

## ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЛОПАРИТОВЫХ РУД

Е. В. Черноусенко, Г. В. Митрофанова, Ю. С. Каменева

Горный институт Кольского научного центра РАН (Апатиты, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 28 августа 2025 г.

### Для цитирования

Черноусенко Е. В., Митрофанова Г. В., Каменева Ю. С. Перспективы комплексного использования отходов обогащения лопаритовых руд // Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16, № 1. — С. ?—?. — DOI: 10.25283/2223-4594-2026-1-?-?.

Рассмотрена возможность получения нефелинового, лопаритового и апатитового концентратов из отходов обогащения лопаритовых руд. В результате обратной флотации лежалых и текущих хвостов получены нефелиновые концентраты с содержанием 27,3% и 27,7%  $Al_2O_3$  при извлечении 77,8% и 79,9% соответственно. Предложенная схема флотации текущих хвостов в замкнутом цикле позволила увеличить извлечение  $Al_2O_3$  в концентрат на 3,8%. Повышение качества концентратов достигается использованием электромагнитной сепарации (28,0–28,3%  $Al_2O_3$ ) или прямой флотации в среде кремнефтористого натрия (29,6%  $Al_2O_3$ ). При флотации гравитационных шламов получен лопаритовый концентрат с содержанием  $Nb_2O_5$  при извлечении ~50%. При обогащении лежалых хвостов получен апатитовый продукт с содержанием  $P_2O_5$  около 15% при извлечении ~78%. Качество апатитового продукта может быть повышено введением перечистных операций.

**Ключевые слова:** хвостохранилище, отходы обогащения, лопарит, нефелин, апатит, флотация, магнитная сепарация.

### Введение

Обеспечение экологической безопасности современного горнодобывающего производства подразумевает как можно более полное извлечение из минерального сырья всех полезных компонентов. Однако многие предприятия до сегодняшнего дня ограничиваются выпуском одного вида продукции. В результате значительное количество минеральных ресурсов сосредоточено в складываемых в течение многих лет отходах горно-обогатительных предприятий. Территории, занимаемые отвалами горных работ и хвостохранилищами, огромны. Так, по данным [1] в Мурманской области только хвостохранилища обогатительных фабрик занимают площадь более 14 000 га. Ежегодный сброс отходов в хвостохранилища составляет более 35 млн т, а общее количество накопленных отходов превышает 6 млрд т [2]. Согласно проведенной оценке в отходах обогащения горных предприятий Мурманской области находятся около 1300 т цветных металлов

(никеля, меди и кобальта), 100 тыс. т редких металлов (тантала и ниобия), 0,7 млн т циркония, 41 млн т железа, 38,5 млн т апатита, 189,8 млн т нефелина [3]. Использование отходов как вторичного минерального сырья в промышленных масштабах обеспечит кроме получения дополнительной продукции и повышения комплексности использования сырья улучшение экологической обстановки в районах деятельности горнопромышленных предприятий [4; 5]. Наличие разработанных и опробованных технологий переработки техногенного минерального сырья будет способствовать привлечению интереса и инвестиций со стороны недропользователей.

Большой интерес для высокотехнологичных отраслей промышленности представляют редкие и редкоземельные металлы (РЗМ) [6–8], потребность в которых ежегодно возрастает [9–12]. Важнейшим действующим источником для производства редкоземельных металлов, а также тантала, ниобия и титана являются лопаритовые руды Ловозерского месторождения, расположенного в центральной части Мурманской области. В настоящее

время единственной продукции, выпускаемой предприятием, является лопаритовый концентрат. Кроме лопарита в рудах Ловозерского месторождения в значимых количествах содержится нефелин, который в процессе обогащения переходит в отвальные хвосты и складывается в хвостохранилище. Содержание нефелина в хвостах по различным данным варьируется от 40% до 70% [13—15]. Ловозерский нефелин, также как и хибинский, получаемый из хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд, может являться сырьем для производства глинозема [16—18] и использоваться в строительной [19; 20], стекольной [21] и химической промышленности. Кроме нефелина в хвостах обогащения концентрируются полевые шпаты, цеолиты, пироксены (эгирин). Также присутствуют лопарит, апатит, эвдиалит, титанит.

На территории предприятия находятся два поля хвостохранилища отходов обогатительной фабрики (ОФ) «Карнасурт» и законсервированное хвостохранилище ранее действовавшей ОФ «Умбозеро». Количество накопленных в хвостохранилищах отходов обогащения составляет более 18 млн т [13].

#### Объекты и методы исследований

Объектом настоящих исследований являлись пробы складированных и текущих хвостов обогащения лопаритовых руд, перерабатываемых ООО «Ловозерский ГОК». Проба складированных хвостов отобрана с поверхности первого поля хвостохранилища ОФ «Карнасурт». Пробы представлены мелко-среднезернистым материалом крупностью менее 1 мм.

Минеральный состав проб определялся по данным рентгенофазового анализа. Измерения выполнялись на рентгеновском дифрактометре D2 PHASER (Bruker AXS GmbH, Германия), обработка дифрактограмм — с помощью программного обеспечения Difrac.suite v.4.1. Минеральный состав проб приведен на рис. 1.

