

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

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРИОРИТЕТНЫМ НАПРАВЛЕНИЯМ ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

На основании исследований, выполненных в соответствии с приоритетными направлениями в области переработки минерального сырья, обоснована рациональность разработки технологии переработки руд с нетрадиционной первичной переработкой, включающей передел предварительного концентрирования полезного компонента. Показано, что с использованием радиометрической крупнукосковой сепарации на начальной стадии переработки руд возможно удалить более 36% отвальных пород из рудной массы не только бедных, но и рядовых апатит-нефелиновых руд месторождения Олений Ручей (Кольский полуостров). Удаление пустых пород в процессе рентгенолюминесцентной сепарации позволяет в 1,5 раза увеличить содержание апатита в руде, в 1,8 раза повысить соотношение массовых долей апатита с другими кальцийсодержащими минералами, что способствует повышению технологических показателей флотационного обогащения, а также сократить энергозатраты в дробильно-измельчительном переделе – на 64% при дроблении и на 40% при измельчении. Включение операции радиометрической предконцентрации в процессы переработки апатит-нефелиновых руд способствует созданию энерго- и экологосберегающей технологии за счет снижения эксплуатационных и капитальных затрат в дробильно-измельчительном и флотационном переделах, в хвостовом хозяйстве, уменьшения площадей хвостохранилищ и вторичного использования отсортированных крупнукосковых пород.

Ключевые слова: рядовая апатит-нефелиновая руда, предварительное концентрирование, крупнукосковая рентгенолюминесцентная сепарация, дробление, измельчение, флотация, технологические показатели, снижение энергозатрат, хвостохранилище.

Основные тенденции горного производства России характеризуются вовлечением в переработку руд и техногенного минерального сырья с низким содержанием ценных компонентов, а также эксплуатацией месторождений сложного геологического строения, которые предопределяют сложность перерабатываемого сырья переменного состава, что в свою очередь оказывает негативное влияние на процессы глубокого обогащения руд и повышает себестоимость их переработки. Переработка такого минерального сырья без существенного изменения традиционной

технологии горно-обогажительного производства во многих случаях может оказаться нерентабельной.

Другой проблемой, характерной для многих горнопромышленных регионов страны, является обеспечение экологической безопасности при освоении недр.

Многочисленные отвалы пород и хвостохранилища в течение длительного времени и после закрытия горно-обогажительных предприятий остаются источниками высокого техногенного давления на окружающую среду, поставляя в водные системы загрязняющие вещества и тонкодисперсный материал.

Эта ситуация усугубляется в Арктической зоне, поскольку ее природа не в состоянии переработать накопленные отходы даже за сотни лет.

Проблема накопленного экологического ущерба в результате хозяйственной деятельности в местах дислокации предприятий, которая осуществлялась в прошлом и обусловила нынешнее загрязнение территорий, относится к одной из основных экологических проблем Арктического региона [1].

Долгосрочные ориентиры устойчивого развития арктической зоны России основаны на эффективном и рациональном освоении и использовании природных ресурсов с обеспечением охраны окружающей среды Арктики при качественно новом подходе, базирующемся на преодолении резких противоречий экономического и экологического аспектов [2].

Приоритетным направлением развития недропользования в современных условиях является создание ресурсосберегающих экологически сбалансированных технологий разработки рудного и техногенного сырья с развитым переделом первичной переработки (рудоподготовки) минерального сырья, обеспечивающим [3, 4]:

- значительное сокращение количества горной массы, поступающей на дезинтеграцию;
- предельно возможное снижение энергетических и других материальных ресурсов в процессах дробления и измельчения;
- предварительное формирование одного или нескольких технологических типов кондиционной руды для последующего обогащения или непосредственного использования в качестве товарного продукта;
- создание технологических процессов обогащения со значительным снижением расхода воды.

В соответствии с приоритетными направлениями в области переработ-

ки минерального сырья исследования по обоснованию рациональности разработки технологии переработки руд с нетрадиционной первичной переработкой, включающей передел предварительного концентрирования полезного компонента, выполнены на примере технологической пробы рядовых апатит-нефелиновых руд месторождения «Олений Ручей» крупностью -200 мм, массой около 2 т.

