

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

---

2024

№ 5

УДК 622.765.061

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАГЕНТНЫХ РЕЖИМОВ  
ФЛОТАЦИОННОГО ПОЛУЧЕНИЯ НЕФЕЛИНОВОГО КОНЦЕНТРАТА  
ИЗ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЛОПАРИТОВЫХ РУД

Е. В. Черноусенко<sup>1</sup>, И. Н. Вишнякова<sup>1</sup>, Г. В. Митрофанова<sup>1</sup>,  
В. В. Марчевская<sup>1</sup>, А. А. Компанченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Горный институт КНЦ РАН,

E-mail: e.chernousenko@ksc.ru, ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Анапиты, Россия

<sup>2</sup>Геологический институт КНЦ РАН, ул. Ферсмана, 14, 184209, г. Анапиты, Россия

Рассмотрены реагентные режимы обратной флотации нефелина из хвостов обогащения лопаритовых руд: смесь талловых масел, гидроксамовые кислоты в сочетании с дистиллированным талловым маслом; смесь талловых масел с добавкой полиалкилбензолсульфокислоты или аминосодержащих собирателей. При использовании оптимальных реагентных режимов получен нефелиновый концентрат с содержанием  $Al_2O_3$  27.18–27.57 %. При добавке к талловым маслам полиалкилбензосульфокислоты активность собираательной смеси уменьшилась, приведя к снижению качества получаемого концентрата до 26.33 %  $Al_2O_3$ . Рассмотрено два способа доводки флотационных концентратов до кондиционного качества. Использование магнитной сепарации позволило получить нефелиновый концентрат с  $Al_2O_3$  28.0–28.3 % при извлечении 72–76 % от исходного продукта. Методом прямой катионной флотации с применением реагента Flotigam-2835 в кислой среде с pH 4.5, создаваемой кремнефтористым натрием, получен нефелиновый концентрат с 29.63 %  $Al_2O_3$  при извлечении 65.9 % от исходного продукта.

*Отходы обогащения, хвостохранилище, лопаритовые руды Кольского полуострова, нефелин, темноцветные минералы, полевые шпаты, флотация, магнитная сепарация*

DOI: 10.15372/FTPRPI20240517

EDN: PNBTOZ

---

Рациональное использование минерально-сырьевых ресурсов заключается в полном и комплексном извлечении из недр полезных ископаемых с участием всех основных компонентов минерального сырья для производства товарной продукции. Огромный потенциал заложен в таком же комплексном подходе к переработке техногенных минеральных ресурсов, состоящем в максимальном доизвлечении ценных компонентов и получении дополнительной продукции из нерудной части отходов горнодобывающих предприятий. Кроме получения дополнительных источников минерального сырья, вовлечение отходов в переработку способствует улучшению экологической обстановки за счет снижения негативного воздействия отходов на окружающую среду [1–3].

Ресурсосбережение, разработка и внедрение технологий комплексного использования минерального сырья, создание условий для освоения техногенных месторождений отнесены к приоритетным направлениям в российских документах стратегического планирования [4].

В Мурманской области расположено шестнадцать крупных хвостохранилищ площадью от десятков до нескольких тысяч гектаров. На территории Ловозерского района находятся два поля хвостохранилища отходов обогатительной фабрики “Карнасурт” ООО “Ловозерский ГОК”. Предприятие выпускает лопаритовый концентрат, являющийся основным видом сырья в России для получения тантала, ниобия и редкоземельных металлов. Существует законсервированное хвостохранилище ранее действующей обогатительной фабрики “Умбозеро”. Общая площадь, занимаемая хвостохранилищами, составляет 460 га [5].

Отходы обогащения лопаритовых руд, представленные мелко- и тонкозернистыми фракциями, при хранении разрушаются под воздействием атмосферных явлений. Это приводит к переносу загрязняющих веществ в окружающую среду [6, 7]. Вовлечение лежальных хвостов предприятия в переработку, кроме снижения экологической нагрузки, позволит повысить комплексность использования лопаритовых руд и получить дополнительные источники минерального сырья.

Хвосты обогащения лопаритовых руд в основном состоят из К–На полевых шпатов и нефелина (40–70 %) и могут являться сырьем для получения нефелинового концентрата, необходимого для получения глинозема и широко применяемого в строительной, стекольной и химической промышленности [7–13].

Традиционно для получения нефелинового концентрата применяется способ обратной флотации жирнокислотными собираителями, при котором в пенный продукт переходят темноцветные минералы, а нефелин и полевые шпаты концентрируются в камерном [14–16]. Разработка методов повышения эффективности обратной нефелиновой флотации посвящено много исследований. В [15] использование в качестве собираителя реагента фосфол при получении нефелинового концентрата из апатит-нефелиновых руд позволило существенно повысить показатели обогащения. В [17] показана эффективность применения в составе собираительной смеси алкилгидроксамовых и полиалкилбензолсульфокислот при флотации складированных отходов переработки апатит-нефелиновых руд. В [18] предложено в качестве собираителя для обратной флотации использовать смесь анионных и катионных поверхностно-активных веществ (ПАВ). Для повышения качества некондиционного нефелинового концентрата рекомендуется высокоинтенсивная магнитная сепарация [19, 20].

