

УДК 622.7

**РЕНТГЕНОЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ СЕПАРАЦИЯ
БЕДНЫХ АПАТИТСОДЕРЖАЩИХ РУД ХИБИНСКОГО МАССИВА**

С. В. Терещенко, Д. Н. Шibaева, С. А. Алексеева

Горный институт КНЦ РАН,

E-mail: tereshchenko@goi.kolasc.net.ru, ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Россия

Проведен анализ разрабатываемых и перспективных месторождений апатитсодержащих руд, расположенных на территории Мурманской области и составляющих 70 % запасов фосфатных руд Российской Федерации, являющихся уникальным сырьем для производства минеральных удобрений. Показаны причины снижения содержания P_2O_5 в добываемых рудах, приводящие к увеличению себестоимости получения концентрата и количества складированных горнопромышленных отходов. Установлено, что для стабилизации питания обогатительной фабрики целесообразно использовать процесс предконцентрации апатитсодержащих руд посредством кусковой рентгенолюминесцентной сепарации, обеспечивающей повышение содержания P_2O_5 в технологическом потоке, за счет удаления не менее 20 % пород, содержащих до 2 % P_2O_5 . В опытно-промышленных условиях реализации процесса сепарации выявлены дестабилизирующие факторы, снижающие ее эффективность, устранение которых за счет выравнивания скорости и траектории движения кусков при перемещении их от зоны измерения до зоны разделения позволяет минимизировать потери полезного компонента с хвостами не менее чем в 2 раза, создав условия для повышения селективности процесса рентгенолюминесцентной сепарации и роста извлечения P_2O_5 в концентрат.

Апатитсодержащие руды, техногенные месторождения, предконцентрация, мелкопорционная сортировка, рентгенолюминесцентная сепарация, спектры люминесценции

DOI: 10.15372/FTPRPI20190115

Сохранение урожайности сельскохозяйственных культур невозможно без внесения в почву нужного количества минеральных удобрений. Незаменимым сырьем для производства фосфорных удобрений служит апатитовый концентрат. Подсчитано, что 1 т такого продукта, превращенного в суперфосфат, дает с 1 га существенную прибавку урожая, составляющую, ц: пшеницы — 30, картофеля — 160, сахарной свеклы — 200 [1].

На территории РФ сосредоточено значительное количество мировых запасов фосфатных руд, причем основные и наиболее качественные сосредоточены в Мурманской области. В других регионах страны минерально-сырьевая база либо неудовлетворительна по качеству, либо находится на территориях со слабо развитой инфраструктурой и/или сложными географическими условиями [2, 3].

На рис. 1 представлены разрабатываемые и перспективные месторождения и рудопроявления апатита, сосредоточенные в центральной части Кольского полуострова в Хибинском массиве.



Рис. 1. Схема расположения месторождений апатита в Мурманской области [4]

В настоящее время основными производителями апатитового концентрата в Мурманской области являются Кировский филиал АО «Апатит», эксплуатирующий Кукисвумчорское, Юкспорское, Апатитовый Цирк, Плато Расвумчорр, Коашвинское и Ньоркпахкское месторождения; АО «Ковдорский ГОК», разрабатывающее Ковдорское апатит-магнетитовое месторождение, и АО «Северо-западная Фосфорная Компания», ведущая с 2013 г. добычу руды на месторождении «Олений Ручей».

Для этих предприятий перспектива перехода к добыче и переработке рудной массы, характеризующейся низким содержанием полезных компонентов, обусловлена рядом причин, основными из которых являются:

- последствие интенсивного освоения недр в течение всего XX столетия — истощение запасов богатых и легкодоступных руд (снижение уровня содержания P_2O_5 в добываемых рудах Хибинского массива Кировским филиалом АО «Апатит» (рис. 2): в до- и послевоенные годы содержание P_2O_5 в добытой руде превышало 20 %, в настоящее время оно колеблется на уровне 12 – 13 %), усложнение горно-геологических условий отработки залежей;
- сложное геологическое строение месторождения; например, в залежах месторождения «Олений Ручей» наблюдается чередование апатитсодержащих руд с разубоживающими породами, составляющими до 38 % от объема залежей, для Ковдорского апатит-магнетитового месторождения характерно наличие многочисленных жильных ответвлений рудных тел во вмещающие породы, высокая изменчивость оруденения, проявляющаяся как в горизонтальном, так и в вертикальном разрезе главного рудного тела;
- селективная технология добычи и переработки добываемых руд. Маложелезистые руды Ковдорского апатит-магнетитового месторождения поставлены на Государственный баланс отдельно от бадделеит-apatит-магнетитовых и вывезены в специальные охраняемые склады-отвалы;
- переход к высокопроизводительному добычному оборудованию, способствующему повышению уровня разубоживания добытой рудной массы.