Исследуемые хвосты на 72—74% представлены основными алюмосодержащими минералами — нефелином, полевыми шпатами и цеолитами. Содержание  $Al_2O_3$  в них составляет 33,0%, 19,8% и 27,5%. Проба текущих хвостов по сравнению со складированными включает больше нефелина и меньше полевых шпатов и цеолитов. Содержание лопарита выше в пробе текущих хвостов, а апатита — в пробе

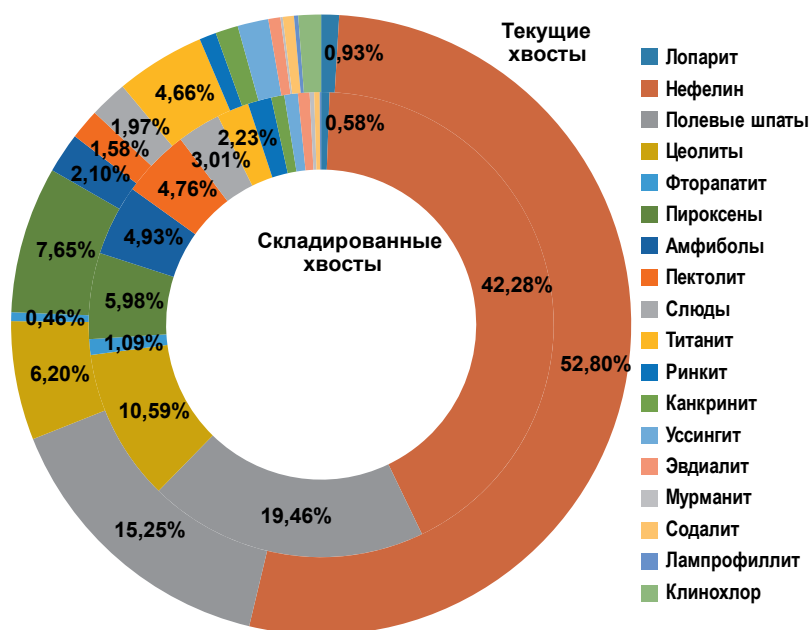


Рис. 1. Минеральный состав проб отходов обогащения лопаритовых руд  
Fig.1. Mineral composition of the loparite ore tailings samples

Таблица 1. Содержание основных компонентов в пробах хвостов  
Table 1. Content of main components in tailing samples

Проба	Содержание, %				
	$P_2O_5$	$Al_2O_3$ <small>Зобц</small>	$Nb_2O_5$	$Fe$ <small>общ</small>	$TiO_2$
Складированные хвосты	0,921	23,55	0,111	3,45	0,745
Текущие хвосты	0,704	21,99	0,141	3,85	1,32

складированных. Содержание основных компонентов в пробах хвостов представлено в табл. 1.

Для флотационных опытов использовались лабораторные механические флотомашины с объемом камеры 1 л, для опытов по магнитной сепарации — электромагнитный сепаратор для сухого обогащения слабомагнитных руд марки СЭ-138 Т.

#### Результаты исследований

Нефелиновый концентрат из хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд получают способом обратной флотации, при котором в пенном продукте концентрируются темноцветные минералы, а нефелин и полевые шпаты остаются в камерном продукте [22—24]. Флотация проводится с использованием смеси жирнокислотных собирателей, состоящей из лиственного и хвойного таловых масел, при pH = 11, создаваемым гидроксидом натрия. Для повышения эффективности флотации предложены использование реагента фосфол [22], включение в собирательную смесь алкилгидросамовых кислот и полиалкилбензолсульфокислот [25], применение смеси анионных и катионных собирателей [26].

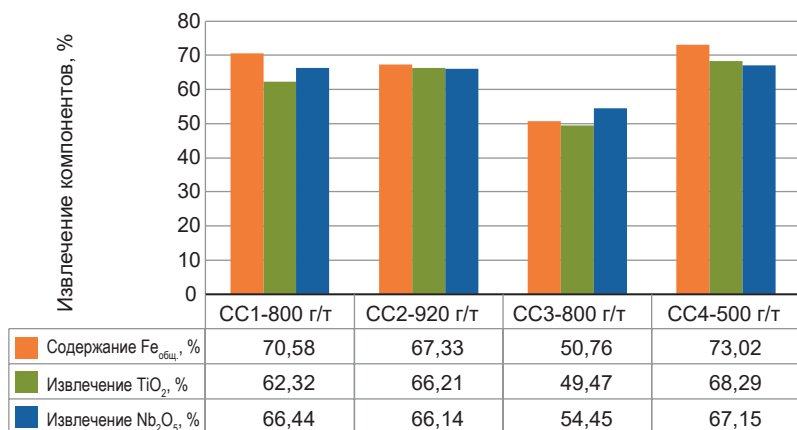


Рис. 2. Извлечение основных компонентов темноцветных минералов в пенный продукт обратной флотации складированных хвостов ОФ «Карнасурт»  
Fig. 2. Recovery of the main components of dark-colored minerals into the froth product of reverse flotation of the stored tailings at the "Karnasurt" processing plant

