ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья
УДК 622.17

Исследование состава и свойств хвостов обогащения лопаритовых руд текущего производства

В.В.МАКСИМОВА[1,2]✉, **Е.А.КРАСАВЦЕВА**[1,2], **Е.Э.САВЧЕНКО**[3], **П.В.ИККОНЕН**[4], **И.Р.ЕЛИЗАРОВА**[2], **В.А.МАСЛОБОЕВ**[2], **Д.В.МАКАРОВ**[2]

[1] *Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики КНЦ РАН, Апатиты, Россия*
[2] *Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия*
[3] *Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия*
[4] *Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В.Тананаева КНЦ РАН, Апатиты, Россия*

***Как цитировать эту статью*:** Максимова В.В., Красавцева Е.А., Савченко Е.Э., Икконен П.В., Елизарова И.Р., Маслобоев В.А., Макаров Д.В. Исследование состава и свойств хвостов обогащения лопаритовых руд текущего производства // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 642-650. DOI: 10.31897/PMI.2022.88

Аннотация. Увеличение спроса на редкоземельные металлы и истощение природных ресурсов неизбежно приводит к необходимости поиска альтернативных нетрадиционных источников редкометалльного сырья. В статье представлены результаты исследования состава и свойств хвостов обогащения лопаритовых руд текущего производства. Проведены ситовой, минералогический, химический и радионуклидный анализы. Определено среднее содержание лопарита в хвостах обогащения. Методом сканирующей электронной микроскопии диагностированы минералы-концентраторы редкоземельных элементов в хвостах обогащения лопаритовых руд. Определено распределение ценных компонентов и тория в хвостах в зависимости от класса крупности частиц. Установлен радиево-ториевый характер радиоактивности, рассчитаны значения эффективной удельной активности проб. Сделан вывод о необходимости разработки комплексной технологии переработки хвостов обогащения лопаритовых руд, обусловленной сложным и неоднородным минеральным и химическим составом материала хвостов.

***Ключевые слова*:** хвостохранилища; редкоземельные элементы; хвосты обогащения; технология переработки

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-27-00159.

Поступила: 27.06.2022 ***Принята: 09.09.2022*** ***Онлайн: 03.11.2022*** ***Опубликована: 03.11.2022***

Введение. Редкоземельные элементы (РЗЭ) находят широкое применение в сфере высоких технологий как сырье для производства сверхпроводников, автомобильных каталитических нейтрализаторов, объективов фотоаппаратов и телескопов, мощных магнитов, используемых в компьютерной технике и производстве ветряных турбин, в системах сканирования рентгеновских лучей и многих других производствах [1, 2]. Получение редкометалльного сырья в основном базируется на переработке комплексных руд, обладающих мелкой вкрапленностью ценных компонентов. Применение на первых стадиях обогащения широко распространенных методов магнитной и гравитационной сепарации не может обеспечить полное извлечение тяжелых минералов, что приводит к существенным потерям ценных компонентов с хвостами [3, 4].

Истощение сырьевой базы, недостаточная эффективность существующих схем обогащения и динамика спроса и предложения на мировых рынках металлов повышают интерес к поиску нетрадиционных и альтернативных источников редкометалльного сырья [5]. В последние годы активно исследуются возможности извлечения РЗЭ из постоянных магнитов, люминесцентных ламп, отходов электроники [6-8]. Большое количество работ посвящено переработке промышленных отходов: металлургического производства – фосфогипс, бокситовый остаток (красный шлам), металлургические шлаки и промышленно-технологические остатки от термических очистных сооружений (угольная зола, зола мусоросжигательных заводов), сточные воды горных предприятий [4, 9-12].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Разработка технологий извлечения РЗЭ из хвостов обогащения редкометалльных руд имеет ряд преимуществ: переработка хвостов обогащения может осуществляться на базе уже имеющейся инфраструктуры с использованием части установленного на обогатительных фабриках оборудования, исключается необходимость дробления крупных кусков руды, что позволяет сократить затраты на измельчение. Как известно, измельчение и классификация руды по классам крупности с использованием мельниц и дробилок составляет значительную часть затрат технологических схем переработки руд [13-15].