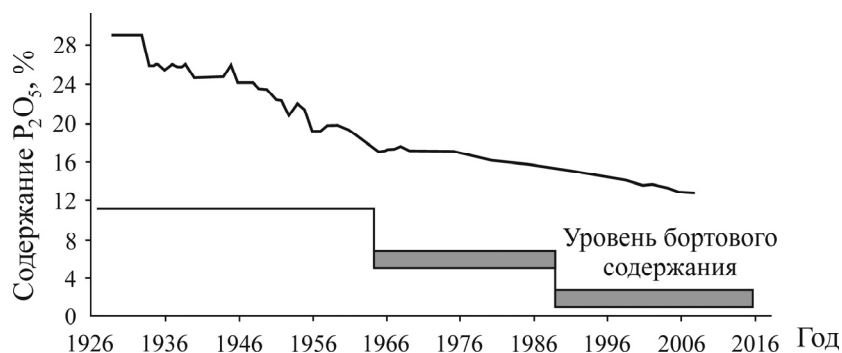


Рис. 2. Изменение уровня содержаний P_2O_5 в добываемых рудах Хибинского массива АО «Апатит»

На рис. 3 показана зависимость выхода апатитового концентрата от качества сырья, поступающего на апатит-нефелиновую обогатительную фабрику, иллюстрирующая прямую связь качества питания процессов обогащения и формирующихся в процессе апатитовой флотации тонкоизмельченных хвостов (определяющихся разностью 100 % и выхода апатитового концентрата), рост которых негативно влияет на окружающую среду.

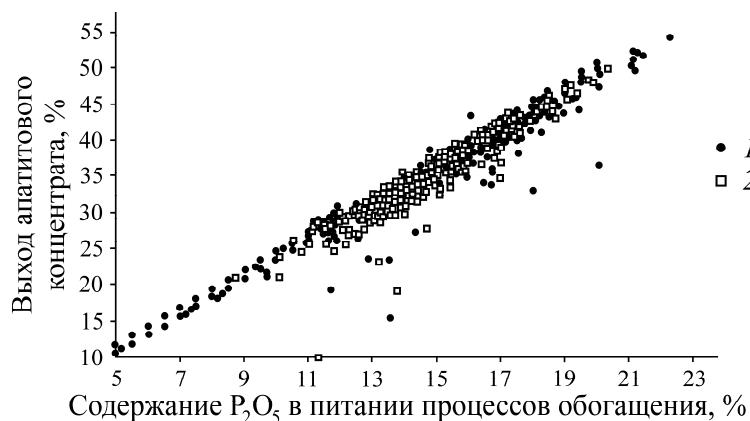


Рис. 3. Динамика изменения выхода концентрата от качества перерабатываемого сырья: 1 — лабораторные исследования; 2 — данные обогатительной фабрики

Возрастающая актуальность экологической составляющей работы горно-обогатительного комплекса подтверждается особым вниманием государства к этому вопросу. Принимая во внимание тот факт, что в настоящее время накоплены значительные объемы отходов горного производства, сформированные породами с содержанием полезных компонентов ниже бортового, велика вероятность того, что среднее содержание этих компонентов в породных отвалах может быть соизмеримо с качеством бедных руд, поскольку технологические параметры разработки залежей месторождений на различных временных отрезках изменялись. На примере отработки месторождений Хибинского массива показано значительное снижение бортового содержания с 12 до 2–4 % P_2O_5 (рис. 2). Склады-отвалы маложелезистых апатитовых руд, с содержаниями железа общего около 10 %, оксида фосфора на уровне 5 %, оксида циркония — 0.06 % (АО «Ковдорский ГОК»), сформированные в предыдущие годы, насчитывают более 100 млн т [5]. Отметим, что перспективные апатитовые месторождения Мурманской области в большинстве своем представлены бедными и убогими разновидностями апатитосодержащих руд (табл. 1).

