

УДК 622.7

**С.В. Терешенко, В.В. Марчевская, Е.В. Черноусенко,
Е.Д. Рухленко, Д.Н. Павлишина, А.А. Смольняков**

КОМПЛЕКСНАЯ РУДОПОДГОТОВКА В ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ БЕДНЫХ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ РУД

Рассмотрено влияние комплексной рудоподготовки, включающей процессы предварительного обогащения, на технологические показатели переработки бедных руд на примере апатит-нефелиновых руд месторождения Олений Ручей Хибинского рудного района Кольского полуострова. По результатам исследований, выполненных в соответствии с приоритетными направлениями в области переработки минерального сырья, установлено, что предварительное обогащение апатит-нефелиновых руд посредством рентгенолюминесцентной сепарации позволяет за счет вывода из процессов глубокого обогащения более 27% пустых крупнокусковых пород сформировать рудопоток более высокого качества, повысить технологические показатели флотационного обогащения апатит-нефелиновых руд и уменьшить количество тонкоизмельченных хвостов. Значительное сокращение количества горной массы, поступающей на дезинтеграцию и дальнейшие процессы переработки руд, способствует снижению энергозатрат и затрат материальных ресурсов в дробильно-измельчительном и флотационном переделах, в хвостовом хозяйстве. Уменьшение количества тонкоизмельченных хвостов совместно с утилизацией отсортированных отвальных кусковых пород, позволит снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду в районе ГОКа «Олений Ручей» и повысить комплексность использования минерального сырья.

Ключевые слова: исходная руда, предварительное обогащение, покусковая рентгенолюминесцентная сепарация, флотация, технологические показатели, утилизация отсортированных пород.

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция вовлечения в эксплуатацию месторождений, представленных бедными и труднообогатимыми рудами, со сложными горно-геологическими условиями их отработки.

Разработка таких месторождений без существенного изменения традиционной технологии горного производства экономически нецелесообразна, а переработка бедных и некондиционных руд, помимо значительного увеличения себестоимости товарного продукта, за счет увеличения расхода токсичных реагентов и количества складированных тонкоизмельченных хво-

стов приводит к ухудшению экологической обстановки в районе горно-рудного предприятия.

В соответствии с концепцией устойчивого развития в настоящее время в условиях возрастающей сложности минерального сырья и снижения его качества приоритетным направлением развития недропользования является создание ресурсосберегающих экологически сбалансированных технологий разработки рудного и техногенного сырья с развитым переделом рудоподготовки или системой управления качеством добываемого минерального сырья, включающим комплекс операций по обработке кусковой горной

массы, обеспечивающим подачу на обогащение одного или нескольких технологических типов кондиционной руды или использование их в качестве товарного продукта [1, 2, 3].

Исследования по оценке технологической эффективности использования разделительного принципа управления качеством руд выполнены на материале технологической пробы апатит-нефелиновых руд месторождения Олений Ручей массой около 2 т. Максимальный размер кусков в пробе составлял около 200 мм.

Месторождение «Олений Ручей» характеризуется наиболее сложным геологическим строением среди хибинских месторождений апатит-нефелиновых руд, присутствием до 38% разубоживающих пород в его залежах [4], что обуславливает неравномерность рудной массы, поступающей на обогащение, по минеральному и химическому составу. Эти факторы совместно с наличием в составе руд вредных минералов оказывают негативное влияние на процессы глубокого обогащения апатит-нефелиновых руд и повышают себестоимость их переработки.

Одним из способов управления качеством руд, поступающих на обогащательную фабрику, по разделительному принципу является крупнокусковая предконцентрация.

С целью оценки рациональности крупнокускового обогащения апатит-нефелиновых руд месторождения Олений Ручей изучено распределение апатит-нефелиновых руд технологической пробы по содержанию P_2O_5 в кусках и определена контрастность руд по его содержанию, как объективная характеристика обогатимости минерального сырья любыми методами крупнокускового обогащения, в том числе и радиометрическими.