Повышенное содержание полевых шпатов в минеральном сырье не позволяет получить кондиционный концентрат способом обратной флотации. Для получения нефелинового концентрата из апатитсодержащего сырья с повышенным содержанием полевых шпатов разработана технология разделения нефелина и полевого шпата с помощью катионного собираителя и фторсодержащих ионов [21–23]. В [24] исследована прямая катионная нефелиновая флотация хвостов обогащения фосфатной руды магматического месторождения. Из хвостов обогатительной фабрики “Умбозеро” с высоким содержанием полевых шпатов в результате катионной флотации или ее комбинации с высокоинтенсивной магнитной сепарацией получен нефелиновый концентрат с содержанием  $Al_2O_3$  28–29 % при извлечении ~50 % [25].

## ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объект исследований — проба отходов обогащения лопаритовых руд, отобранная с поверхности первого поля хвостохранилища обогатительной фабрики “Карнасурт”.

Количественный минеральный состав исходных лопаритовых хвостов и продуктов их разделения определен по данным рентгенофазового анализа. Измерения выполнены на рентгеновском дифрактометре D2 Phaser (Bruker AXS GmbH, Германия), обработка дифрактограмм — с помощью программного обеспечения Difrac.suite v.4.1. Степень раскрытия минералов определялась в искусственных анишлифах в отраженном свете на микроскопе Zeiss Axioplan 2 (увеличение до 500<sup>х</sup>, разрешение до 0.31 мкм).

Продукты обогащения изучались в искусственных анишлифах на сканирующем электронном микроскопе ZEISS EVO 25 с энергодисперсионной приставкой Ultim MAX 100 Silicon Drift Detectors (Центр коллективного пользования Кольского научного центра РАН).

Технологические исследования включали гранулометрический и химический анализы, а также флотационные и электромагнитные методы обогащения. Флотация проводилась в лабораторных механических флотомашинах с объемом камеры 1 л (скорость подачи воздуха составляла 1 л/мин на 1 л объема камеры), магнитная сепарация — на лабораторном электромагнитном сепараторе для сухого обогащения слабомагнитных руд марки СЭ-138 Т при напряженности магнитного поля 509 кА/м.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

К основным алюмосиликатам в Ловозерском расслоенном комплексе, где находятся уникальные месторождения лопарита, относятся нефелин, полевые шпаты и цеолиты. Среднее содержание глинозема в них составляет соответственно 33.00, 19.75 и 27.50 % масс. (табл. 1). Полевые шпаты представлены микроклином, ортоклазом, альбитом, цеолиты — натролитом и анальцимом. Второстепенные алюминийсодержащие силикаты — содалит (31 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), канкринит (31 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), уссингит (18 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), слюды биотит (10.5 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и мусковит (33.5 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [26, 27]. Содержание основных компонентов в пробе лопаритовых хвостов, %: P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — 0.921; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>общ — 23.55; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>к/р — 19.96; Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — 0.111; Fe<sub>общ</sub> — 3.45; TiO<sub>2</sub> — 0.745.

ТАБЛИЦА 1. Минеральный состав пробы хвостов лопаритовых руд, % масс.

Минерал	Содержание	Минерал	Содержание
Нефелин	42.28	Титанит	2.23
Лопарит	0.58	Эвдиалит	0.81
Пироксены	5.98	Мурманит	0.31
Амфиболы	4.93	Лампрофиллит	0.10
Полевые шпаты	19.46	Ринкит	1.64
Цеолиты	10.59	Слюды	3.01
Содалит	0.38	Пектолит	4.76
Канкринит	0.91	Уссингит	0.94
Фторапатит	1.09	Итого	100.00

Проба представлена мелко-среднезернистым материалом крупностью менее 1 мм. Оценка степени раскрытия минералов показала, что в исходной пробе нефелин и полевые шпаты на 94 % представлены свободными зернами. Основная доля сростков приходится на материал крупнее 0.315 мм и составляет ~71 %. Нефелин и полевые шпаты образуют преимущественно биминеральные сростки, которые связаны в основном с пироксенами (эгирином) и амфиболами, в меньшей степени — с лопаритом, мурманитом, эвдиалитом и др. Полиминеральные сростки встречаются редко, преимущественно в материале крупнее 0.315 мм.