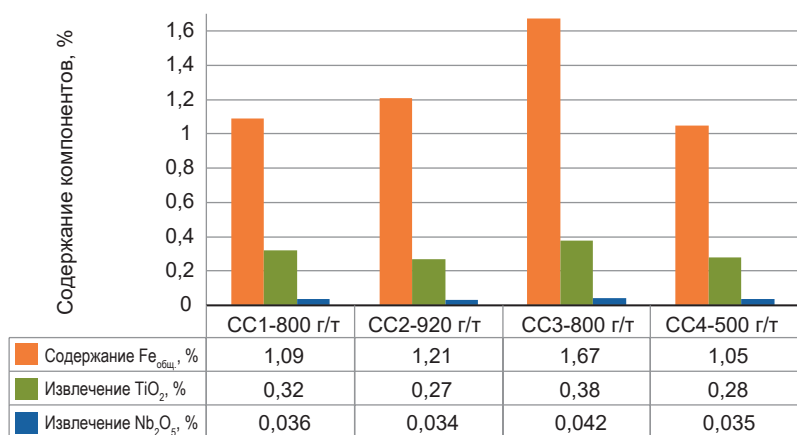


Рис. 3. Содержание основных компонентов темноцветных минералов в камерном продукте обратной флотации складированных хвостов ОФ «Карнасурт»  
Fig. 3. Content of the main components of dark-colored minerals in the chamber product of reverse flotation of the stored tailings at the "Karnasurt" processing plant

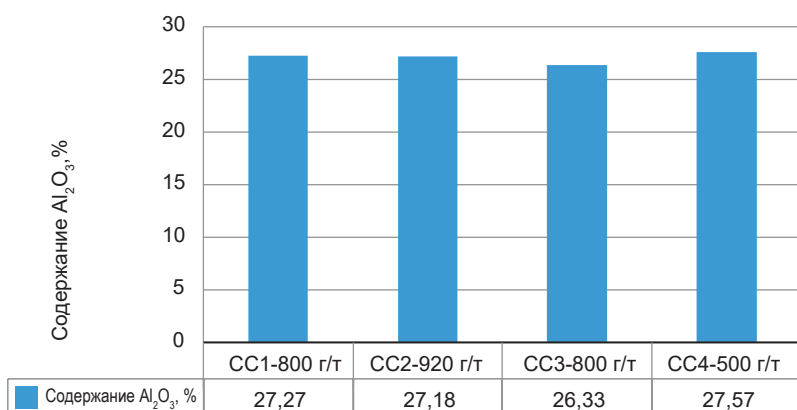


Рис. 4. Содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в камерном продукте обратной флотации складированных хвостов ОФ «Карнасурт»  
Fig. 4. The Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content in the chamber product of reverse flotation of the stored tailings at the "Karnasurt" processing plant

Использование способа обратной флотации для обогащения складированных отходов позволило получить нефелиновый концентрат с содержанием 27,27% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при извлечении 77,80% от исходного продукта.

Флотация проводилась смесью жирнокислотных собирателей, состоящей из 70% листовного и 30% хвойного таловых масел (CC1) с использованием хлорида кальция для активации темноцветных минералов. Схема флотации включала основную и контрольную операции. С целью раскрытия минеральных сростков исходный продукт измельчался до крупности –0,315 мм. Перед нефелиновой флотацией проводились флотационное удаление апатита и обесшламливание по классу 30 мкм. Выход апатитового продукта составил 4–4,5%, шламов — 13–14%.

Для повышения эффективности флотации рассматривались следующие реагентные режимы: гидроксамовые кислоты в комбинации с жирнокислотным собирателем дистиллированным таловым маслом (CC2), добавка к смеси жирнокислотных собирателей полиалкилбензолсульфонокислоты (CC3) или катионного аминокислотного собирателя (CC4). Результаты извлечения основных компонентов темноцветных минералов в пенный продукт обратной нефелиновой флотации при различных режимах приведены на рис. 2, содержание основных компонентов темноцветных минералов и оксида алюминия в камерном продукте (концентрате) — на рис. 3 и 4.

Добавка к собирательной смеси полиалкилбензолсульфонокислоты приводит к уменьшению активности смеси и снижению качества нефелинового концентрата. Применение гидроксамовых кислот позволяет получить результаты, близкие к традиционному режиму. Использование смеси анионных и катионных поверхностно-активных веществ способствует снижению общего расхода реагентов при сохранении показателей флотации.

Доводка флотационных концентратов магнитной сепарацией в сильном поле позволяет получить концентраты с содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 28,0–28,3% при извлечении 72–76%.

В результате исследования обогатимости пробы текущих хвостов ОФ «Карнасурт» получен нефелиновый концентрат с содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  27,71% при извлечении от исходного продукта 79,9%. Флотация проводилась с использованием собирательной смеси СС1 и активатора хлорида кальция. Перед флотацией исходная проба измельчалась до крупности –0,2 мм и обесшламливалась.