По результатам проведенных работ установлено неравномерное

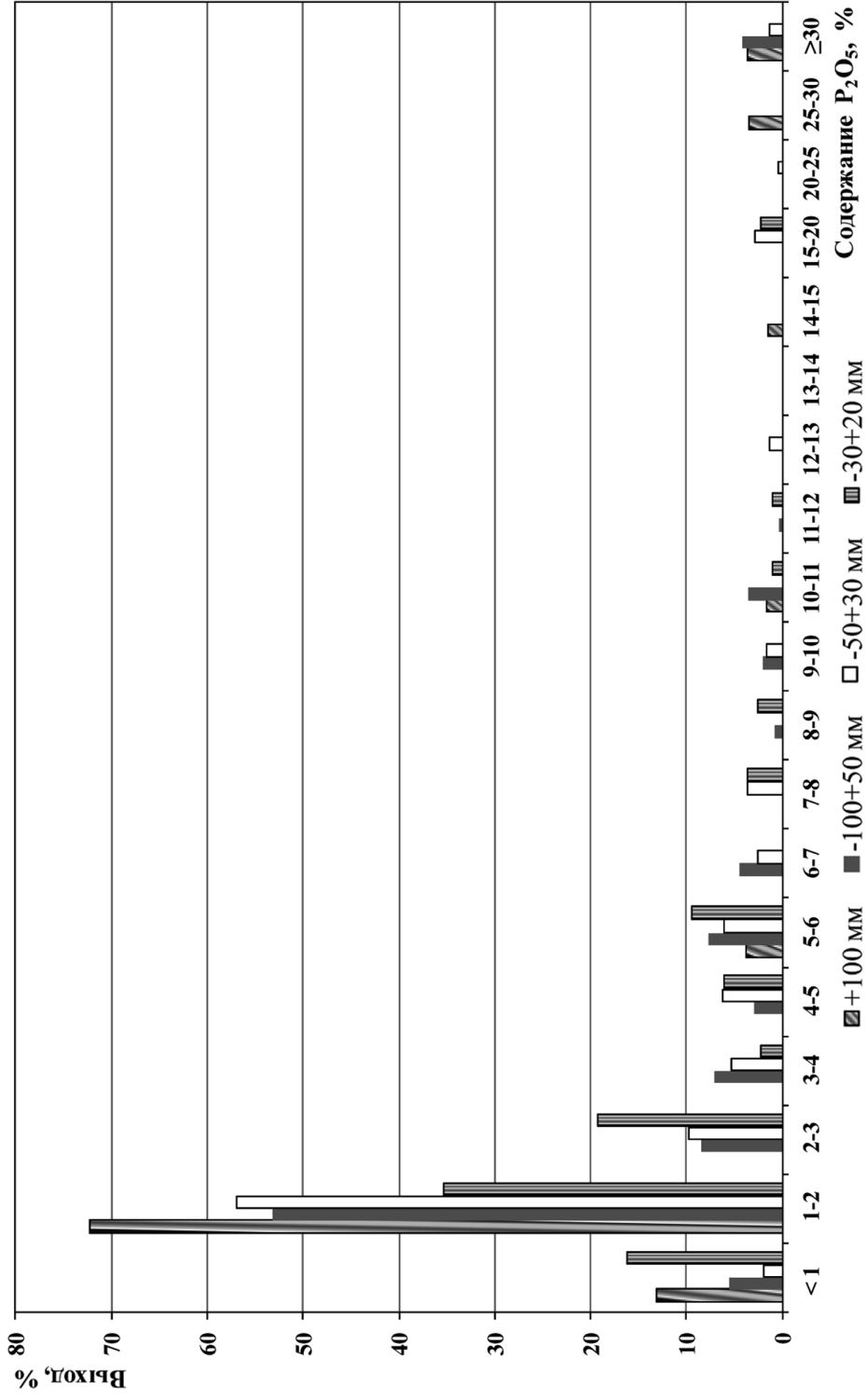
распределение основного полезного компонента в кусковой части руды технологической пробы. В отдельных классах крупности содержится от 16,6 до 34,4% кусков с содержанием P_2O_5 менее 1% со средним содержанием 0,52–0,7%; от 50,5 до 79,5% кусков с содержанием P_2O_5 менее 1,5% со средним содержанием 0,8–1,0%; от 63,1 до 82,6% кусков с содержанием P_2O_5 менее 2,0% со средним содержанием 1,0–1,1%; 69–85% кусков с содержанием P_2O_5 менее 3,0% со средним содержанием 1,0–1,2% (рисунок). Среднее содержание основных полезных компонентов в кусковой части руды составляет:

- в материале крупностью -200+20 мм P_2O_5 – 3,66%, $Al_2O_{3\text{общ.}}$ – 13,31%;

- в материале крупностью -20+10 мм P_2O_5 – 4,16%, $Al_2O_{3\text{общ.}}$ – 13,92%.

Мелкий материал -10 мм – рудный отсев – обогащен апатитом, в нем содержится 7,22% P_2O_5 и 12,34% $Al_2O_{3\text{общ.}}$. Среднее содержание полезных компонентов в руде технологической пробы составляет 5,4% P_2O_5 и 12,8% $Al_2O_{3\text{общ.}}$.