Помимо существенной энерго- и материалоемкости производства, отходы обогащения руд, содержащих РЗЭ, могут оказывать существенное влияние на биосферу [16]. Складируемые твердые минеральные отходы являются источником серьезного загрязнения атмосферы, почв, поверхностных и подземных вод широким спектром загрязняющих веществ [17-19] вследствие пыления незакрепленных отвалов и хвостохранилищ и миграции растворимых форм поллютантов с природными водами [20, 21]. Особое внимание привлекают хранилища отходов редкометалльных руд из-за содержания в хвостах радиоактивного тория, изоморфно замещающего редкоземельные элементы.

Таким образом, вовлечение отвальных хвостов обогащения в переработку с извлечением редкоземельных минералов может стать путем получения ценного товарного продукта, одновременно снижая экологическую опасность. Целью работы являлось обоснование перспективности разработки технологии доизвлечения редкоземельных элементов из хвостов обогащения лопаритовых руд текущего производства.

Методология. Единственное предприятие России, разрабатывающее месторождение лопаритовых руд, расположено в центре Кольского п-ова. На руднике производится добыча и обогащение руды с получением лопаритового концентрата. Обогащение лопаритовых руд происходит в три этапа: гравитационное обогащение, флотационная перечистка, электромагнитная и электростатическая сепарации. Общий накопленный объем хвостов обогащения лопаритовых руд достигает 18 млн т с ежегодным приращением около 400-450 тыс. т, среднее содержание лопарита варьирует от 0,64 до 0,96 % [22].

Как ранее было отмечено, дифференциация материала хвостов по крупности и вещественному составу происходит уже на стадии складирования [23], поэтому для данного исследования были отобраны пробы хвостов из зумпфа на обогатительной фабрике.

Гранулометрический состав хвостов определяли с помощью лазерного анализатора размера частиц Shimadzu SALD 201V. Анализ проб проводился в соответствии с международным стандартом ISO 13320-1:1999 «Гранулометрический анализ. Методы лазерной дифракции». Силикатный и минералогический анализы проведены в аккредитованных лабораториях ОАО «Кольский геолого-информационный аналитический центр» по установленным методикам.

Качественный состав проб диагностировали рентгенофазовым анализом (дифрактометр ДРОН-2.0, излучение CuKα, база данных PDF2) и сканирующей электронной микроскопией (SEM LEO-420 (Carl Zeiss), система Aztec Oxford Instruments) на базе Геологического института Кольского научного центра РАН.

Содержание редкоземельных элементов легкой группы в хвостах определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в Центре коллективного пользования Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН (ELAN 9000, PerkinElmer, США). На анализ передавали среднюю пробу хвостов и пробы, расситованные на ситах с размером ячеек 0,071, 0,1, 0,25 и 0,5 мм.

Радионуклидный анализ с использованием сцинтилляционного γ-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс» проводился для средней пробы хвостов, тонкодисперсного материала и отситованной фракции +0.071 мм в Институте химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В.Тананаева КНЦ РАН. Значения удельных активностей ^{226}Ra, ^{232}Th и ^{40}K проб хвостов обогащения рассчитаны в соответствии с ГОСТ 30108-94 «Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов».

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 642-650 DOI: 10.31897/PMI.2022.88
© В.В.Максимова, Е.А.Красавцева, Е.Э.Савченко, П.В.Икконен, И.Р.Елизарова, В.А.Маслобоев, Д.В.Макаров, 2022