Для снижения потерь нефелина при обратной флотации предложена схема замкнутого цикла с перечисткой пенных продуктов и возвратом камерного продукта перечистки в основную флотацию (рис. 5). В результате получен нефелиновый концентрат с содержанием 27,72%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при извлечении 83,7%. Введение операции перечистки пенных продуктов позволило увеличить выход нефелинового концентрата и извлечение в него  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на ~3,8%. Повышение качества нефелинового концентрата более 28%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , как и в предыдущих исследованиях, достигалось его доводкой магнитной сепарацией в сильном поле. Потери оксида алюминия с магнитной фракцией составили не более 2,7%.

В камерном продукте обратной флотации совместно с нефелином концентрируются полевые шпаты, содержание оксида алюминия в которых составляет 19,8%. Поэтому при повышенном их содержании в исходном продукте затруднительно получить кондиционный нефелиновый концентрат с содержанием  $28 \pm 0,5\%$  способом обратной флотации. В этом случае может быть применен метод прямой нефелиновой флотации с использованием катионного собирателя в среде кремнефтористого натрия, разработанный для получения нефелина из хвостов апатитового производства [27; 28]. Способ прямой флотации опробован на хвостах обогащения фосфатной руды магматического месторождения [29] и складированных отходах обогащения лопаритовых руд ОФ «Умбозеро» с высоким содержанием полевых шпатов [30].

При использовании данного метода на лежалых хвостах ОФ «Карнасурт» для повышения качества концентрата после обратной флотации получен нефелиновый концентрат с содержанием 29,63  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при извлечении 65,9%.

Технология получения лопаритового концентрата на ОФ «Карнасурт» включает гравитационное обогащение и последующую доводку полученного черного концентрата флотационным, электромагнитным и электростатическим методами. При гравитационном обогащении потери лопарита с хвостами

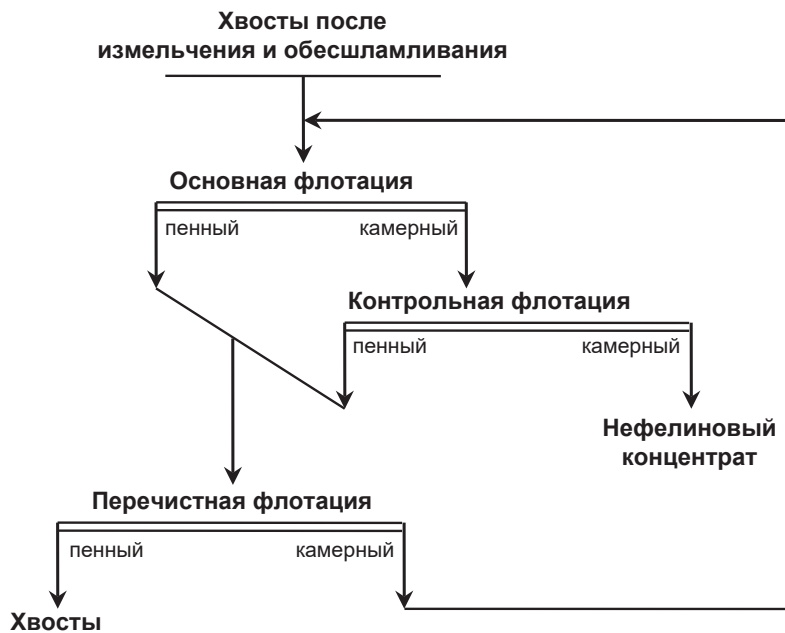


Рис. 5. Схема получения нефелинового концентрата в замкнутом цикле из текущих хвостов ОФ «Карнасурт»

Fig. 5. Closed-cycle nepheline concentrate production scheme from the «Karnasurt» processing plant tailings

достигают 20%, они связаны в основном с тонкими фракциями. Содержание лопарита в гравитационных хвостах составляет 0,64—0,96% [13].

При обратной нефелиновой флотации лопарит переходит в пенный продукт. Вместе с ним концентрируются пироксены (эгирина), амфиболы, титанит, слюды. Проведение дальнейшей селективной лопаритовой флотации или электромагнитной сепарации полученного коллективного пенного продукта позволяет выделить лопарит в отдельный продукт.

Так, при флотации гравитационных шламов с содержанием  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  0,17% получен лопаритовый концентрат с содержанием  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  4,5% при извлечении около 50%. После коллективной флотации темноцветных минералов гидроксамовыми кислотами в кислой среде лопарит отделялся от эгирина с помощью электромагнитной сепарации. В результате селективной флотации коллективного продукта получен лопаритовый концентрат с содержанием  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  3,7%. Для усиления различий во флотируемости лопарита и эгирина перед селективной лопаритовой флотацией проводилась кислотная обработка коллективного пенного продукта.