Предварительное обогащение бедных апатит-нефелиновых руд месторождения Олений Ручей и определение технологических показателей их предконцентрации выполнено с использованием наиболее эффективного для апатит-нефелиновых руд рентгенолюминесцентного метода – метода прямого определения апатита. Проведенными ранее исследованиями на рудах месторождений Коашва, Ньюкпахк, Кукисвумчорр показано, что хибинский апатит обладает устойчивым разделительным признаком – высокой интенсивностью рентгенолюминесценции в желто-оранжевой области спектра, обусловленной наличием в минерале примесных ионов марганца. Другие минералы, облада-



Распределение апатит-нефелиновых руд разной крупности по содержанию P_2O_5 в кусковой части рудной массы

ющие интенсивной люминесценцией под воздействием рентгеновского излучения, в апатит-нефелиновых рудах отсутствуют [5].

В связи с тем, руда крупностью -20+10 мм обеднена апатитом, а выход рудного отсева -10 мм в данной технологической пробе велик (54,2%), было решено подвергнуть сепарации и материал класса -20+10 мм.

Для осуществления сепарации в ручном режиме на рентгенолюминесцентном стенде предварительно по корреляционной связи параметра рентгенолюминесцентного (РЛ) разделения и содержания P_2O_5 в кусках было найдено граничное значение РЛ параметра, при котором содержание P_2O_5 в кусках каждого класса крупности составляет не более 3%. По этому значению производилось выделение измеренных кусков в хвосты при условии не превышения величины их РЛ параметра заданного граничного.

По результатам минералого-технологических исследований продуктов предварительного обогащения крупностью -200+10 мм установлено, что в составе крупнокусковых хвостов резко преобладают ийолиты и уртиты различного состава, суммарное количество которых в разных классах крупности колеблется от 80% до 96%. В породную фракцию полностью переходят рисчорриты, хибиниты и ювиты. По петрографическому составу крупнокусковые хвосты соответствует безапатитовым породам.

Крупнокусковый концентрат включает все разновидности руд с вариациями состава от бедных до богатых. Кроме того, сюда попадают уртиты и ийолиты, обогащенные апатитом, а также полевошпатовые ийолиты с содержанием апатита 7–15%.

По результатам анализа продуктов кускового разделения – хвостов и обогащенного продукта – определены технологические показатели предконцентрации рентгенолюминесцентным методом апатит-нефелиновых руд крупностью от -200+100 мм до -20+10 мм и рассчитаны технологические показатели предконцентрации материала крупностью -200+10 мм с учетом выходов составляющих классов. При выделении в крупнокусковые хвосты 59,76% пород с содержанием 1,05% P_2O_5 и 13,67% $Al_2O_{3\text{общ.}}$ получен кусковый концентрат, содержащий 7,06% P_2O_5 и 12,98% $Al_2O_{3\text{общ.}}$, со степенью концентрации основного полезного компонента более 2.

Показатели предварительного обогащения бедных апатит-нефелиновых руд технологической пробы с присоединением к концентрату РЛ разделения рудного отсева -10 мм приведены в табл. 1.

Проведены сравнительные исследования по флотации руд при использовании разделительного принципа управления качеством руд, т.е. сравнительные исследования обогатимости исходной руды и прошедшей предконцентрацию.

Таблица 1

Показатели предварительного обогащения бедных апатит-нефелиновых руд с присоединением к концентрату РЛ рудного отсева

Наименование продукта	Выход от руды, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		P_2O_5	$Al_2O_{3\text{общ.}}$	P_2O_5	$Al_2O_{3\text{общ.}}$
Концентрат	72,65	7,18	12,50	94,78	70,84
Хвосты	27,35	1,05	13,67	5,22	29,16
Исходная руда	100	5,50	12,82	100	100

По результатам предварительных исследований установлена оптимальная крупность питания флотации апатит-нефелиновых руд, содержащего 20,6% класса плюс 0,16 мм, при которой достигается наибольшее извлечение P_2O_5 в черновой концентрат, что полностью согласуется с данными минералогических исследований, которыми установлено, что при этой крупности апатит на 98% представлен раскрытыми зернами.

Оптимальный расход реагентов, используемых на ГОК «Олений Ручей» составил: жидкого стекла – 55 г/т, собирательной смеси – 80 г/т (60 г/т в основную и 20 г/т в контрольную флотацию), Неонола – 15 г/т (10 г/т в основную и 5 г/т в контрольную флотацию).