Представленная информация свидетельствует о высокой вероятности увеличения себестоимости получения апатитового концентрата, что связано со снижением качества добываемых руд. Для исключения дальнейшего роста себестоимости получения апатитового концентрата и уменьшения негативных последствий вовлечения в переработку сырья низкого качества возникает необходимость совершенствования подходов, обеспечивающих экономически эффективную, экологически сбалансированную технологию добычи и переработки бедных и убогих руд. Одним из таких подходов является использование процесса предварительной концентрации (предконцентрации), обеспечивающего формирование рудопотока с повышенным содержанием полезных компонентов посредством выделения из добытой рудной массы пустых и слабоминерализованных пород (содержание полезных компонентов в них ниже бортового содержания, принятого при добыче).

ТАБЛИЦА 1. Перспективные апатитовые месторождения Мурманской области

Массив	Месторождение	Запасы, млн т		Среднее содержание P ₂ O ₅ , %
		Руда	P ₂ O ₅	
Хибинский массив				
1	Эвеслогчорр	356.0 (А+В+С ₁)	52.0	14.65
2	Партомчорр	748.0 (А+В+С ₁)	56.0	7.50
Ковдорский массив				
3	Ковдорское апатит-штаффелитовое	41.6 (А+В+С ₁)	7.0	16.96
4	Ковдорское апатит-карбонатитовое	916.5 (С ₁ +С ₂)	40.3	4.40
Массив Гремяха-Вырмес				
5	Гремяха-Вырмес	2073.0 (С ₁ +С ₂)	62.2	3.00
Массив Себлявр				
6	Себлявр	1207.0 (С ₁ +С ₂)	56.0	4.60
Массив Вуориярви				
7	Тухта-Вара	110.4 (С ₁ +С ₂)	6.1	5.50
Салмагорский массив				
8	Салмагора	300.0 (Р ₁ +Р ₂)	15.6	5.20

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА ПРЕДКОНЦЕНТРАЦИИ БЕДНЫХ АПАТИТСОДЕРЖАЩИХ РУД

Рудные тела Хибинских апатитовых месторождений сложены разнообразными природными разновидностями апатит-нефелиновых руд и пород. По минералогическому составу эти руды практически однотипны и отличаются лишь количественным соотношением минералов, содержащих полезные компоненты, основными из которых являются апатит, нефелин, эгирин, сфен, полевошпат и титаномагнетит. В сумме они составляют, как правило, 97–99 %. На долю остальных сопутствующих минералов (лепидомелан, натролит, эвдиалит, пирротин и др.) приходится 1–3 % [6]. В табл. 2 представлен состав основных минералого-технологических типов руд апатит-нефелиновых месторождений Хибин [7].

Процесс предконцентрации можно реализовать, используя гравитационные, магнитные и радиометрические методы. Параметры электрических, магнитных, гравитационных и люминесцентных свойств основных породообразующих минералов апатит-нефелиновых месторождений Хибин приведены в [8, 9]. Отметим, что пироксен, титанит, титаномагнетит, ильменит, гидрокислы Fe, анатаз, монтмориллонит, гидрослюда не люминесцируют при воздействии на них УФ- и рентгеновского излучения.

ТАБЛИЦА 2. Состав основных минералого-технологических типов руд апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива, мас. %

Минерал	Тип руд					
	apatит-нефелиновый		apatит-сфеновый		гипергенно измененный	
	от	до	от	до	от	до
Апатит	6.1	91.4	12.0	35.0	16.1	77.0
Нефелин	18.2	67.5	19.7	41.5	8.7	44.5
Полевые шпаты	0.1	8.6	0.0	3.4	0.6	2.7
Пироксены	5.5	25.7	3.7	26.7	0.9	11.8
Амфиболы	0.0	1.3	0.5	8.3	—	0.3
Сфен	0.6	6.2	10.8	51.9	0.2	3.5
Титаномагнетит	0.1	3.9	0.7	4.3	0.1	2.0
Ильменит	0.0	0.3	0.2	3.8	0.0	0.3
Гидроокислы Fe	—	—	—	—	0.6	4.2
Анатаз	—	—	—	—	0.4	1.2
Монтмориллонит	—	—	—	—	0.5	6.0
Гидрослюда	—	—	—	—	6.4	24.7

Для реализации процесса предконцентрации с использованием гравитационных методов существующее различие минералов по плотности является недостаточным для эффективного разделения кускового материала добытой рудной массы (в апатит-нефелиновых рудах присутствуют породы, обладающие близкой к апатиту плотностью). Слабые магнитные свойства апатита также не обеспечивают необходимого результата разделения: возможно лишь выделение пород, обогащенных магнетитом, значение магнитной восприимчивости которого значительно превышает значение, характерное для апатита.