Апатит-нефелиновые породы месторождения «Олений Ручей» представлены пятнистыми, пятнисто-полосчатыми, линзовидно-полосчатыми, блоковыми, полосчатыми, массивными, брекчиевыми, апатитовыми уртитам и ийолитами, среди которых в виде прослоев ксенолитов и жил включены разубоживающие, практически безапатитовые породы, составляющие до 38% от объема залежей [5].

В настоящей работе в качестве способа предварительного концентрирования основного полезного компонента руд – P_2O_5 , единственным концентратом которого является апатит, – была выбрана крупнокусковая сепарация, характеризующаяся наибольшей селективностью.

По результатам исследований установлено неравномерное распределение основного полезного компонента в кусковой части апатит-нефелиновых руд крупностью более 20 мм. В отдельных классах крупности от -200+100 мм до -30+20 мм содержится от 17 до 57% кусков с содержанием P_2O_5 менее 1% со средним содержанием 0,5–0,8%; от 50 до 79% кусков с содержанием P_2O_5 менее 1,5% со средним содержанием 0,7–1,0%; от 63 до 80% кусков с содержанием P_2O_5 менее 2,0% со средним содержанием 0,9–1,1%; 69–85% кусков с содержанием P_2O_5 менее 3,0% со средним содержанием 0,9–1,2% (рис. 1). Материал крупностью более 20 мм обеднен апатитом, среднее содержание P_2O_5

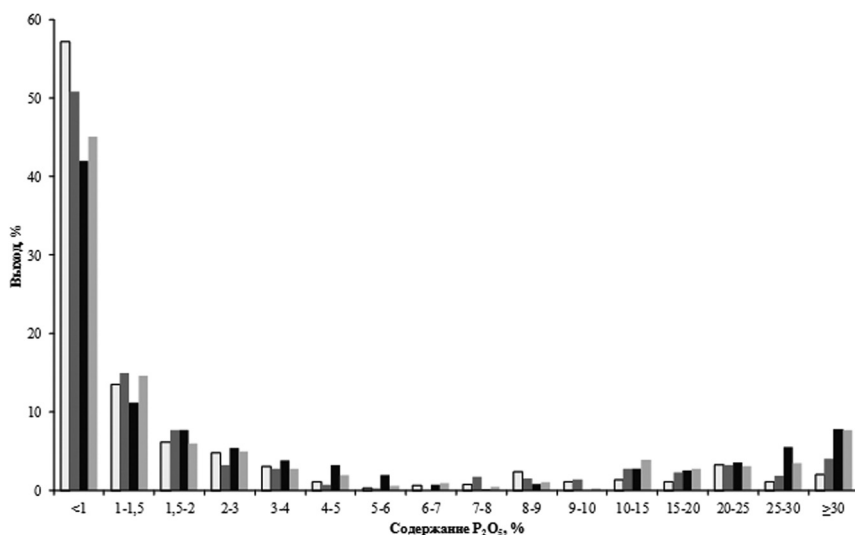


Рис. 1. Распределение рядовых апатит-нефелиновых руд разной крупности по содержанию P_2O_5 в кусках

в нем составляет всего 5,5%, в то время как в мелком материале содержится 16,5% P_2O_5 . Рудный отсев -10 мм, еще более обогащен апатитом, в нем содержится 18,05% P_2O_5 .

Среднее содержание полезных компонентов в технологической пробе рядовых руд составляет 10,1% P_2O_5 и 14,0% Al_2O_3 _{общ.}. Выход сепарируемого класса +20 мм составил 57,9%.

Предварительное обогащение апатит-нефелиновых руд месторождения «Олений Ручей» и определение технологических показателей их preconcentрации выполнено с использованием наиболее эффективного для апатит-нефелиновых руд рентгенолюминесцентного метода – метода прямого определения апатита. По результатам проведенных ранее исследований 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, обладающие интенсивной люминесценцией в этой области спектра под воздействием

рентгеновского излучения, в апатит-нефелиновых рудах отсутствуют [6].