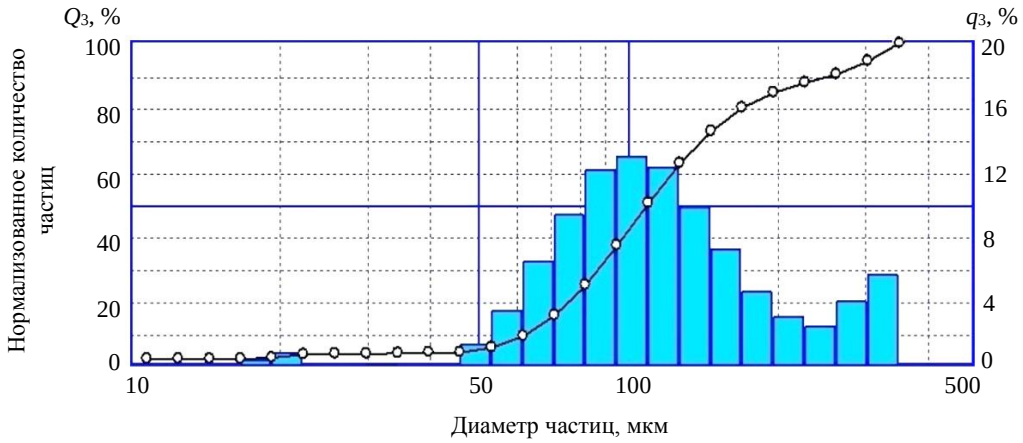


Рис.1. Гранулометрический состав хвостов обогащения лопаритовых руд текущего производства

Обсуждение результатов. Графические результаты проведенного анализа гранулометрического состава хвостов обогащения лопаритовых руд текущего производства показаны на рис.1.

По литологической классификации хвосты относятся к мелким и среднезернистым пескам, преобладающими фракциями являются 0,05-0,1 и 0,1-0,25 мм.

Химический состав хвостов текущего производства, мас.%: SiO_2 – 48,53, TiO_2 – 1,35, Al_2O_3 – 22,40, Fe_2O_3 – 5,12, FeO – 0,66, MnO – 0,25, CaO – 1,42, MgO – 0,38, K_2O – 4,24, Na_2O – 13,43, P_2O_5 – 0,68, SrO – 0,35, F – 0,08, SO_3 – 0,11.

В составе хвостов обогащения преобладающими минералами являются нефелин $(Na,K)AlSiO_4$ (62,2 %), полевые шпаты $(Na, K)AlSi_3O_8$ (16,5 %) и эгирин $NaFe^{3+}(Si_2O_6)$ (18,7 %). Также были обнаружены: апатит $Ca_{10}(PO_4)_6(OH, F, Cl)_2$ (1,03 %), ломоносовит $Na_{10}Ti_4(Si_2O_7)_2(PO_4)_2O_4$ (0,19 %), содалит $Na_4Si_3Fl_3O_{12}Cl$ (0,17 %) и лампрофиллит $(Sr, Ba)_2(Na, Ti)_4Ti_2O(Si_2O_7)_2(O, OH, F)_2$ (0,15 %). Среднее содержание лопарита $(Na, Ce, Ca, Sr, Th)(Ti, Nb, Fe)O_3$ составило 0,98 %.

Рентгенофазовый анализ согласуется с установленным минеральным составом хвостов обогащения. На рис.2 представлен микроснимок образца хвостов текущего производства. Отдельно выделены образцы стронциевого апатита, лопарита и эвдиалита.

Основными минералами-концентраторами РЗЭ в хвостах являются: лопарит, стронциевый апатит $((Sr, Ca)_5(PO_4)_3(OH, F)$, эвдиалит $Na_4(Ca, Ce, Fe, Mn)_2Zr$, $Si_6O_{17}(OH, Cl)_2$. Также был