В [9] установлено, что при облучении УФ- и рентгеновским излучением явление люминесценции возникает у апатита, нефелина, кальцита, содалита, канкринита и полевых шпатов (микроклин, плагиоклаз и ортоклаз). Однако количество сопутствующих апатиту люминесцирующих минералов, присутствующих в апатитсодержащих рудах Хибинского массива, составляет от десятых долей до единиц процента. Исключение — нефелин, массовая доля которого колеблется от 8.7 до 67.5 % (табл. 2), но интенсивность его свечения в 4 раза слабее интенсивности рентгенолюминесцентного апатита (рис. 4). Следовательно, в качестве метода предконцентрации целесообразно использовать рентгенолюминесцентный метод — один из радиометрических методов.

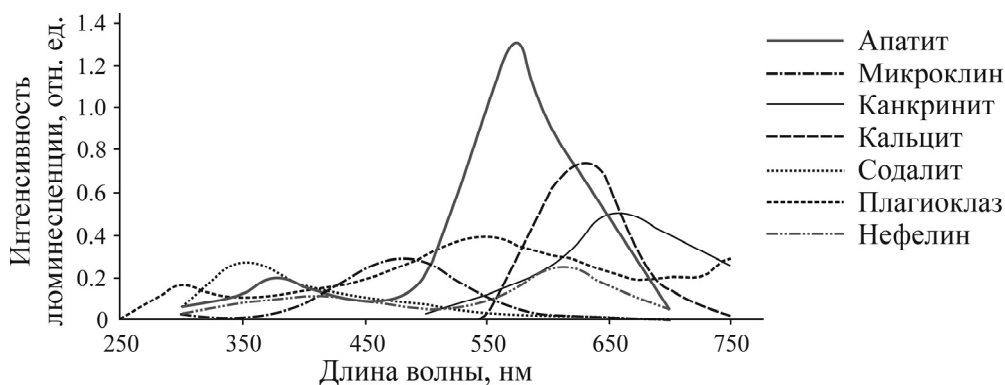


Рис. 4. Спектры люминесценции минералов при рентгеновском возбуждении

Процесс предконцентрации добытой рудной массы с применением радиометрических методов реализуется тремя основными режимами — крупнопорционной сортировкой, покусковой сепарацией, мелкопорционной сортировкой [10–16]. Радиометрическая крупнопорционная сортировка основана на регистрации интенсивности излучения от рудной массы, загруженной в различные транспортные емкости — ковши экскаваторов, вагонетки, автосамосвалы, скипы и т. д. Успешная реализация этого процесса для апатитсодержащих руд маловероятна из-за низкой контрастности больших объемов по содержанию в них P_2O_5 , поскольку значение показателя контрастности, характеризующей неравномерность распределения полезных компонентов в объемах рудной массы для кусков крупностью более 200 мм, не превышает 0.7 усл. ед. [11] и дальнейшее увеличение разделяемых объемов приведет к резкому снижению показателя контрастности.

Реализация покусковой рентгенолюминесцентной сепарации, при которой происходит разделение кусков горной массы на рудный и породный продукты или на различные по содержанию полезного компонента технологические сорта, является более приемлемой, поскольку показатель контрастности рудной массы, прошедшей стадии крупного и/или среднего дробления, не ниже 0.8. Такое его значение свидетельствует о существенном различии кусков рудной массы по содержанию в них P_2O_5 в диапазоне крупности кусков от 20 до 200 мм [17]. Отметим, что нижний и верхний пределы крупности сепарируемого минерального сырья зависят, с одной стороны, от применяемого метода и уровня его развития, с другой — от физических свойств кусков горной массы.

