2.91
Содержание Ni в исходной руде, %	2.04	2.04
Извлечение Cu в Cu-концентрат, %	88.67	88.67
Извлечение Ni в Ni-концентрат, %	80.20	80.20
Содержание Cu в хвостах PPC, %		0.14
Содержание Ni в хвостах PPC, %		0.10
Дополнительно Cu в питании, тыс. т/год		13.095
Дополнительно Ni в питании, тыс. т/год		9.18
Дополнительно извлеченной Cu в Cu-концентрат, тыс. т/год		11.05
Дополнительно извлеченного Ni в Ni-концентрат, тыс. т/год		7.0015

При выходе рудной гали, отправляемой на рентгенометрическую сортировку, на уровне 10 % от исходного питания, поступающего на фабрику, дополнительно за год можно увеличить пропускную способность мельницы на 450 тыс. т/год. Предлагаемое технологическое решение позволит создать резерв для дозагрузки мельницы полусамоизмельчения, что в свою очередь будет способствовать увеличению выпуска готовой продукции — медного и никелевого концентрата.

### ВЫВОДЫ

Установлена эффективность применения рентгенометрической сортировки рудной гали мельницы полусамоизмельчения Талнахской обогатительной фабрики. Введение рентгенометрической сепарации позволяет получить хвосты, отличающиеся повышенной крепостью, в которых содержание меди и никеля не превышает содержания в хвостах коллективной флотации по действующей технологической схеме, с выходом на уровне 45 % от исходной гали. Выделение кусковых хвостов увеличивает производительность мельницы самоизмельчения на 450 тыс. т/год, снижает энергоемкость последующего измельчения за счет удаления наиболее прочных составляющих шихты.

Полученный концентрат представлен упорным и трудноизмельчаемым материалом, в основном обломками вкрапленных и медистых руд. При измельчении его до крупности 65 % класса –0.044 мм, принятой на фабрике, при коллективной флотации получают хвосты с повышенным содержанием меди и никеля. Повышение тонины помола до 85 % –0.044 мм снижает хвостовое содержание меди до 0.12 % и никеля до 0.16 %.

Результаты исследования рентгенометрической сепарации и коллективной флотации концентрата сортировки позволяют оценивать радиометрическую сепарацию в цикле полусамоизмельчения не только как метод предварительной концентрации, но и как средство выделения из рудопотока упорной и трудноизмельчаемой составляющей, которая в зависимости от условий фабрики может обрабатываться в отдельных циклах, адаптированных для упорного материала.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aldrich C. Consumption of steel grinding media in mills — a review, *J. Miner. Eng.*, 2013, Vol. 49. — P. 77–91.
2. Lessard J., Jan de Bakker, and McHugh L. Development of ore sorting and its impact on mineral processing economics, *J. Miner. Eng.*, 2014, Vol. 65. — P. 88–97.
3. Wikedzi A., Arinanda M. A., Leibner T., Peucker U. A., and Mütze T. Breakage and liberation characteristics of low grade sulphide gold ore blends, *J. Miner. Eng.*, 2018, Vol. 115. — P. 33–40.
4. Díaz E., Voisina L., Krachta W., and Montenegro V. Using advanced mineral characterisation techniques to estimate grinding media consumption at laboratory scale, *J. Miner. Eng.*, 2018, Vol. 121. — P. 180–188.
5. Lessard J., Sweetser W., Bartram K., Figueroa J., and McHugh L. Bridging the gap: Understanding the economic impact of ore sorting on a mineral processing circuit, *J. Min. Eng.*, 2015, Vol. 91. — P. 92–99.
6. Вейгельт Ю. П., Ростовцев В. И. Интенсификация процессов обогащения медно-никелевых Норильских руд с использованием энергетических воздействий // ФТПРПИ. — 2000. — № 6. — С. 85–89.

- 7. Чантурия В. А., Козлов А. П., Матвеева Т. Н., Лавриненко А. А.** Инновационные технологии и процессы извлечения ценных компонентов из нетрадиционного, труднообогатимого и техногенного минерального сырья // ФТПРПИ. — 2012. — № 5. — С. 144–156.
- 8. Чантурия В. А., Лавриненко А. А., Саркисова Л. М., Иванова Т. А., Глухова Н. И., Шрадер Э. А., Кунилова И. В.** Действие сульфгидрильных фосфорсодержащих собирателей при флотации платинометального медно-никелевого минерального сырья // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 132–139.
- 9. Черноусенко Е. В., Нерадовский Ю. Н., Каменева Ю. С., Вишнякова И. Н., Митрофанова Г. В.** Повышение эффективности флотационного обогащения сульфидных медно-никелевых руд Печенгского рудного поля // ФТПРПИ. — 2018. — № 6. — С. 173–179.
- 10. Ломоносов Г. Г., Туртыгина Н. А.** Влияние вещественного состава руд на показатели переработки // ГИАБ. — 2010. — № 2. — С. 314–320.
- 11. Мокроусов В. А., Лилеев В. А.** Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд. — М.: Недра, 1979. — 192 с.

*Поступила в редакцию 18/VI 2019*

*После доработки 16/IX 2019*

*Принята к публикации 23/IX 2019*