Сепарация проведена на рентгенолюминесцентном стенде по граничному значению параметра рентгенолюминесцентного разделения, соответствующему содержанию P_2O_5 в кусках каждого класса крупности, равному составляет 2%.

Петрографическое изучение продуктов разделения показало, что крупнокусковые хвосты кусковые сепарации представлены безапатитовыми породами. В их составе резко преобладают ийолиты и уртиты, суммарное количество которых в разных классах крупности колеблется от 72% до 92%. В породную фракцию практически полностью переходят рихсморриты, малиниты, хибиниты и ювиты.

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%.

Таким образом, минералого-технологические исследования подтверди-

Таблица 1

Показатели предварительного обогащения рядовых апатит-нефелиновых руд

Наименование продукта	Выход от руды, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		P_2O_5	$Al_2O_{3\text{общ.}}$	P_2O_5	$Al_2O_{3\text{общ.}}$
Концентрат	63,10	15,52	11,87	96,87	53,37
Хвосты	36,90	0,86	17,73	3,13	46,63
Исходная руда	100	10,11	14,03	100,00	100,00

ли правильность выделения крупнокусковых хвостов из апатит-нефелиновых руд рентгенолюминесцентным методом.

На основании анализа продуктов РП разделения – хвостов и обогащенной руды – определены технологические показатели предконцентрации рентгенолюминесцентным методом руд выделенных классов крупности и рассчитаны технологические показатели предконцентрации апатит-нефелиновых руд с учетом выходов составляющих классов.

При выделении в крупнокусковые хвосты 56,77% пород крупностью -200+20 мм с содержанием 0,86% P_2O_5 и 17,73% $Al_2O_{3\text{общ.}}$ получен кусковый концентрат, содержащий 13,62% P_2O_5 и 13,56% $Al_2O_{3\text{общ.}}$, со степенью концентрации основного полезного компонента 2,3.

Показатели предварительного обогащения рядовых апатит-нефелиновых руд с присоединением к концентрату РП разделения рудного отсева -20 мм приведены в табл. 1.

Удаление в процессе сепарации безapatитовых пород, характеризующихся повышенной крепостью по сравнению с рядовой апатит-нефелиновой рудой, приводит не только к повышению содержания основного полезного компонента в обогащенной руде, но и снижению ее прочностных свойств. Установлено, что коэффициент крепости пород по шкале проф. М.М. Протодяконова в обогащенной руде по сравнению с исходной сни-

зился на 30%. Уменьшение прочностных характеристик рудной массы способствует повышению ее дробимости и измельчаемости.

По результатам сравнительных исследований дробимости и измельчаемости руд, выполненных на лабораторном оборудовании соответственно по методике института «Механобр» и Ф. Бонда [7, 8], установлено, что энергозатраты на дробление 1 т руды предварительно обогащенной руды снижаются на 44%, на измельчение – на 5% от соответствующих величин при обработке исходной руды. В связи с тем, что в процессе сепарации из рудной массы рядовых руд удаляется 36,9% кусков, содержащих не более 2% P_2O_5 , соответственно на дробильно-измельчительный и последующие переделы глубокого обогащения поступает 63,1% от объема исходной рудной массы. Сокращение объема перерабатываемой руды совместно со снижением энергозатрат на дробление и измельчение 1 т руды снижает энергозатраты на этих переделах в целом на 64% и на 40% соответственно (рис. 2).

Выполнены сравнительные лабораторные испытания флотационной обогатимости исходной руды и прошедшей предконцентрацию.

По результатам предварительных исследований оптимальной принята крупность питания флотации апатит-нефелиновых руд, содержащего около 20% класса плюс 0,16 мм, что согласуется с данными минералогиче-