В ряде случаев для разделения горной массы крупностью менее 20 мм используется процесс мелкопорционной сортировки — сепарируемый материал распределяется монослоем по поверхности транспортирующего устройства и, перемещаясь, попадает в зону его облучения и регистрации люминесценции. В зависимости от интенсивности регистрируемого излучения объем, определяющийся линейными размерами зоны облучения и толщиной слоя, выделяется в соответствующий приемник (рудный, породный, сортовой). Оценка целесообразности реализации предварительного обогащения апатитсодержащих руд крупностью $-20+10$ мм с использованием процесса мелкопорционной сортировки указывает на нерациональность ее применения [18], поскольку рудная масса крупностью менее 20 мм значительно обогащена апатитом по сравнению с исходной рудной массой — в 1.3–1.5 раза; для порции массой около 50 г наблюдается усреднение рудной массы этой крупности, нивелирующее различие порций по содержанию в них P_2O_5 и значительно снижающее результаты разделения — выход хвостов сепарации (рис. 5).

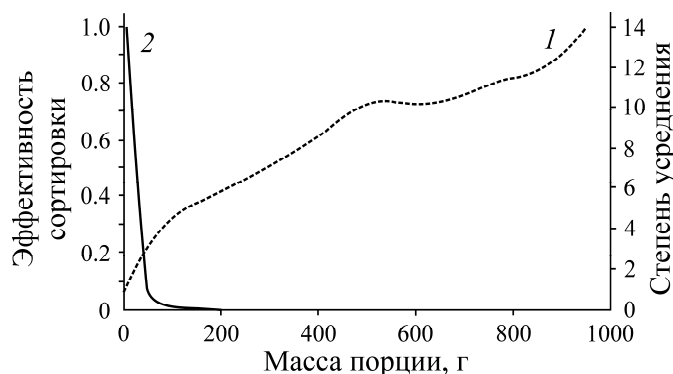


Рис. 5. Результаты моделирования мелкопорционной сортировки апатитсодержащих руд в зависимости от массы порции: 1 — степень усреднения (определялась по изменению показателя контрастности, характеризующего неравномерность распределения полезных компонентов по изучаемому объекту); 2 — эффективность сортировки

Оценка существующих режимов реализации процесса предконцентрации показала целесообразность применения при переработке апатитсодержащих руд покусковой рентгенолюминесцентной сепарации в диапазоне крупности рудной массы от 20 до 200 мм. Эффективность выбранного метода подтверждается наличием тесной корреляционной связи между параметром рентгенолюминесценции и содержанием P_2O_5 в кусках руды. Установленная зависимость аппроксимируется линейной функцией с коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2 = 0.93$ (рис. 6).

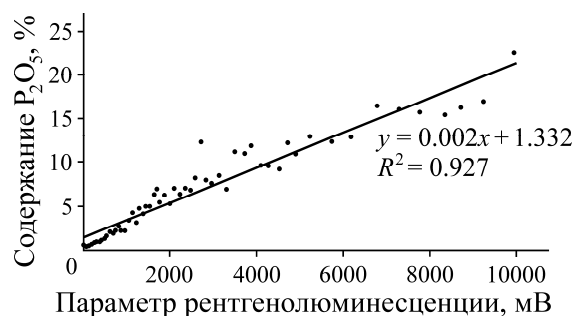


Рис. 6. Корреляционная зависимость параметра рентгенолюминесценции от содержания в кусках P_2O_5

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования рентгенолюминесцентных характеристик апатитсодержащих руд Хибинского массива и эффективности реализации процесса рентгенолюминесцентной сепарации проводятся в Горном институте КНЦ РАН с 1997 г. [11]. Результаты этих исследований приведены в табл. 3 [11, 17, 18].

ТАБЛИЦА 3. Технологические показатели рентгенолюминесцентного разделения апатитсодержащих руд, %

Месторождение	Исходное содержание P_2O_5	Хвосты рентгенолюминесцентной сепарации			Обогащенная руда (концентрат рентгенолюминесцентной сепарации и рудный отсев)		
		Выход	Содержание P_2O_5	Извлечение	Выход	Содержание P_2O_5	Извлечение
Ньюрпахк	10.17	27.27	1.22	3.27	72.73	13.53	96.73
Коашва	16.61	23.09	1.26	1.75	76.91	21.22	98.25
Кукисвумчорр	12.02	24.10	1.09	2.19	75.90	15.49	97.81
Олений Ручей	5.50	27.35	1.05	5.22	72.65	7.18	94.78
	10.11	36.90	0.86	3.14	63.10	15.52	96.86
Партомчорр	6.14	27.84	1.83	8.30	72.16	7.80	91.70
Эвеслогчорр	8.99	30.90	0.91	3.13	69.10	12.60	96.87