Моделирование флотации исходной и предварительно обогащенной руды в условиях непрерывного процесса осуществлялось путем ее флотации в замкнутом цикле. По схеме замкнутого цикла камерный продукт I перерешивной операции и пенный продукт контрольной флотации возвращались в голову основной флотации. Камерный продукт II перерешивки по-

давался на I перерешивку, а камерный продукт III перерешивки – в предыдущую операцию. При проведении опытов использовалась водопроводная вода, температура которой поддерживалась на уровне 22–24 °С, значения pH пульпы после подачи реагентов составляли 9,4–9,5.

Основные результаты сравнительных флотационных исследований по обогащению исходной бедной руды месторождения Олений ручей и прошедшей предконцентрацию сводятся к следующему.

При флотации предварительно обогащенной руды достигнуты более высокие технологические показатели, что связано с повышением в руде не только содержания пятиоксида фосфора, но и соотношения апатита с другими кальцийсодержащими минералами, главным образом, пироксенами и сфеном [6].

В этом случае получен более качественный концентрат, содержащий 40,17% P_2O_5 против 39,69% при флотации исходной руды, с более высоким (на 4,4%) выходом, и, соответственно, с более высоким (на 4,8%) извлечением в него P_2O_5 от операции флотации.

Таблица 2

Сравнительные показатели флотации исходной и предварительно обогащенной апатит-нефелиновой руды

Наименование продукта	Выход от операции,%	Выход от руды,%	Содержание,%		Извлечение,%	
			P ₂ O ₅	Al ₂ O _{Зобщ.}	P ₂ O ₅	Al ₂ O _{Зобщ.}
Флотация исходной руды						
Концентрат	11,25	11,25	39,69	0,37	84,68	0,33
Хвосты флотации	88,75	88,75	0,91	14,19	15,32	99,67
Исходная руда	100	100	5,27	12,64	100	100
Флотация предварительно обогащенной руды						
Концентрат	15,66	11,38	40,17	0,30	84,69	0,27
Хвосты флотации	84,34	61,27	0,88	14,67	9,99	70,44
Хвосты кусковые	-	27,35	1,05	13,67	5,32	29,29
Исходная руда	100	100	5,40	12,76	100	100

При направлении на флотационный передел значительно меньшего количества рудной массы выход апатитового концентрата получается выше при практически одинаковом извлечении в него основного полезного компонента. Хвосты флотации в обоих случаях содержат около 0,9% P_2O_5 , однако их выход при флотации предварительно обогащенной руды снижается на 27,5%, т.е. на 30% относительных (табл. 2). Значительное сокращение количества горной массы, поступающей на глубокое обогащение, способствует снижению энергозатрат и затрат материальных ресурсов в дробильно-измельчительном и флотационном переделах, сокращению площадей хвостохранилищ, а следовательно, и снижению затрат на транспортировку хвостов и оборотной воды, обслуживание хвостохранилищ.

По результатам исследований установлено, что отсортированные в процессе рентгенолюминесцентной сепарации в крупнокусковые хвосты породы могут быть утилизированы в качестве строительного щебня в нескольких направлениях [4, 7].

Выводы

1. Удаление из исходной руды в процессе рентгенолюминесцентной

сепарации значительной части безапатитовых крупнокусковых пород приводит к увеличению содержания в руде апатита и увеличению соотношения апатита и других кальцийсодержащих безапатитовых минералов более чем в 1,5 раза, что способствует повышению селективности процесса флотации предварительно обогащенной руды, и, соответственно, повышению технологических показателей при одинаковом расходе реагентов.

2. Комплексная система рудоподготовки бедных апатит-нефелиновых руд месторождения Олений Ручей способствуют снижению эксплуатационных затрат на дробление, измельчение, флотацию, на транспортировку хвостов и обслуживание хвостохранилищ.

3. Отсортированные в крупнокусковые хвосты породы в соответствии с их свойствами могут быть утилизированы, что повышает комплексность использования минерального сырья. Утилизация отвальных кусковых пород совместно с уменьшением количества тонкоизмельченных хвостов позволит не только повысить технико-экономические показатели работы горно-обогатительного комбината «Олений Ручей», но и снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду в районе ГОКа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Славиковский О.В., Славиковская Ю.О. Основные направления развития физико-технических геотехнологий // Известия вузов. Горный журнал. – 2002. – № 3. – С. 111–116.
2. Чантурия В.А. Состояние и перспективы обогащения руд в России // Цветные металлы. – 2002. – № 2. – С. 15–21.
3. Чантурия В.А., Вайсберг Л.А., Козлов А.П. Приоритетные исследования в области переработки минерального сырья // Обогащение руд. – 2014. – № 2. – С. 3–9.
4. Новые хибинские апатитовые месторождения / Под ред. Е.А. Каменева, Д.А. Минеева. – М.: Недра, 1982. – 182 с.
5. Гершенков А.Ш., Мухина Т.Н., Артемьев А.В. Особенности минерального состава