По объему, занимаемому нефелином и полевым шпатом в сростковом зерне, сростки относятся к бедным (5–31 %), рядовым (31–70 %) и богатым (71–95 %). Границы сростков чаще всего прямые и четкие, реже взаимопроникающие (рис. 1а). Бедные сростки лейкоократовых минералов с эгирином присутствуют вплоть до класса – 0.045 мм. Наряду с указанными сростками в материале пробы часто встречаются зерна нефелина и полевых шпатов, пронизанные игольчатыми и тонкопризматическими зернами эгирина (рис. 1б). Такие сростки, как и сростковые зерна лейкоократовых минералов с эгирином, где наблюдается взаимопрорастание минералов друг в друга, будут разубоживать нефелиновый концентрат.

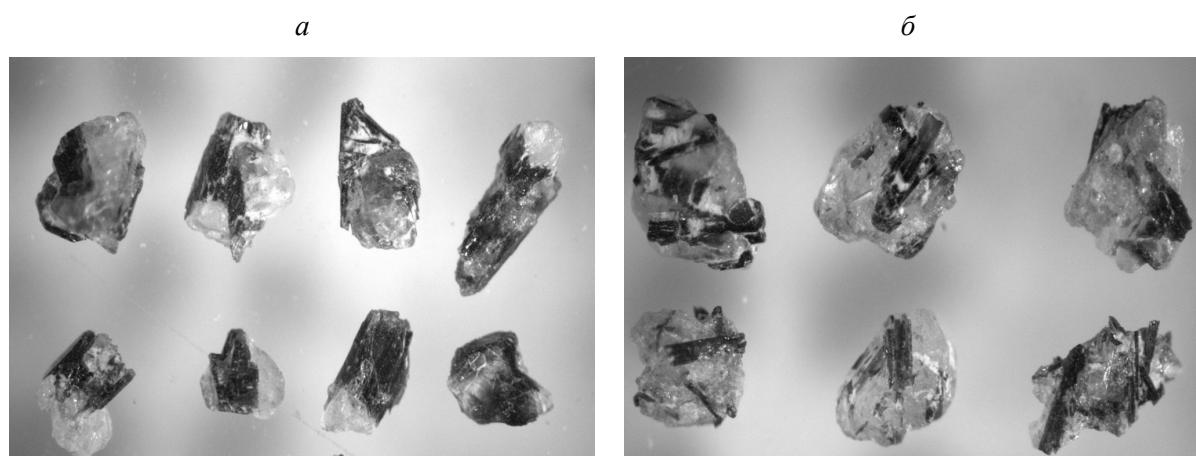


Рис. 1. Сростки нефелина и полевых шпатов в исходном продукте: *а* — сростки нефелина и полевых шпатов с эгирином, крайние правые — с взаимопрорастанием минералов друг в друга, увеличение 25<sup>х</sup>; *б* — сростки нефелина и полевых шпатов с плоскими призматическими и игольчатыми зернами эгирина, увеличение 25<sup>х</sup>

В ходе исследований изучены различные схемы и режимы флотационного извлечения нефелина из отходов обогащения лопаритовых руд. С учетом оценки степени раскрытия минералов крупность питания флотации составила – 0.315 мм.

В связи с преобладающим количеством в пробе нефелина на первом этапе рассмотрен метод обратной флотации. Для более эффективного прохождения процесса после измельчения проведено флотационное удаление апатита и последующее обесшламливание камерного продукта по классу 30 мкм. Выход апатитового продукта составил 4.0–4.5 % с содержанием Р<sub>2</sub>О<sub>5</sub> ~ 15 % при извлечении ~ 78 %. Выход шламов 13–14 %, потери оксида алюминия со шламами 13–14 %.

Схема обратной флотации нефелина включала основную и контрольную операции. Для флотации темноцветных минералов использовалась традиционная смесь жирнокислотных собирателей (СС), состоящая из 70 % лиственного и 30 % хвойного талловых масел. Для активации темноцветных минералов применялся хлорид кальция, для создания pH 10.6–11.0 — гидроксид натрия.

Флотационные опыты, поставленные от расхода СС 500–1100 г/т, смогли определить ее оптимальный расход, составивший 800 г/т. Дальнейшее увеличение расхода приводит к незначительному приросту качества камерного продукта, но не позволяет получить кондиционный нефелиновый концентрат с содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> более 28.0 %. В результате обратной флотации получен нефелиновый концентрат с содержанием оксида алюминия 27.27 %, при извлечении от операции 90.8 % (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Результаты обратной нефелиновой флотации при разных реагентных режимах, %