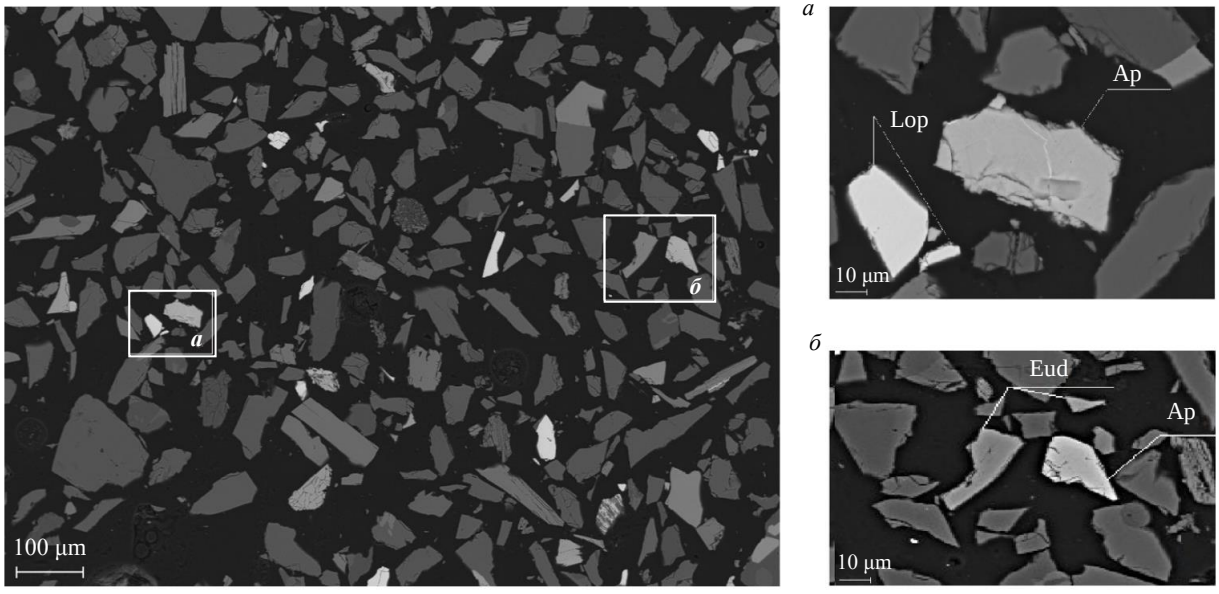


Рис.2. Микроснимок образца хвостов текущего производства: *а* – Lop (лопарит), Ap (стронциевый апатит); *б* – Eud (эвдиалит)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.88

Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 642-650
© В.В.Максимова, Е.А.Красавцева, Е.Э.Савченко, П.В.Икконен, И.Р.Елизарова, В.А.Маслобоев, Д.В.Макаров, 2022

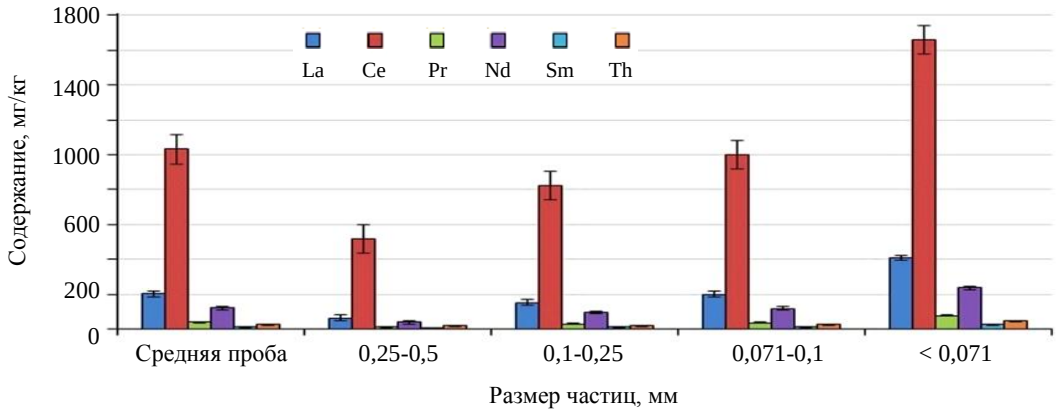


Рис.3. Распределение РЗЭ легкой группы и тория в материале хвостов по классам крупности

диагностирован витусит-(Ce) ($Na_3(Ce, La, Nd)(PO_4)_2$. Замещение кальция стронцием в составе стронциевого апатита приводит к увеличению параметров элементарной ячейки Sr-апатита за счет большего ионного радиуса стронция и большему удельному весу Sr-апатита по сравнению с чистым апатитом [24]. Частицы минералов, содержащих РЗЭ, преимущественно имеют меньший размер зерен, чем частицы эгирина, апатита и калиевых полевых шпатов.

Таким образом, ценные минералы преимущественно представлены трудновскрываемыми оксидами (лопарит), силикатами (эвдиалит), и фосфатами (Sr-апатит, Ce-витусит и др).

Результаты химического анализа средней пробы и расситованных фракций хвостов обогащения лопаритовых руд приведены на рис.3.

Можно отметить повышенное содержание РЗЭ легкой группы и тория во фракции –0,071 мм, закономерно превышающее среднее содержание в земной коре (лантан 30-35 мг/кг, церий 64-66 мг/кг, празеодим 7,1-9,1, неодим 26-40, самарий 4,5-7) [25, 26]. Распределение содержаний РЗЭ соотносится с правилом Оддо – Гаркинса – концентрации элементов с четными порядковыми номерами периодической таблицы выше, чем элементов с нечетными [27].