ва апатит-нефелиновых руд месторождения Олений ручей и их влияние на показатели обогащения // Обогащение руд. – 2014. – № 3. – С. 33–36.
6. Терешенко С.В., Денисов Г.А., Марчевская В.В. Радиометрические методы опробования и сепарации минерального сырья. – СПб.: МАНЭБ, 2005. – 264 с.
7. Исследование физико-механических свойств отходов предварительной концентрации апатито-нефелиновой руды месторождения «Олений Ручей»: отчет о НИР; рук. Е.Е. Каменева. – Петрозаводск: ПетрГУ, 2014. – 19 с. **ПИАБ**

Терешенко Сергей Васильевич – доктор технических наук, зав. лабораторией,
e-mail: tereshchenko@goi.kolasc.net.ru,

Марчевская Валентина Викторовна – кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник, e-mail: vvm@goi.kolasc.net.ru,

Черноусенко Елена Владимировна – научный сотрудник,

Рухленко Елена Дмитриевна – ведущий технолог,

Павлишина Дарья Николаевна – инженер 1 категории,

Смольняков Антон Александрович – аспирант,

Горный институт Кольского научного центра РАН.

UDC 622.7

COMPLEX ORE PRETREATMENT IN TECHNOLOGY OF LOW GRADE APATITE-NEPHELINE ORE CONCENTRATION

Tereshchenko S.V., Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory,

e-mail tereshchenko@goi.kolasc.net.ru,

Marchevskaya V.V., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Senior Researcher,

e-mail vvm@goi.kolasc.net.ru,

Chernousenko E.V., Researcher,

Rukhlenko E.D., Leading Technologist,

Pavlishina D.N., Engineer,

Smolnyakov A.A., Graduate Student,

Mining Institute of Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences.

The paper considers influence of complex ore pretreatment including processes of preliminary concentration on technological indexes of low grade ore processing on the example of apatite-nepheline ore from the Oleniy Ruchey deposit, Khibiny ore region the Kola Peninsula.

The studies were carried out in accordance with priority tendencies in mineral processing area. The investigation results have established that preliminary concentration of apatite-nepheline ores by X-ray luminescent separation allows forming ore flow of higher quality, increasing technological indexes for flotation concentration of apatite-nepheline ores, and decreasing quantity of fine tailings. This becomes possible due to withdrawing more than 27% of lumpy barren rocks from the deep concentration processes.

Considerable reduction of lode rock arriving for disintegration and further processes of ore processing promote to decrease of power and material resources consumption in crushing, grinding and flotation processes, as well as in tailing disposal. Reduction of fine tailings volume jointly with recycling of rejected lumpy barren rocks will allow decreasing man-made load on environment at the Oleniy Ruchey mining area and increasing complexity of mineral raw material use.

Key words: crude ore, preliminary concentration, lumpy X-ray luminescent separation, flotation, technological indexes, recycling of rejected rocks.

REFERENCES

1. Slavikovskii O.V., Slavikovskaya Yu.O. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2002, no 3, pp. 111–116.
2. Chanturiya V.A. *Tsvetnye metally*. 2002, no 2, pp. 15–21.
3. Chanturiya V.A., Vaisberg L.A., Kozlov A.P. *Obogashchenie rud*. 2014, no 2, pp. 3–9.
4. *Novye khibinskie apatitovye mestorozhdeniya*. Pod red. E.A. Kameneva, D.A. Mineeva (New Khibiny apatite deposits. Kamenev E.A., Mineev D.A. (Eds.)), Moscow, Nedra, 1982, 182 p.
5. Gershenkop A.Sh., Mukhina T.N., Artem'ev A.V. *Obogashchenie rud*. 2014, no 3, pp. 33–36.
6. Tereshchenko S.V., Denisov G.A., Marchevskaya V.V. *Radiometricheskie metody oprobovaniya i separatsii mineral'nogo syr'ya* (Radiometric methods of mineral raw materials sampling and separating), Saint-Petersburg, MANEB, 2005, 264 p.
7. *Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv otkhodov predvaritel'noi kontsentratsii apatito-nefelinovoi rudy mestorozhdeniya «Olenii Ruchei»: otchet o NIR*; ruk. E.E. Kameneva (Physical-mechanical properties research of apatite-nepheline ores preliminary concentration waste from the Oleniy Ruchey deposit), Petrozavodsk, PetrGU, 2014, 19 p.