Продукт	Выход	Содержание				Извлечение			
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>общ</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>общ</sub>	TiO <sub>2</sub>
СС 800 г/т									
Пенный общий	19.04	11.75	0.303	11.12	2.250	9.20	66.44	70.58	62.32
Нефелиновый концентрат	80.96	27.27	0.036	1.09	0.320	90.80	33.56	29.42	37.68
Исходный	100.00	24.31	0.087	3.00	0.687	100.00	100.00	100.00	100.00
СС + ПАБСК 800 г/т									
Пенный общий	12.15	9.01	0.363	12.45	2.690	4.51	54.45	50.76	49.47
Нефелиновый концентрат	87.85	26.33	0.042	1.67	0.380	95.49	45.55	49.24	50.53
Исходный	100.00	24.26	0.081	2.98	0.661	100.00	100.00	100.00	100.00
СС + Флон-1 500 г/т									
Пенный общий	22.39	12.61	0.248	9.85	2.090	11.66	67.15	73.02	68.29
Нефелиновый концентрат	77.61	27.57	0.035	1.05	0.280	88.34	32.85	26.98	31.71
Исходный	100.00	24.22	0.083	3.02	0.685	100.00	100.00	100.00	100.00
СС + Flotigam-2835 500 г/т									
Пенный общий	33.43	16.98	0.178	7.66	1.610	23.32	73.64	79.20	79.38
Нефелиновый концентрат	66.57	28.04	0.032	1.01	0.210	76.68	26.36	20.80	20.62
Исходный	100.00	24.34	0.081	3.23	0.678	100.00	100.00	100.00	100.00
СС + АНП 500 г/т									
Пенный общий	18.20	11.22	0.310	11.21	2.270	8.44	63.29	67.36	60.48
Нефелиновый концентрат	81.80	27.08	0.040	1.23	0.330	91.56	36.71	32.64	39.52
Исходный	100.00	24.19	0.089	3.08	0.683	100.00	100.00	100.00	100.00
ИМ-50 800 г/т, ДТМ 120 г/т									
Пенный общий	17.41	11.01	0.315	11.83	2.510	7.87	66.14	67.33	66.21
Нефелиновый концентрат	82.59	27.18	0.034	1.21	0.270	92.13	33.86	32.67	33.79
Исходный	100.00	24.36	0.083	3.06	0.660	100.00	100.00	100.00	100.00

П р и м е ч а н и е. СС — смесь жирнокислотных собирателей; ПАБСК — полиалкилбензолсульфокислоты; Флон-1 — ацетат первичных аминов; Flotigam-2835 — алкиловый эфир диамина; АНП — хлоргидрат первичных аминов; ДТМ — добавка дистиллированного таллового масла; ИМ-50 — реагент, разработанный в институте Механобр.

Ранее проведенными исследованиями флотации отходов апатитового производства [18] показана возможность повышения показателей обратной флотации нефелина при введении в собирательную смесь реагента ПАБСК (полиалкилбензолсульфокислоты). Его использование в качестве добавки к СС при флотации лопаритовых хвостов уменьшает выход пенного продукта и снижает Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в камерном нефелиновом продукте (табл. 2). Содержание темноцветных минералов в камерном продукте в 1.6 раза выше, содержание нефелина ниже, чем при использовании только смеси жирнокислотных собирателей (табл. 3). Изучение гранулометрического и минерального состава пенных продуктов показало, что продукты, полученные при использовании смеси с добавкой ПАБСК, характеризуются меньшей крупностью и меньшим содержанием сростков.

ТАБЛИЦА 3. Минеральный состав нефелиновых концентратов при флотации СС и СС + ПАБСК, % масс.

Минерал	Нефелин	Полевые шпаты	Цеолиты	Темноцветные минералы	Прочие
СС					
Содержание	53.66	23.94	12.26	6.59	3.55
СС + ПАБСК					
Содержание	50.16	19.51	13.78	10.75	5.80

Известно использование во флотации сочетания катионных и анионных ПАВ, которое позволяет повысить извлечение в концентрат целевых минералов при снижении общего расхода сорбента [18, 28, 29]. Более высокая эффективность флотации объясняется синергетическим эффектом за счет совместной адсорбции ПАВ на минеральной поверхности, что приводит к повышению ее гидрофобизации [18, 30, 31].

В настоящей работе исследована флотационная способность смесей анионоактивного сорбента (СС — 70 % ЛТМ и 30 % ХТМ) с катионными сорбентами на основе аминов: АНП (хлоргидрат первичных аминов); Флон-1 (ацетат первичных аминов); Flotigam-2835 (алкиловый эфир диамина). Добавка к сорбентской смеси катионных ПАВ в соотношении 4 : 1 независимо от вида реагента позволяет снизить общий расход сорбента с 800 до 500 г/т. Наиболее высокое качество нефелинового концентрата достигнуто при использовании реагента Flotigam-2835. В этом случае удается получить концентрат с содержанием  $Al_2O_3$  28 %, но при снижении извлечения на 14 % (табл. 2). При введении в смесь реагентов Флон-1 и АНП получены близкие показатели с результатами флотации с анионной сорбентской смесью.