Сравнение содержания ценных компонентов в хвостах обогащения лопаритовых руд с аналогичными объектами в мире показало сопоставимые результаты со складированными отходами обогащения руд в Китае и США. Так, в хвостах обогащения хвостохранилища в г. Ганьчжоу провинции Цзянси на юге Китая концентрация суммы редкоземельных элементов составляет 747±50 мг/кг, в хвостах рудника Маунтин-Пасс содержание оксидов редкоземельных элементов достигает 5 % [4, 28, 29]. Большее содержание РЗЭ отмечено для отходов переработки руды месторождения Баян-Обо, где значительное количество РЗЭ и ниобия терялось ввиду несовершенности технологического цикла, что приводило к низкому коэффициенту извлечения (порядка 10 %) РЗЭ [29].

Радионуклидный анализ хвостов обогащения лопаритовых руд текущего производства (рис.4) установил радиево-ториевый характер радиоактивности, что согласуется с ранее определенным для лежалых хвостов обогащения [29].

Эффективная удельная активность ($А_{эфф}$) природных радионуклидов в исследованных усредненных пробах хвостов варьирует от 814 до 1168 Бк/кг, что позволяет отнести хвосты к I категории отходов с расчетной величиной $А_{эфф}$ менее 1500 Бк/кг в соответствии с п. 6.2. СанПиН 2.6.1.2800-10

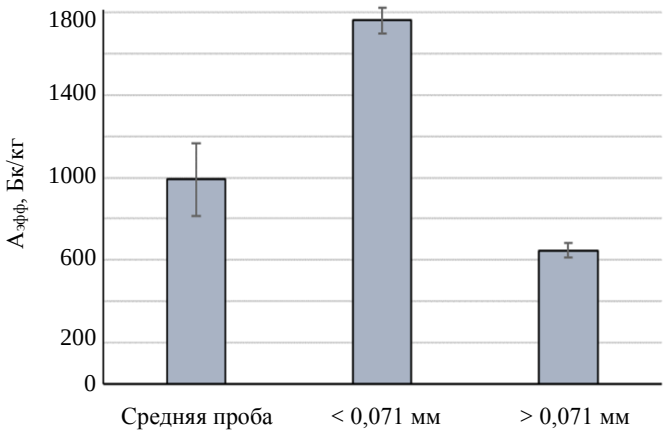


Рис.4. Эффективная удельная активность проб, Бк/кг

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.В.Максимова, Е.А.Красавцева, Е.Э.Савченко, П.В.Икконен, И.Р.Елизарова, В.А.Маслобоев, Д.В.Макаров, 2022

«Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения». Производственные отходы I категории могут направляться для захоронения в места захоронения промышленных отходов без ограничений по радиационному фактору. Согласно п. 5.3.4. НРБ 99/2009 строительные материалы, а также отходы промышленного производства, используемые для изготовления строительных материалов и готовой продукции с $А_{эфф}$ природных радионуклидов более 740 Бк/кг, но менее 1500 Бк/кг можно использовать в дорожном строительстве вне населенных пунктов (III класс строительных материалов по $А_{эфф}$). Согласно СанПиН 2.6.1.2800-10 (п. 5.2) исходное сырье относится ко II классу материалов по $А_{эфф}$ и является минеральным сырьем и материалами с повышенным содержанием природных радионуклидов.

В пробах тонкодисперсного материала хвостов (–0,071 мм) $А_{эфф}$ находится в пределах 1697-1825 Бк/кг. Как хвосты обогащения пробы фракции –0,071 мм относятся к II категории отходов ($А_{эфф}$ более 1500, но менее 10000 Бк/кг) в соответствии с п. 6.2. СанПиН 2.6.1.2800-10. Согласно п. 6.4. СанПиН 2.6.1.2800-10 производственные отходы II категории направляются для захоронения на специально выделенные участки в места захоронения промышленных отходов. Как сырье для стройматериалов тонкодисперсные хвосты относятся к IV классу. Согласно п. 5.3.4. НРБ 99/2009 вопрос об использовании материалов с $А_{эфф}$ природных радионуклидов более 1500 Бк/кг, но менее 4000 Бк/кг решается в каждом случае отдельно на основании санитарно-эпидемиологического заключения федерального органа исполнительной власти, уполномоченного осуществлять государственный санитарно-эпидемиологический надзор.