Еще один ценный минерал Ловозерского месторождения — TR-Sr-апатит, который наряду с лопаритом является минералом-концентратором редкоземельных элементов. Содержание стронция и РЗМ в ловозерском апатите в несколько раз превышает их содержание в хибинском апатите. Также он отличается повышенными содержаниями среднетяжелых РЗМ и иттрия [31]. В табл. 2 приведена характеристика хибинского апатитового концентрата

Таблица 2. Сравнительная характеристика ловозерского и хибинского апатитовых концентратов [31]  
Table 2. Comparative characteristics of Lovozersky and Khibiny apatite concentrates [31]

Концентрат	Содержание главных промышленно-ценных компонентов					
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	SrO, %	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , г/т	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , г/т	F, %
Ловозерский (горизонт II-7)	36,5	4,6—7,6	2,0—11,0	960	320	0,93—3,44
Хибинский	39,5	0,94	1,95	280	50	3,2

и полученного из апатито-лопаритовых руд Ловозерского массива ловозерского концентрата.

Часть апатита в процессе гравитационного обогащения аккумулируется в лопаритовом концентрате, а часть переходит в хвосты обогащения. Апатит из лопаритового концентрата при превышении технических условий (не более 0,09% фосфора) удаляется флотацией [32]. Содержание апатита в гравитационных хвостах составляет около 1% [14; 15]. Для выделения апатита из хвостов обогащения также может быть использован флотационный метод. При обогащении лежалых хвостов Ловозерского горно-обогатительного комбината в результате флотации в щелочной среде с использованием жирнокислотного собирателя дистиллированного талового масла и депрессора сопутствующих минералов силиката натрия получен апатитовый продукт с содержанием P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> около 15% при извлечении ~78%. Выход продукта составил 4—4,5%. Качество апатитового продукта может быть повышено введением перечистных операций.

## Выводы

Проведены исследования проб лежалых и текущих хвостов обогащения лопаритовых руд. Показана возможность флотационного получения нефелинового, лопаритового и апатитового концентратов.

В результате обратной флотации лежалых хвостов получен нефелиновый концентрат с содержанием 27,3% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при извлечении 77,8%. При флотации текущих хвостов содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в нефелиновом концентрате составило 27,7% при извлечении 79,9%.

Введение операции перечистки пенных продуктов обратной флотации с возвратом камерного продукта перечистки в основную флотацию позволило увеличить выход нефелинового концентрата и извлечение в него Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на ~3,8%.

Для повышения качества нефелиновых концентратов использована магнитная сепарация в сильном поле и флотация в среде кремнефтористого натрия. Содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в полученных концентратах составило 28,0—28,3% и 29,6%.

При флотации гравитационных шламов получен лопаритовый концентрат с содержанием Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 4,5% при извлечении ~50%.

При обогащении лежалых хвостов получен апатитовый продукт с содержанием P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> около 15% при извлечении ~78%. Качество апатитового продук-

та может быть повышено введением перечистных операций.

## Финансирование

Статья подготовлена в рамках гранта № 25-1720012 Российского научного фонда.

## Литература/References

1. Постановление Правительства Мурманской области «Об утверждении перечня объектов накопленного экологического ущерба на территории Мурманской области» от 29 марта 2013 г. № 139-ПП/5. — URL: [https://mpr.gov-murman.ru/files/139-%D0%9F%D0%9F-5\\_26%2003%202014.pdf](https://mpr.gov-murman.ru/files/139-%D0%9F%D0%9F-5_26%2003%202014.pdf). Resolution of the Government of the Murmansk Region “On approval of the list of objects of accumulated environmental damage in the territory of the Murmansk Region” dated March 29, 2013 no. 139-PP/5. Available at: [https://mpr.gov-murman.ru/files/139-%D0%9F%D0%9F-5\\_26%2003%202014.pdf](https://mpr.gov-murman.ru/files/139-%D0%9F%D0%9F-5_26%2003%202014.pdf). (In Russian).
2. Мельников Н. Н., Бусырев В. М., Чуркин О. Е. Оценка стоимости запасов и эффективности использования техногенных месторождений // Гор. информ.-аналит. бюл. — 2018. — № 8. — С. 200—207. — DOI: 10.25018/0236-1493-2018-8-0-200-207. Mel'nikov N. N., Busyrev V. M., Churkin O. E. Assessment of the value of reserves and the efficiency of using mining wastes. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' [Mining informational and analytical bulletin], 2018, no. 8, pp. 200—207. (In Russian).
3. Рациональное использование вторичных минеральных ресурсов в условиях экологизации и внедрения наилучших доступных технологий: монография / Под науч. ред. проф. Ф. Д. Ларичкина, проф. В. А. Кныша. — Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — 252 с. Rational use of secondary mineral resources in the context of environmentalization and the implementation of the best available technologies. Ed. by Professor F. D. Larichkin, Professor V. A. Knysh. Apatity, FRS KSC RAS, 2019, 252 p. (In Russian).
4. Чантурия В. А. Роль инновационных технологий обогащения и глубокой переработки минерального сырья в развитии минерально-сырьевой базы России // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья. (Плаксинские чтения-2023). — М., 2023. — С. 3—6.