Для флотации руд редких и редкоземельных металлов в качестве комплексообразующих реагентов широко используются гидроксамовые кислоты [32 – 35]. Склонность гидроксамовых кислот к образованию устойчивых комплексных соединений с ионами редких и редкоземельных металлов и железа позволяет эффективно извлекать лопарит и железосодержащие минералы [33, 36].

Применение синтезированного реагента ГК (алкилгидроксамовые и соответствующие алкилкарбоновые кислоты в массовом соотношении 3 : 1) для обратной флотации нефелина позволило получить результаты, близкие к режиму с использованием жирнокислотных сорбентов (табл. 2). Реагент ГК синтезирован по аналогии с реагентом ИМ-50, разработанным в институте Механобр. Для улучшения пенообразования во флотацию введена добавка дистиллированного таллового масла.

Отметим, что стабильное содержание оксида алюминия более 28 % не было достигнуто ни при одном из исследованных режимов флотации, во всех камерных продуктах остается труднофлотируемая фракция темноцветных минералов. Эта фракция преимущественно представлена сростками пироксенов с нефелином и полевыми шпатами, в меньшей степени — свободными коротко- и длиннопризматическими зернами пироксенов и амфиболов. Присутствуют редкие зерна и сростки эвдиалита, лопарита, титанита, апатита (рис. 2 $a$  –  $e$ ). Использование магнитной сепарации в сильном поле для доводки полученных продуктов позволяет независимо от режима флотации получить нефелиновые концентраты с содержанием  $Al_2O_3$  28.0 – 28.3 % при извлечении 72 – 76 % от исходного продукта. И если в пенный продукт обратной флотации в большей степени извлекаются раскрытое зерна темноцветных минералов, то в магнитной фракции преимущественно концентрируются их сростки (рис. 2 $g$  –  $e$ ).