Анализ табл. 3 показывает, что из рядовых руд ($P_2O_5 \geq 10\%$) с использованием рентгенолюминесцентного метода разделения можно удалить не менее 23 % горной массы с P_2O_5 не более 1.3 % при потерях полезных компонентов с хвостами рентгенолюминесцентной сепарации не выше 4 %. Технологические показатели разделения бедных руд ($P_2O_5 < 10\%$) в лабораторных и укрупненно-лабораторных условиях являются также вполне приемлемыми — содержание в обогащенном продукте предконцентрации повышается не менее чем 1.3 раза при содержании полезных компонентов в отходах не выше уровня флотационных хвостов (не более 2 % P_2O_5). Однако рентгенолюминесцентная сепарация бедных руд одного из Хибинских месторождений, реализованная в опытно-промышленных условиях с использованием опытного образца рентгенолюминесцентного сепаратора, не показала столь оптимистичных результатов (табл. 4) — содержание P_2O_5 в отходах рентгенолюминесцентной сепарации превысили 2 %.

ТАБЛИЦА 4. Технологические результаты рентгенолюминесцентной сепарации бедной руды крупностью – 50 + 20 мм, %

Продукт разделения	Выход	Содержание P_2O_5	Извлечение P_2O_5
Концентрат рентгенолюминесцентной сепарации	22.82	9.65	53.4
Хвосты рентгенолюминесцентной сепарации	77.18	2.48	46.6
Исходная руда класса – 50 + 20 мм	100.00	4.12	100.0

Изучение технологических результатов рентгенолюминесцентной сепарации показало их существенную зависимость от конструктивных особенностей сепаратора и эффективности работы его узлов. Подтверждением служат результаты сепарации контрастной пробы, составленной из кусков, содержащих не менее 80 % апатита, и безрудных кусков в соотношении 30 и 70 % соответственно (табл. 5). При разделении пробы пороговое значение интенсивности рентгенолюминесцентных кусков соответствовало 12 % P_2O_5 . Для выделения апатитсодержащих (полезных) кусков с траектории свободного падения в сепараторе использованы электропневмоклапаны, воздушная струя которых направляет полезные куски в концентратный желоб. Частота срабатывания электропневмоклапана не менее 25 Гц.

ТАБЛИЦА 5. Результаты разделения контрастной пробы

Опыт	Продукт	Куски	Выход, %	Опыт	Продукт	Куски	Выход, %
1	Концентрат	Рудные	90.0	8	Концентрат	Рудные	94.0
		Породные	0.0			Породные	1.4
	Хвосты	Рудные	10.0		Хвосты	Рудные	6.0
		Породные	100.0			Породные	98.6
2	Концентрат	Рудные	70.0	9	Концентрат	Рудные	97.0
		Породные	6.6			Породные	2.8
	Хвосты	Рудные	30.0		Хвосты	Рудные	3.0
		Породные	93.4			Породные	97.2
3	Концентрат	Рудные	90.0	10	Концентрат	Рудные	94.0
		Породные	0.0			Породные	1.4
	Хвосты	Рудные	10.0		Хвосты	Рудные	6.0
		Породные	100.0			Породные	98.6
4	Концентрат	Рудные	85.0	11	Концентрат	Рудные	87.0
		Породные	1.4			Породные	7.1
	Хвосты	Рудные	15.0		Хвосты	Рудные	13.0
		Породные	98.6			Породные	92.9
5	Концентрат	Рудные	87.0	12	Концентрат	Рудные	87.0
		Породные	0.0			Породные	2.8
	Хвосты	Рудные	13.0		Хвосты	Рудные	13.0
		Породные	100.0			Породные	97.2
6	Концентрат	Рудные	94.0	13	Концентрат	Рудные	80.0
		Породные	2.8			Породные	1.4
	Хвосты	Рудные	6.0		Хвосты	Рудные	20.0
		Породные	97.2			Породные	98.6
7	Концентрат	Рудные	87.0	14	Концентрат	Рудные	87.0
		Породные	1.4			Породные	2.8
	Хвосты	Рудные	13.0		Хвосты	Рудные	13.0
		Породные	98.6			Породные	97.2
Средние потери рудных кусков в хвостах сепарации							12.21
Среднее разубоживание концентрата пустыми породами							2.24