- Chanturiya V. A. The role of innovative technologies of enrichment and deep processing of mineral raw materials in the development of the mineral and raw material base of Russia. *Sovremennye problemy kompleksnoi i glubokoi pererabotki prirodnogo i ne-traditsionnogo mineral'nogo syr'ya* [Modern problems of complex and deep processing of natural and non-traditional raw materials (Plaksinsky readings-2023)]. Moscow, 2023, pp. 3—6. (In Russian).
5. Dagwar P. P., Iqbal S. S., Dutta D. Sustainable recovery of rare Earth elements from industrial waste: A path to circular economy and environmental health. *Waste Management Bull.*, 2025, vol. 3, pp. 373—390. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.02.004>.
6. Темнов А. В., Быховский Л. З. Техногенные и вторичные источники редких металлов // *Минер. ресурсы России. Экономика и управление*. — 2021. — № 1-6 (175). — С. 6—13.
- Temnov A. V., Byhovskij L. Z. Rare metals from mining wastes and secondary raw materials. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management], 2021, no. 1-6, pp. 6—13. (In Russian).
7. Нечаев А. В., Поляков Е. Г. Существующий и перспективный баланс производства и потребления редкоземельных металлов в России // *Минер. ресурсы России. Экономика и управление*. — 2020. — № 2. — С. 49—53.
- Nechaev A. V., Polyakov E. G. Current and prospective balance of production and consumption of REE in Russia. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management], 2020, no. 2, pp. 49—53. (In Russian).
8. Соловьева В. М., Череповицын А. Е. Организационно-экономические модели развития редкоземельных промышленных комплексов: российский и зарубежный опыт // *Bull. of the South-Russian State Technical University (NPI), Series Socio-Economic Sciences*. — 2021. — Т. 14, № 1. — pp. 188—202. — DOI:10.17213/2075-2067-2021-1-188-202.
- Solov'eva V. M., Cherepovitsyn A. E. Organization and economic models of rare earth industrial complexes' development: Russian and foreign experience. *Bulletin of the South-Russian State Technical University (NPI), Series Socio-Economic Sciences*, 2021, vol. 14, no. 1, pp. 188—202. Available at: <https://doi.org/10.17213/2075-2067-2021-1-188-202>.
9. Balaram V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 2019, vol. 10, iss. 4, pp. 1285—1303. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>.
10. Лавров С. Н. Нужна ли России собственная сырьевая база для производства титана? // *Минер. ресурсы России. Экономика и управление*. — 2024. — № 6. — С. 50—59.
- Lavrov S. N. Does Russia need its own raw material base for titanium production? *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management], 2024, no. 6, pp. 50—59. (In Russian).
11. Xu J., Ma H., Yang M., Shen Z., Zhang B., Rui T., Zhao R. Experimental and numerical investigations on the microstructural features and mechanical properties of explosive welded niobium-steel interface. *Mater. Des.*, 2022, vol. 218, p. 110716. Available at: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4077524>.
12. Aliasghari S., Skeldo P., Zhou X., Gholinia A., Zhang X., Valizadeh R., Pira C., Junginger T., Burt G., Withers P. J. X-ray computed tomographic and focused ion beam/electron microscopic investigation of coating defects in niobium-coated copper superconducting radio-frequency cavities. *Mater. Chem. Phys.*, 2021, vol. 273, p. 125062. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125062>.
13. Максимова В. В., Красавцева Е. А., Савченко Е. Э. и др. Исследование состава и свойств хвостов обогащения лопаритовых руд текущего производства // *Зап. Гор. ин-та*. — 2022. — Т. 256. — С. 642—650. — DOI: 10.31897/PMI.2022.88.
- Maksimova V. V., Krasavceva E. A., Savchenko E. E., Ikkonen P. V., Elizarova I. R., Masloboev V. A., Makarov D. V. Study of the composition and properties of the beneficiation tailings of currently produced loparite ores. *Zapiski gornogo instituta* [Journal of Mining institute], 2022, vol. 256, pp. 642—650. DOI: 10.31897/PMI.2022.88. (In Russian).
14. Красавцева Е. А., Макаров Д. В., Максимова В. В. и др. Результаты исследований свойств и состава хвостов обогащения лопаритовых руд // *Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых*. — 2021. — № 3. — С. 190—198. — DOI: 15.15372/FTPRPI20210318.
- Krasavceva E. A., Makarov D. V., Maksimova V. V., Selivanova E. A., Ikkonen P. V. Studies of properties and composition of loparite ore mill tailings. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Journal of Mining Sciences], 2021, vol. 3, pp. 190—198. (In Russian). DOI: 15.15372/FTPRPI20210318.
15. Ракаев А. И., Черноусенко Е. В., Рухленко Е. Д., Алексеева С. А. Получение нефелинового концентрата из отвальных хвостов обогатительных фабрик Ловозерского ГОКа // *Обогащение руд*. — 2007. — № 1. — С. 8—11.
- Rakaev A. I., Chernousenko E. V., Ruhlenko E. D., Alekseeva S. A. Production of nepheline concentrate from final tailings of the Lovozorsky mining complex concentrating plants. *Obogashchenie rud*, 2007, no. 1, pp. 8—11. (In Russian).
16. Сизяков В. М., Сизякова Е. В. Перспективы развития комплексной переработки Кольских нефелиновых концентратов // *Гор. информ.-аналит. бюл.* — 2015. — № 5 1—4. — С. 126—145.
- Sizyakov V. M., Sizyakova E. V. Prospects for the development of complex processing of Kola nepheline concentrates. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin], 2015, no. 5 1—4, pp. 126—145. (In Russian).