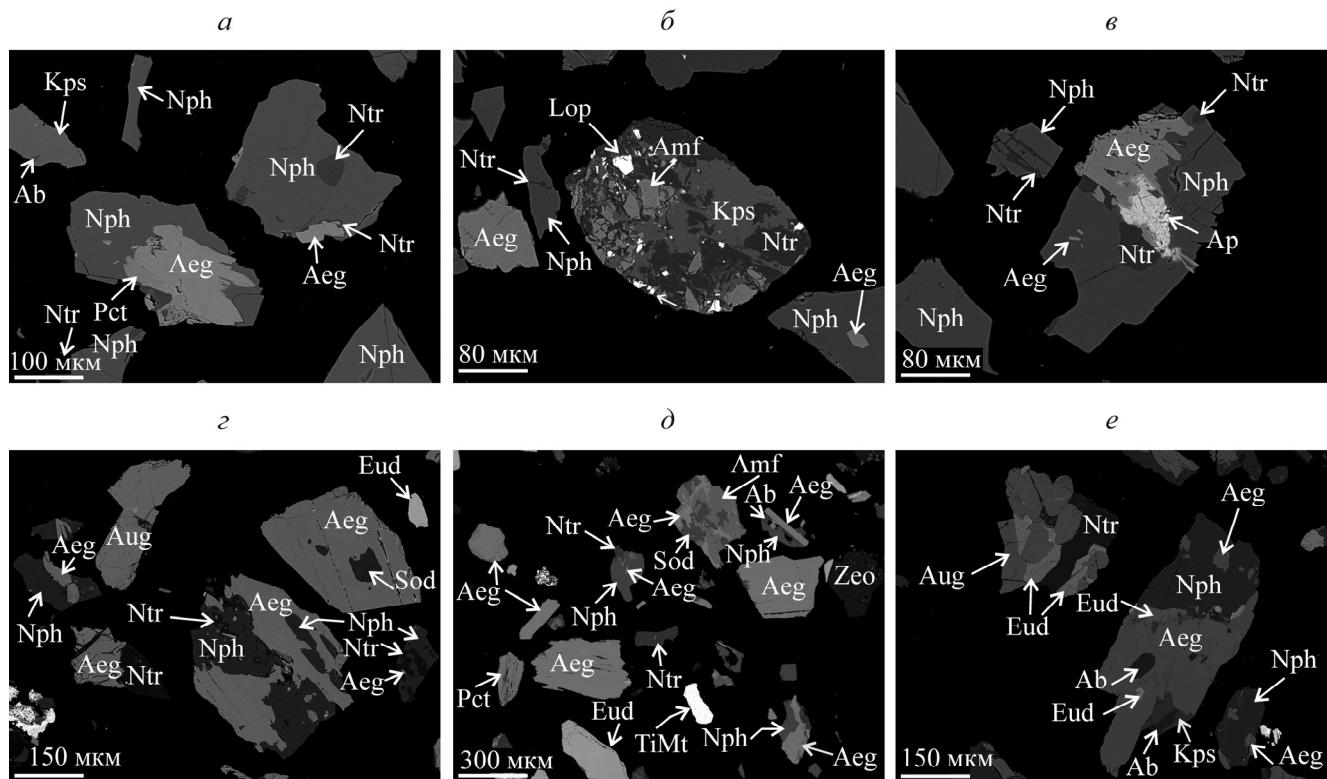


Рис. 2. Свободные зерна и сростки частиц в технологических продуктах: *a*–*b* — сростки нефелина и полевых шпатов с пироксенами и амфиболами в камерном продукте обратной флотации; *г*–*е* — сростки и свободные зерна темноцветных минералов в магнитной фракции; Ab — альбит; Aeg — эгирин; Ap — апатит; Aug — авгит; Eud — минерал группы эвдиалита; Kps — калиевый полевой шпат; Lop — лопарит; Nph — нефелин; Ntr — натролит; Pct — пектолит; Sod — минерал группы содалита; TiMt — титаномагнетит; Zeo — цеолит. Фотографии в обратно рассеянных электронах

В немагнитной фракции (нефелиновом концентрате) присутствуют редкие сростки нефелина и полевых шпатов с включениями плоских призматических и игольчатых зерен эгирина, а также единичные зерна и сростки эвдиалита, лопарита, лампрофиллита (рис. 3).

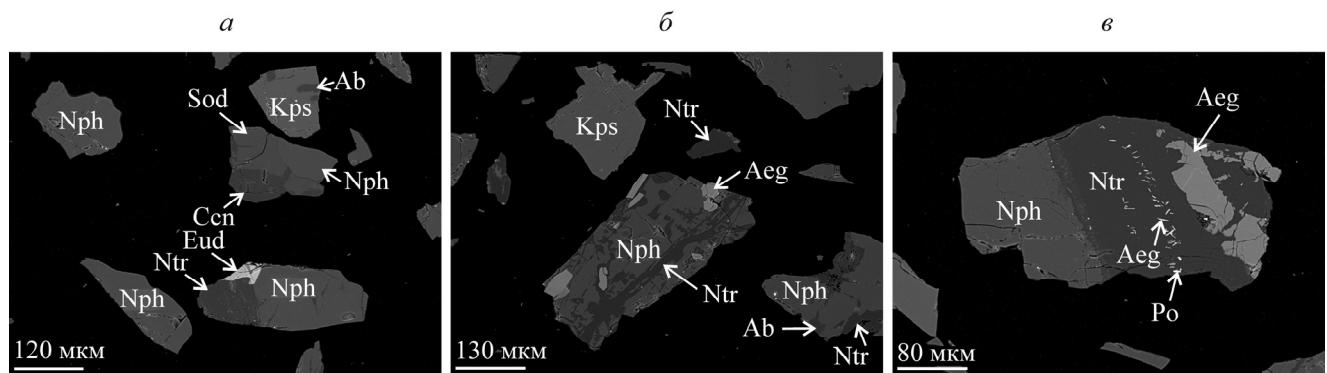


Рис. 3. Сростки и зерна нефелина и полевых шпатов в немагнитной фракции (нефелиновом концентрате): *а* — с алюмосиликатами и эвдиалитом; *б, в* — с алюмосиликатами и темноцветными минералами; Ссп — минерал группы канкринита; Ро — пирротин. Фотографии в обратно рассеянных электронах

В связи с неоднородностью массива хвостохранилища, в котором происходит сегрегация материала по крупности и удельному весу, окисление и разрушение минералов, минеральный состав лежальных хвостов отдельных участков может изменяться, в том числе в сторону увеличения содержания полевых шпатов. Для разделения нефелина и полевых шпатов известен метод катионной флотации в кислой среде с использованием фторсодержащих ионов. Образующаяся в результате гидролиза кремнефтористого натрия свободная кремнекислота сорбируется на поверхности нефелина, что способствует закреплению на его поверхности катионного собирателя [22]. Исследован режим прямой катионной флотации в кислой среде (рН 4.5), создаваемой кремнефтористым натрием, с использованием реагента Flotigam-2835 (алкилового эфира диамина). В качестве пенообразователя применялся реагент Монтанол М-800. Флотация проводилась после удаления апатита и темноцветных минералов на камерном продукте обратной флотации нефелина. В результате получен нефелиновый концентрат с содержанием  $Al_2O_3$  29.63 % при извлечении от исходного продукта 65.90 %.

Отметим, что на получение качественного концентрата может повлиять образование по нефелину натролита, присутствующего на большинстве нефелиновых зерен (рис. 3). Содержание оксида алюминия в натролите составляет 27.5 %, против 33.0 % в нефелине, что снижает содержание  $Al_2O_3$  в их общем агрегате.