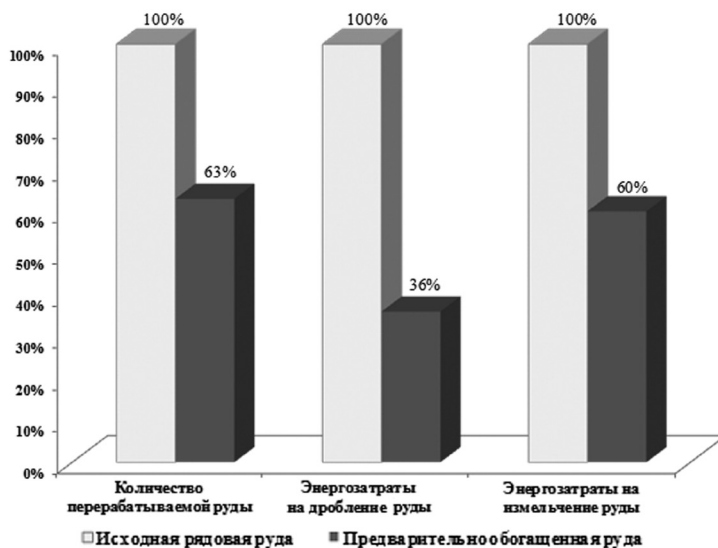


Рис. 2. Сравнительная характеристика энергозатрат в дробильно-измельчительном переделе при переработке исходных рудовых руд месторождения «Олений Ручей» и прошедших предварительное обогащение

ских исследований, показавшими, что при этой крупности апатит на 98% представлен раскрытыми зернами.

Оптимальный расход реагентов, используемых на ГОК «Олений Ручей» составил: жидкого стекла – 55 г/т, неонла – 15 г/т, собирательной смеси – 106–135 г/т.

Моделирование флотации исходной и предварительно обогащенной руды в условиях непрерывного процесса осуществлялось путем ее флотации в замкнутом цикле. Исследования проводились по схеме с двумя перечистными операциями. По схеме замкнутого цикла камерный продукт I перечистой операции и пенный продукт контрольной флотации возвращались в голову основной флотации. Камерный продукт II перечистки подавался в предыдущую операцию. При проведении всех 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 сводятся к следующему.

При флотации предварительно обогащенной руды достигнуты более высокие технологические показатели за счет увеличения содержания апатита в руде более чем в 1,5 раза и снижения соотношения массовых долей безапатитовых кальцийсодержащих минералов и апатита более чем в 1,8 раза, что способствует повышению селективности процесса апатитовой флотации [9].

При флотации предварительно обогащенной рудовой руды получен концентрат с более высоким содержанием P_2O_5 , 40,78% против 39,75% при флотации исходной руды, со значительно более высоким (на 12,87%) выходом и незначительно более высоким (на 0,26%) извлечением в него P_2O_5 от операции флотации. В обоих случаях получены хвосты флотации с низким содержанием P_2O_5 – 0,3 и 0,5%, соответственно при флотации исходной и предварительно обогащенной руды.

Таблица 2

Сравнительные показатели флотации исходной и предварительно обогащенной рядовой апатит-нефелиновой руды

Наименование продукта	Выход от операции,%	Выход от руды,%	Содержание,%		Извлечение от руды,%	
			P ₂ O ₅	Al ₂ O _{Зобш.}	P ₂ O ₅	Al ₂ O _{Зобш.}
Флотация исходной руды						
Концентрат	25,69	25,69	39,75	0,38	97,79	0,72
Хвосты флотации	74,31	74,31	0,31	18,01	2,21	99,28
Исходная руда	100	100	10,44	13,48	100	100
Флотация предварительно обогащенной руды						
Концентрат	38,56	24,33	40,78	0,35	95,07	0,62
Хвосты флотации	61,44	38,77	0,51	18,36	1,89	51,78
Хвосты кусковые	–	36,90	0,86	17,73	3,04	47,60
Исходная руда	100	100	10,44	13,75	100	100

Подача на флотационный передел значительно меньшего количества рудной массы (на 36,9%) способствует сокращению энерго- и материальных затрат на флотационном переделе, в том числе снижению расхода воды. При этом выход апатитового концентрата при флотации обогащенной получается незначительно, всего на 1,4% ниже выхода концентрата из исходной руды. Выход тонкоизмельченных хвостов при флотации предварительно обогащенной руды снижается на 35,54%, т.е. на 47,8% относительных (табл. 2). Это приводит к значительному снижению объемов перекачиваемой пульпы в хвостохранилище и подачи оборотной воды из него, сокращению площадей хвостохранилищ и, соответственно, сокращению расходов энергетических и других материальных ресурсов на этих переделах. Сокращение площадей хвостохранилищ, в свою очередь, способствует снижению их техногенного воздействия на окружающую среду за счет уменьшения пылеобразования и проникновения в почву и водоемы тонкодисперсного материала и реагентов.