17. Bagani M., Balomenos E., Panias D. Nepheline syenite as an alternative source for aluminum production. *Minerals*. 2021, vol. 11, no. 7. p. 734. Available at: <http://dx.doi.org/10.3390/min11070734>.
18. Samantray J., Anand A., Dash B., Ghosh M. K., Behera A. K. Nepheline Syenite — An Alternative Source for Potassium and Aluminium. *Rare Metal Technology*, 2019, ch. 15, pp. 145—159. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-05740-4\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05740-4_15).
19. Gurevich B. I., Kalinkina E. V., Kalinkin A. M. Binding properties of mechanically activated nepheline containing mining waste. *Minerals*, 2020, vol. 10, no. 1. Available at: <http://dx.doi.org/10.3390/min10010048>.
20. Левин Б. В., Лисюк Б. С., Луценко К. Л. и др. Нефелиновые концентраты и шламы — уникальное сырье для геополимерных материалов и конструкций // Мир дорог. Экология. Новые технологии. — 2020. — Вып. 129—130. — С. 91—100. Levin B. V., Lisyuk B. S., Lucenko K. L., Lytkin A. A., Svitcov A. A., Stankevich V. G., Mamulat S. L. Nepheline concentrates and sludges are unique raw materials for geopolymer materials and structures. *Mir dorog. Ekologiya. Novye tekhnologii* [The world of roads. Ecology. New technologies], 2020, no. 129—130, pp. 91—100. (In Russian).
21. Mahrn G., Hussin A., Abdelhaffez G. Nepheline syenite beneficiation for glass and ceramics industries, Afriqad. *J. Chem. Eng. Theoretical Appl. Chem.*, 2022, vol. 79, no. 597, pp. 533—538. DOI: 10.55815/408489.
22. 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. Pleshakov Yu. V., Alekseev A. I., Brylyakov Yu. E., Nikolaev A. I. Technology for the complex beneficiation of apatite-nepheline ores. *Obogashchenie rud*, 2004, no. 2, pp. 15—17. (In Russian).
23. 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 // Гор. информ.-аналит. бюл. — 2007. — № 10. — С. 365—369. Lygach V. N., Ladygina G. V., Brylyakov Yu. E., Kostrova M. A. Increasing the efficiency of nepheline production at ANOF-II of the JSC «Apatit» by improving the reagent regime of reverse flotation of nepheline. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin], 2007, no. 10, pp. 365—369. (In Russian).
24. Szyakov V. M., Kawalla R., Brichkin V. N. Geochemical aspects of the mining and processing of the large-tonne mineral resources of the hibirian alkaline massif. *Geochemistry*, 2019, vol. 80, no. 3, p. 125506. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.04.002>.
25. Митрофанова Г. В., Марчевская В. В., Перункова Т. Н. Совершенствование режимов нефелиновой флотации из складированных отходов обогащения апатит-нефелиновых руд хибинских месторождений // Цветные металлы. — 2022. — № 8. — С. 8—14. — DOI: 10.17580/tsm.2022.08.01. Mitrofanova G. V., Marchevskaya V. V., Perunkova T. N. Improving the regimes of nepheline flotation from the stored waste of apatite-nepheline ore processing at the Khibiny deposits. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous Metals], 2022, no. 8, pp. 8—14. DOI: 10.17580/tsm.2022.08.01. (In Russian).
26. Shapovalov N. A., Gorodov A. I., Krainiy A. A., Krainiia E. V. The influence of mixed cationic and anionic surfactants on the flotation of nepheline. *J. Eng. Appl. Sci.*, 2019, vol. 14, no. 16, pp. 5719—5724. Available at: <https://doi.org/10.36478/jeasci.2019.5719.5724>.
27. Ратобыльская Л. Д., Кожевников О. А., Бойко Н. Н. и др. Селективная флотация нефелина из хвостов апатитового производства // Комбинированные методы при комплексном обогащении полезных ископаемых. — Л.: Наука, 1977. — С. 120—126. Ratobyl'skaya L. D., Kozhevnikov O. A., Bojko N. N., Lygach V. N., Kajtmazova T. I., Maslov A. D. Selective Flotation of Nepheline from Tailings of Apatite Production. *Kombinirovannye metody pri kompleksnom obogashchenii poleznykh iskopayemykh* [Combined methods for complex mineral processing]. Leningrad, Nauka, 1977, pp. 120—126. (In Russian).
28. Богданов О. С., Михайлова Н. С., Янис Н. А. и др. Пути повышения качества нефелинового концентрата на комбинате «Апатит» // Обогащение руд. — 1976. — № 4. — С. 8—12. Bogdanov O. S., Mihajlova N. S., Yanis N. A., Bondarenko O. P., Budnikova N. V. Ways to improve the quality of nepheline concentrate at the Apatit plant. *Obogashchenie rud*, 1976, no. 4, pp. 8—12. (In Russian).
29. Александрова Т. Н., Элбэндари А. М. Повышение эффективности переработки фосфатных руд флотационным методом // Зап. Гор. ин-та. — 2021. — Т. 248. — С. 260—271. — DOI: 10.31897/PMI.2021.2.1013. Aleksandrova T. N., Elbendari A. M. Increasing the efficiency of phosphate ore processing using flotation method. *Zapiski gornogo instituta* [Journal of Mining institute], 2021, vol. 248, pp. 260—271. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.1013. (In Russian).
30. Сентемова В. А. Технология получения нефелиновых концентратов // Гор. журн. — 2011. — № 2. — С. 39—42. Sentemova V. A. The technology of nepheline concentrate obtaining. *Gornyi zhurnal*, 2011, no. 2, pp. 39—42. (In Russian).
31. Мелентьев Г. Б. Редкоземельный ресурс инновационного развития российских производств: состояние и перспективы // Оборон. комплекс — науч.-техн. прогрессу России. — 2013. — № 3. — С. 82—94. Melent'ev G. B. Rare-Earth Resource for Innovative Development of Russian Production: Status and Prospects. *Oboronnyi kompleks — nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii* [Defence industry achievements — Russian & technical progress], 2013, no. 3, pp. 82—94. (In Russian).