## ВЫВОДЫ

Оценена эффективность реагентных режимов обратной флотации нефелина из складированных отходов обогащения лопаритовых руд. Флотация смесью жирнокислотных собирателей, состоящей из 70 % лиственного и 30 % хвойного талловых масел, позволяет получить нефелиновый концентрат с  $Al_2O_3$  27.27 %. Применение в составе собирательной смеси полиалкилбензолсульфокислоты уменьшает выход пенного продукта и снижает качество нефелинового концентрата до  $Al_2O_3$  26.33 %. Гидроксамовые кислоты в сочетании с дистиллированным талловым маслом для флотации позволяют получить результаты, близкие к режиму с использованием смеси жирнокислотных собирателей. Применение в составе собирательной смеси анионных и катионных поверхностно-активных веществ дает возможность снизить общий расход реагентов почти на 40 % при сохранении показателей обогащения.

Нефелиновый концентрат с содержанием  $Al_2O_3$  более 28 % можно получить при доводке камерных (нефелиновых) продуктов флотации магнитной сепарацией в сильном поле. В результате магнитной сепарации получены нефелиновые концентраты с  $Al_2O_3$  28.0–28.3 % при извлечении 72–76 % от исходного продукта.

В результате прямой нефелиновой флотации с использованием алкилового эфира диамина в кислой среде, создаваемой кремнефтористым натрием, получен нефелиновый концентрат с  $Al_2O_3$  29.63 % при извлечении от исходного продукта 65.9 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В. А., Шадрунова И. В. Инновационные процессы глубокой и экологически безопасной переработки техногенного сырья в условиях новых экономических вызовов // Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2021). — Владикавказ: ГТУ, 2021. — С. 3–8.
2. Bernd G. Lottermoser. Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes, Elements, 2011, Vol. 7, No. 6. — P. 405–410.

3. Tayebi-Khorami M., Edraki M., Corder G., and Golev A. Re-thinking mining waste through an integrative approach led by circular economy aspirations, *Minerals*, 2019, Vol. 9, No. 5. — 286.
4. Темнов А. В., Быховский Л. З. Техногенные и вторичные источники редких металлов // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2021. — № 1-6 (175). — С. 6–13.
5. Ларичкина Ф. Д., Кныша В. А. Рациональное использование вторичных минеральных ресурсов в условиях экологизации и внедрения наилучших доступных технологий. — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — 252 с.
6. Krasavtseva E., Maksimova V., Makarov D., and Potorochin E. Modelling of the chemical halo of dust pollution migration in loparite ore tailings storage facilities, *Minerals*, 2021, Vol. 11. — 1077.
7. Красавцева Е. А., Макаров Д. В., Максимова В. В., Селиванова Е. А., Икконен П. В. Результаты исследований свойств и состава хвостов обогащения лопаритовых руд // ФТПРПИ. — 2021. — № 3. — С. 190–198.
8. Ракаев А. И., Черноусенко Е. В., Рухленко Е. Д., Алексеева С. А. Получение нефелинового концентраты из отвальных хвостов обогатительных фабрик Ловозерского ГОКа // Обогащение руд. — 2007. — № 1. — С. 8–11.
9. Сизяков В. М., Сизякова Е. В. Перспективы развития комплексной переработки Кольских нефелиновых концентратов // ГИАБ. — 2015. — № S 1-4. — С. 126–145.
10. Bagani M., Balomenos E., and Panias D. Nepheline syenite as an alternative source for aluminum production, *Minerals*, 2021, Vol. 11, No. 7. — 734.
11. Gurevich B. I., Kalinkina E. V., and Kalinkin A. M. Binding properties of mechanically activated nepheline containing mining waste, *Minerals*, 2020, Vol. 10, No. 1. — 48.
12. Левин Б. В., Лисюк Б. С., Луценко К. Л., Лыткин А. А., Свитцов А. А., Станкевич В. Г., Мамулат С. Л. Нефелиновые концентраты и шламы — уникальное сырье для геополимерных материалов и конструкций // Мир дорог. Экология. Новые технологии. — 2020. — Вып. 129–130. — С. 91–100.
13. Mahran G., Hussin A., and Haffez Abdelhaffez G. Nepheline syenite beneficiation for glass and ceramics industries, *Afinidad. J. Chem. Eng. Theoretical Appl. Chem.*, 2022, Vol. 79, No. 597. — Р. 533–538.
14. Плешаков Ю. В., Алексеев А. И., Брыляков Ю. Е., Николаев А. И. Технология комплексного обогащения апатит-нефелиновых руд // Обогащение руд. — 2004. — № 2. — С. 15–17.
15. Лыгач В. Н., Ладыгина Г. В., Брыляков Ю. Е., Кострова М. А. Повышение эффективности нефелинового производства на АНОФ-II ОАО “Апатит” путем совершенствования реагентного режима обратной флотации нефелина // ГИАБ. — 2007. — № 10. — С. 365–369.
16. Sizyakov V. M., Kawalla R., and Brichkin V. N. Geochemical aspects of the mining and processing of the large-tonne mineral resources of the hibinian alkaline massif, *Geochemistry*, 2019, Vol. 80, No. 3. — 125506.
17. Митрофанова Г. В., Марчевская В. В., Перункова Т. Н. Совершенствование режимов нефелиновой флотации из складированных отходов обогащения апатит-нефелиновых руд хибинских месторождений // Цв. металлы. — 2022. — № 8. — С. 8–14.
18. Shapovalov N. A., Gorodov A. I., Krainiy A. A., and Krainiaia E. V. The influence of mixed cationic and anionic surfactants on the flotation of nepheline, *J. Eng. Appl. Sci.*, 2019, Vol. 14, No. 16. — Р. 5719–5724.
19. Митрофанова Г. В., Черноусенко Е. В., Артемьев А. В. Техногенные месторождения Мурманской области как перспективные источники минерального сырья // Маркшейдерия и недропользование. — 2020. — № 3 (107). — С. 9–16.