Такие потери и разубоживание, приведшие к ухудшению технологических показателей разделения (табл. 4), связаны с неточным попаданием в кусок струи воздуха, выдуваемого электропневмоклапаном. Происходит это потому, что сигнал на выделение (далее отсечку) полезного куска (куска с содержанием не менее 12 % P_2O_5) с траектории свободного падения вырабатывается блоком регистрации люминесценции при переходе кусков через зону возбуждения, а сигнал на включение электропневмоклапана поступает с фиксированной задержкой, учитывающей время пролета куска от зоны регистрации до зоны отсечки. Установлено, что скорость движения кусков по траектории их свободного падения имеет непрогнозируемый разброс. Причин нестабильности скорости движения кусков при перемещении их от зоны измерения до зоны отсечки в сепараторе несколько.

При отсечке одного или нескольких полезных кусков в камеру разделения сепаратора в течение 10–20 мс вдувается одна или несколько порций воздуха в объеме от 3 до 6 л под давлением 6 атм. Распространяясь по всем направлениям, в том числе вверх, против движения кусков, не прогнозируемо уменьшается их скорость. Особенно это заметно на плоских кусках, имеющих небольшую массу, но обладающих большой площадью. Этот фактор вызывает некоторое увеличение времени пролета кусков от зоны измерения до зоны отсечки и, как следствие, снижение эффективности попадания пневмоструи в полезный кусок, что приводит к росту вероятности ее попадания в породный кусок.

В сепараторе между транспортными каналами на траектории свободного падения кусков имеются делительные перегородки, обеспечивающие устранение влияния светового потока люминесценции от полезных кусков, следующих по соседним каналам. Куски руды, размер которых незначительно отличается от ширины транспортного коридора между делительными перегородками, при своем движении касаются поверхности перегородок, снижая собственную скорость. Этот фактор также уменьшает вероятность эффективной отсечки полезных кусков.

Кроме того, применение в качестве исполнительного механизма для выделения полезных кусков электропневмоклапана требует обеспечения его надежной работы — поддержания неизменной величины давления, особенно при его частом срабатывании. В противном случае энергия воздействия струи сжатого воздуха на движущийся в свободном падении полезный кусок снижается, повышая в результате вероятность его попадания в хвостовой желоб. При проведении исследований в опытно-промышленных условиях давление в системе при частоте срабатывания электропневмоклапана на уровне 25 Гц падало с 6.0 до 4.7 атм, что также негативно сказывалось на технологических показателях сепарации.

Выявленные проблемы являются исключительно техническими, которые необходимо учитывать при разработке конструкции рентгенолюминесцентного сепаратора. Обеспечив точность выделения кусков с кондиционным содержанием P_2O_5 , можно улучшить технологические показатели рентгенолюминесцентной сепарации. В табл. 6 приведены результаты лабораторной сепарации, исключающие неоправданные потери кусков с кондиционным содержанием P_2O_5 с хвостами рентгенолюминесцентной сепарации и разубоживания концентрата пустыми породами.

ТАБЛИЦА 6. Технологические показатели рентгенолюминесцентной сепарации бедной апатитсодержащей руды крупностью – 50 + 20 мм с учетом исключения потерь и разубоживания, %

Продукт разделения	Выход	Содержание P_2O_5	Извлечение P_2O_5
Концентрат рентгенолюминесцентной сепарации	31.92	9.18	71.12
Хвосты рентгенолюминесцентной сепарации	68.18	1.74	28.78
Исходная руда класса – 50 + 20 мм	100.00	4.12	100.00

Данные табл. 6 показывают, что с учетом устранения выявленных при проведении исследований технических недостатков сепаратора возможно снижение извлечения полезного компонента в хвостах рентгенолюминесцентной сепарации с 46.6 до 28.8 % при сохранении содержания P_2O_5 в концентрате разделения на том же уровне.