По результатам исследований установлено, что отсортированные в процессе рентгенолюминесцентной сепарации безапатитовые крупнокусковые породы могут быть утилизированы в качестве строительного щебня в нескольких направлениях [5, 10].

В целом включение операции предконцентрации в процессы переработки апатит-нефелиновых руд способствует созданию энерго- и экологосберегающей технологии за счет снижения эксплуатационных и капитальных затрат в дробильно-измельчительном и флотационном переделах, в хвостовом хозяйстве, уменьшения площадей хвостохранилищ и вторичного использования отсортированных крупнокусковых пород.

Выводы

1. Использование радиометрической крупнокусковой сепарации на начальной стадии переработки позволяет удалить более 36% отвальных пород из рудной массы не только бедных, но и рядовых апатит-нефелиновых руд.

2. Предварительное крупнокусковое обогащение рядовых апатит-не-

фелиновых руд месторождения «Олений Ручей» в процессе рентгенолюминесцентной сепарации позволяет в 1,5 раза увеличить содержание апатита в руде, в 1,8 раза понизить соотношение содержаний апатита с другими кальцийсодержащими минералами, что способствует повышению технологических показателей флотационного обогащения, а также сократить энергозатраты в дробильно-измельчительном переделе – на 64% при дроблении и на 40% при измельчении.

3. Отсортированные в крупнокусковые хвосты породы в соответствии

с их свойствами могут быть утилизированы, что повышает комплексность использования минерального сырья.

4. Включение операции радиометрической предконцентрации в процессы переработки апатит-нефелиновых руд способствует созданию энерго- и экологосберегающей технологии за счет снижения эксплуатационных и капитальных затрат в дробильно-измельчительном и флотационном переделах, в хвостовом хозяйстве, уменьшения площадей хвостохранилищ и вторичного использования отсортированных крупнокусковых пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов Ю.И. Арктика: к проблеме накопленного экологического ущерба // Арктика: экология и экономика – 2013. – № 2 (10). – С. 18–27.

2. Додин Д.А. Минерально-сырьевые ресурсы Арктики. – М.: Геоинформмарк, 2005. – 176 с.

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. Славиковский О.В., Славиковская Ю.О. Основные направления развития физико-технических геотехнологий // Известия вузов. Горный журнал. – 2002. – № 3. – С. 111–116.

5. Новые хибинские апатитовые месторождения / Под ред. Е.А. Каменева, Д.А. Минеева – М.: Недра, 1982. – 182 с.

6. Терещенко С.В., Денисов Г.А., Марчевская В.В. Радиометрические методы опробования и сепарации минерального сырья. – СПб.: МАНЭБ, 2005. – 264 с.

7. Аккерман Ю.Э., Костин И.М. К вопросу определения дробимости руд / Исследования по рудоподготовке, обогащению и комплексному использованию руд цветных и редких металлов: сборник научных трудов. – Л.: ВНИПИ Механобр., 1978. – С. 9–14.

8. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы / Под ред. О.С. Богданова, В.А. Олевского. – М.: Недра, 1982. – 366 с.

9. Гершенкоп А.Ш., Мухина Т.Н., Артемьев А.В. Особенности минерального состава апатит-нефелиновых руд месторождения Олений ручей и их влияние на показатели обогащения // Обогащение руд. – 2014. – № 3. – С. 33–36.

10. Каменева Е.Е. Исследование физико-механических свойств отходов предварительной концентрации апатито-нефелиновой руды месторождения «Олений Ручей»: отчет о НИР. – Петрозаводск: ПетрГУ, 2014. – 19 с. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Терещенко 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,

Павлишина Дарья Николаевна – инженер 1 кат.,

Рухленко Елена Дмитриевна – ведущий технолог,

Горный институт Кольского научного центра РАН.