20. **Львов В. В., Ушаков Е. К.** Применение сухой магнитной сепарации для повышения качества нефелинового концентрата // Материалы XXIII Междунар. науч.-техн. конф. “Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья”. — 2018. — С. 286–290.
21. **Ратобыльская Л. Д., Кожевников О. А., Бойко Н. Н., Лыгач В. Н., Кайтмазова Т. И., Маслов А. Д.** Селективная флотация нефелина из хвостов апатитового производства // Комбинированные методы при комплексном обогащении полезных ископаемых. — Л.: Наука, 1977. — С. 120–126.
22. **Богданов О. С., Михайлова Н. С., Янис Н. А., Бондаренко О. П., Будникова Н. В.** Пути повышения качества нефелинового концентрата на комбинате “Апатит” // Обогащение руд. — 1976. — № 4. — С. 8–12.
23. **Сентемова В. А.** Использование катионной флотации для получения высококачественных нефелиновых концентратов из апатито-нефелиновых руд с повышенным содержанием полевых шпатов // Обогащение руд. — 2009. — № 5. — С. 11–14.
24. **Александрова Т. Н., Элбендари А. М.** Повышение эффективности переработки фосфатных руд флотационным методом // Зап. Горн. ин-та. — 2021. — Т. 248. — С. 260–271.
25. **Сентемова В. А.** Технология получения нефелиновых концентратов // Горн. журн. — 2011. — № 2. — С. 39–42.
26. **Пеков И. В.** Ловозерский массив: история исследования, пегматиты, минералы. — М.: Земля, 2001. — 432 с.
27. **Семенов Е. И.** Минералы и руды Лапландской щелочной формации (Кольский п-ов, Карелия, Финляндия). — М.: Минералогический музей РАН, Геос, 2009. — 54 с.
28. **Xu L., Hu Y., Tian J., Wu H., Yang Y., Zeng X., Wang Z., and Wang J.** Selective flotation separation of spodumene from feldspar using new mixed anionic/cationic collectors, Miner. Eng., 2016, Vol. 89. — Р. 84–92.
29. **Да-Вэй Ло, Цзунь-Чже Бай, Юй Чжан, Ди Ву.** Применение катионных и смешанных анионных сорбентов при флотационном обогащении кварцевого песка // ФТПРПИ. — 2023. — № 4. — Р. 176–181.
30. **Семьянова Д. В.** Анализ применения сочетания реагентов при флотации несульфидных руд // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2020. — Т. 7. — № 2. — С. 118–122.
31. **Xu L., Wu H., Dong F., Wang L., Wang Z., and Xiao J.** Flotation and adsorption of mixed cationic/anionic collectors on muscovite mica, Miner. Eng., 2013, Vol. 41. — Р. 41–45.
32. **Найфонов Т. Б., Белобородов В. И., Захарова И. Б.** Флотационное обогащение комплексных титановых и циркониевых руд. — Апатиты: КНЦ РАН, 1994. — 156 с.
33. **Ivanova V., Mitrofanova G., and Chernousenko E.** Application of complexing reagents-collectors in rare-metal and rare-earth ore, 17<sup>th</sup> Int. Multidisciplinary Sci. Geoconf. SGEM 2017, Proc. Sci. Technol. Geology, Expl. Min., 2017, No 11. — Р. 759–766.
34. **Cao M., Bu H., and Gao Y.** A mixed collector system for columbite-tantalite flotation, Miner. Eng., 2021, Vol. 161.
35. **Marion Ch., Li R., and Waters K.** A review of reagents applied to rare-earth mineral flotation, Adv. Coll. Interface Sci., 2020, Vol. 279.
36. **Пилипенко А. Т., Зульфигаров О. С.** Гидроксамовые кислоты. — М.: Наука, 1989. — 312 с.

Поступила в редакцию 02/VII 2024

После доработки 20/VIII 2024

Принята к публикации 24/IX 2024