ВЫВОДЫ

На примере апатитсодержащих руд Хибинского массива продемонстрирована возможность вовлечения в переработку бедных, убогих и рядовых руд с высоким уровнем разубоживания за счет включения в технологию добычи и переработки операции предконцентрации посредством рентгенолюминесцентной сепарации рудной массы, прошедшей стадию среднего дробления. Тесная корреляционная зависимость интенсивности люминесценции апатитсодержащих кусков с содержанием в них полезного компонента P_2O_5 подтверждает целесообразность выбранного метода. Лабораторная рентгенолюминесцентная сепарация свидетельствует о возможности повышения не менее чем в 1.3 раза содержания P_2O_5 в рудной массе, направляемой на обогащение, при этом в отходах разделения содержание P_2O_5 не превышает его значения в хвостах апатитовой флотации. Достижение удовлетворительных технологических показателей сепарации, реализованной в опытно-промышленных условиях, сопоставимых с результатами лабораторных исследований, обеспечивается в первую очередь за счет стабилизации скорости и траектории движения кусков при перемещении их от зоны измерения до зоны выделения из технологического потока кусков с кондиционным содержанием P_2O_5 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурьев А. А., Рыбников М. К., Давыденко В. В., Левин Б. В. АО “Апатит”. Флагману горно-химической промышленности России — 85 лет // Горн. журн. — 2014. — № 10. — С. 4–8.
2. Zhang P., Wiegen R., and El-Shall H. Phosphate rock, Industrial minerals and rocks: commodities, markets, and uses (SME), 2006. — P. 703–722.
3. Состояние и использование минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации. Фосфаты URL: <http://www.mineral.ru/> (дата обращения 11.10.2017).
4. Афанасьев Б. В., Бичук Н. И., Даин А. Д., Жабин С. В., Каменев Е. А. Минерально-сырьевая база Мурманской области // Минеральные ресурсы России. — 1997. — № 3. — С. 10–22.
5. Петрик А. И., Быховец А. Н., Сохарев В. А., Переин В. Н., Сердюков А. Л. Модернизация минерально-сырьевой базы в стратегии долгосрочного развития Ковдорского ГОКа // Горн. журн. — 2012. — № 10. — С. 12–18.
6. Фахрутдинов Р. З., Зеленихин В. А., Гимадиева Г. М. Проблемы комплексного освоения и использования Хибинских апатит-нефелиновых руд // Разведка и охрана недр. — 2010. — № 2. — С. 20–24.
7. Дудкин О. Б. Технологическая минералогия комплексного сырья на примере месторождений щелочных плутонов. — Апатиты: КНЦ РАН, 1996. — 133 с.
8. Изонтоко В. М. Технологическая минералогия и оценка руд. — СПб.: Наука, 1997. — 582 с.
9. Кармазин В. В., Кармазин В. И. Магнитные и электрические методы обогащения. — М.: Недра, 1988. — 304 с.
10. Мокроусов В. А., Лилеев В. А. Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд. — М.: Недра, 1979. — 192 с.
11. Терещенко С. В., Денисов Г. А., Марчевская В. В. Радиометрические методы опробования и сепарации минерального сырья. — СПб.: МАНЭБ, 2005. — 264 с.

- 12. Shemyakin V. S., Skopova L. V., Kuzmin V. G., and Sokolov I. V.** X-ray radiometric processing technology for quartz raw material, *Eurasian Min.*, 2016, No. 2. — P. 20–22.
- 13. Knapp H., Neudert K., Schropp C., and Wotruba H.** Viable applications of sensor-based sorting for the processing of mineral resources, *ChemBioEng Reviews*, 2017, Vol. 1, No. 3. — P. 86–95.
- 14. Seerane K. and Erch G.** Investigation of sorting technology to remove hard pebbles and recover copper bearing rocks from an autogenous circuit, *Proc. of 6th Southern Africa Base Metals Conference*, 2011. — P. 123–136.
- 15. Murphy B., van Zyl J., and Domingo G.** Underground preconcentration by ore sorting and coarse gravity separation, *Proc. of Narrow Vein Mining conference*, 2012. — P. 26–27.
- 16. Sreenivas T. and Venkatkrishnan R. R.** Preconcentration of molybdenum from a low-grade primary Mo ore by physical beneficiation, *Int. J. Metall. Eng.*, 2012, Vol. 1, No. 5. — P. 96–101.
- 17. Терещенко С. В.** Основные положения люминесцентной сепарации минерального сырья. — Апатиты: КФ ПетрГУ, 2002. — 145 с.
- 18. Терещенко С. В., Марчевская В. В., Черноусенко Е. В., Рухленко Е. Д., Павлишина Д. Н., Смольняков А. А.** Комплексная рудоподготовка в технологии обогащения бедных апатит-нефелиновых руд // *ГИАБ*. — 2015. — № 1. — С. 35–41.

Поступила в редакцию 21/XI 2018

После доработки 10/XII 2018

Принята к публикации 29/I 2019