PRIORITY INVESTIGATIONS ON MINERAL RAW MATERIAL PROCESSING

*Tereshchenko S.V.*¹, Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory,
e-mail tereshchenko@goi.kolasc.net.ru,

*Marchevskaya V.V.*¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Senior Researcher, e-mail vvm@goi.kolasc.net.ru,

*Chernousenko E.V.*¹, Researcher,

*Rukhlenko E.D.*¹, Leading Technologist,

*Pavlishina D.N.*¹, Engineer,

¹ Mining Institute of Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences,
184209, Apatity, Russia.

The researches have been carried out in accordance with priority guidelines in mineral processing area. On its basis was substantiated rationality of the ore beneficiation technology development with non-traditional primary processing, including production step of preliminary concentrating of main valuable component.

It is shown that application of radiometric large-coarse separation at the initial ore processing stage allows withdrawing more 36% of barren rocks from ore mass of both low grade and raw apatite-nepheline ores from the Oleny Ruchey deposit (the Kola Peninsula).

Withdrawing of barren rocks during X-ray luminescent separation allows increasing apatite content in ore in 1.5 times; increasing ratio of mass fractions of apatite and other calcium-containing minerals in 1.8 times (which assists in increase of technological parameters of flotation beneficiation); and reducing energy consumption in crushing-grinding processes by 64% during crushing and 40% during grinding.

Inclusion of radiometric pre-concentration into apatite-nepheline ore treatment processes contributes to creation of energy-and-environment saving technology due to decreasing operational and capital expenditures during crushing, grinding and flotation processes, in tailing disposals; reducing of tailing dumps areas and secondary use of rejected large-coarse rocks.

Key words: raw apatite-nepheline ore, preliminary concentrating, large-coarse X-ray luminescent separation, crushing, grinding, flotation, production data, reduce of energy consumption, tailing dump.

REFERENCES

1. Sokolov Yu.I. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 2013, no 2 (10), pp. 18–27.
2. Dodin D.A. *Mineral'no-syr'evye resursy Arktiki* (Arctic mineral reserves), Moscow, Geoinformmark, 2005, 176 p.
3. Chanturiya V.A., Vaisberg L.A., Kozlov A.P. *Obogashchenie rud*. 2014, no 2, pp. 3–9.
4. Slavikovskii O.V., Slavikovskaya Yu.O. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2002, no 3, pp. 111–116.
5. *Novye khibinskie apatitovye mestorozhdeniya*. Pod red. E.A. Kameneva, D.A. Mineeva (New apatite deposits in Khibiny. Kamenev E.A., Mineev D.A. (Eds.)), Moscow, Nedra, 1982, 182 p.
6. Tereshchenko S.V., Denisov G.A., Marchevskaya V.V. *Radiometricheskie metody oprobovaniya i separatsii mineral'nogo syr'ya* (Radiometric methods of assaying and separation), Saint-Petersburg, MANEB, 2005, 264 p.
7. Akkerman Yu.E., Kostin I.M. *Issledovaniya po rudopodgotovke, obogashcheniyu i kompleksnomu ispol'zovaniyu rud tsvetnykh i redkikh metallov: sbornik nauchnykh trudov* (Studies on base and rare metal ore pretreatment, processing and multipurpose use: Collection of scientific papers), Leningrad, VNIPI Mekhannobr., 1978, pp. 9–14.
8. *Spravochnik po obogashcheniyu rud. Podgotovitel'nye protsessy*. Pod red. O.S. Bogdanova, V.A. Olevskogo (Ore processing guide. Pretreatment. Bogdanov O.S., Olevskiy V.A. (Eds.)), Moscow, Nedra, 1982, 366 p.
9. Gershenkop A.Sh., Mukhina T.N., Artem'ev A.V. *Obogashchenie rud*. 2014, no 3, pp. 33–36.
10. Kameneva E.E. *Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv otkhodov predvaritel'noi kontsentratsii apatito-nefelinovoi rudy mestorozhdeniya «Olenii Ruchei»: otchet o NIR* (Report on research and development: Analysis of physico-mechanical properties of waste after pre-concentration of apatite-nepheline ore of the Oleniy Ruchey deposit), Petrozavodsk, PetrGU, 2014, 19 p.