32. Ракаев А. И., Борисов Ю. М., Черноусенко Е. В. и др. Развитие обогатительного комплекса Ловозерского ГОКа на основе перспективных решений по рудо-подготовке и обогащению // Гор. журн. — 2010. — № 9. — С. 81—84.

Rakaev A. I., Borisov Yu. M., Chernousenko E. V., Morozova T. A., Alekseeva S. A. Development of beneficiation complex of Lavozersky mining and concentrating complex on the base of innovative solutions of ore preparation and beneficiation. Gornyi zhurnal, 2010, no. 9, pp. 81—84. (In Russian).

### Информация об авторах

**Черноусенко Елена Владимировна**, старший научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Мурманская область, Апатиты, ул. Ферсмана, д. 24), e-mail: e.chernousenko@ksc.ru.

**Митрофанова Галина Викторовна**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Мурманская область, Апатиты, ул. Ферсмана, д. 24), e-mail: g.mitrofanova@ksc.ru.

**Каменева Юлия Сергеевна**, младший научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Мурманская область, Апатиты, ул. Ферсмана, д. 24), e-mail: yu.kameneva@ksc.ru.

## PROSPECTS FOR THE INTEGRATED USE OF THE LOPARITE ORE TAILINGS

**Chernousenko, E. V., Mitrofanova, G. V., Kameneva, Yu. S.**

Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (Apatity, Murmansk region, Russia)

The article was received on August 28, 2025

### For citing

*Chernousenko E. V., Mitrofanova G. V., Kameneva Yu. S.* Prospects for the integrated use of the loparite ore tailings. Arctic: Ecology and Economy, 2026, vol. 16, no. 1, pp. ?—?. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-1-?-?. (In Russian).

### Abstract

The article considers the possibility to recover nepheline, loparite, and apatite concentrates from the loparite ore tailings. Reverse flotation of both stored and current tailings yielded nepheline concentrates containing 27.3% and 27.7%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  with a recovery of 77.8% and 79.9%, respectively. The proposed closed-cycle flotation scheme for current tailings allowed increasing the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  recovery into concentrate by 3.8%. Improvement in concentrate quality is achieved using electromagnetic separation (28.0—28.3%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) or direct flotation in sodium silicofluoride medium (29.6%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). During the flotation of gravity tailings, a loparite concentrate was produced containing  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  with a recovery of approximately 50%. Beneficiation of stored tailings yielded an apatite product containing about 15%  $\text{P}_2\text{O}_5$  with a recovery of approximately 78%. The quality of the apatite product can be improved by introducing cleaning operations.

**Keywords:** *tailings storage facility, tailings, loparite, nepheline, apatite, flotation, magnetic separation.*

### Funding

The article was prepared within the framework of grant no. 25-1720012 of the Russian Science Foundation.

### Information about the authors

**Chernousenko, Elena Vladimirovna**, Senior Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (24, Fersmana St., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209), e-mail: e.chernousenko@ksc.ru.

**Mitrofanova, Galina Victorovna**, PhD of Engineering, Head of the laboratory, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (24, Fersmana St., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209), e-mail: g.mitrofanova@ksc.ru.

**Kameneva, Yuliya Sergeevna**, Junior Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (24, Fersmana St., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209), e-mail: yu.kameneva@ksc.ru.