В пробах отситованных хвостов фракцией +0,071 мм $А_{эфф}$ находится в пределах 613-681 Бк/кг. Как хвосты обогащения пробы фракцией +0,071 мм относятся к I категории отходов (менее 1500 Бк/кг) в соответствии с п. 6.2. СанПиН 2.6.1.2800-10, как сырье для стройматериалов относятся к II классу. Согласно п. 5.3.4. НРБ 99/2009 строительные материалы, а также отходы промышленного производства, используемые для изготовления строительных материалов и готовой продукции с $А_{эфф}$ природных радионуклидов более 370 Бк/кг но менее 740 Бк/кг (II класс), можно использовать в дорожном строительстве в пределах территории населенных пунктов и зон перспективной застройки, а также при возведении производственных сооружений. Согласно п. 4.5.2. СанПиН 2.6.1.2800-10 использование в коммунальных условиях и быту материалов и изделий, кроме строительного сырья и материалов, содержащих только природные радионуклиды с эффективной удельной активностью менее 740 Бк/кг, допускается без ограничений по радиационному фактору.

В общем виде процесс извлечения РЗЭ состоит из трех основных стадий – добыча и измельчение, процессы обогащения (гравитационное обогащение, магнитная и электростатическая сепарация, флотация и др.) и гидрометаллургические методы извлечения металлов, включающие в себя процессы выщелачивания, нейтрализации и осаждения, методы разделения и очистки [30]. Разработка технологии переработки текущих хвостов обогащения сопряжена с подбором оптимальных методов, позволяющих нивелировать негативное влияние высокого содержания силикатной составляющей в хвостах, наличия радиоактивных элементов, нахождения целевых компонентов в составе трудновскрываемых оксидов и фосфатов РЗЭ, необходимости целевого извлечения компонентов при высоком содержании мешающих примесей в продуктивном растворе.

Применение широко распространенной обработки хвостов неорганическими кислотами и их смесями, за счет высокого содержания в хвостах алюмосиликатов, в частности нефелина и полевого шпата, приводит к образованию в растворе золей кремниевой кислоты, что значительно затрудняет дальнейшую переработку продуктивного раствора. Преодоление этого фактора возможно несколькими путями. В работах [31, 32] мешающее влияние кремнекислоты устраняется предварительным щелочным вскрытием силикатов и удалением кремния водным выщелачиванием растворимых силикатов щелочных металлов. Извлечение суммы РЗЭ, связанных с алюмосиликатной стеклообразной фазой из тонкодисперсных остатков сгорания угля [31], увеличилось с 20 % при проведении выщелачивания неорганическими кислотами (HCl, H_2SO_4, HNO_3) без предварительного обжига до 79 и 89 % при обжиге NaOH и Na_2CO_3, соответственно. Удаление растворенных силикатов возможно коагуляцией с полиакриламидом. В работе [33] очистка продуктивного

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

раствора при переработке черного алюминиевого шлака путем коагуляции с полиакриламидом позволила получить гидроксид алюминия 99 %-ной чистоты и добиться полного удаления силикатов из раствора.

В исследованиях [34, 35], посвященных переработке схожих по вещественному и гранулометрическому составу хвостов обогащения апатит-нефелинового производства, выделение нефелина осуществлялось по флотационно-магнитной схеме. Нефелин выделялся посредством обратной флотации из обесшламленных хвостов, далее флотационный концентрат поступал на мокрую двухстадийную электромагнитную сепарацию, в сильном поле удалялись сильномагнитные минералы, преимущественно титаномагнетит, в слабом поле – эгирин. Использованная схема [34] позволила получить из отходов обогащения апатит-нефелиновых фабрик АНОФ-1 и АНОФ-2 нефелиновый концентрат с содержанием 28,5-29,2 % Al_2O_3 при извлечении от исходного сырья на уровне 57,7-71 %.

Отсадка нефелина и калиевых полевых шпатов из материала хвостов обогащения лопаритовых руд может осуществляться и посредством предложенной в работе [36] гравитационно-магнитной технологии, включающей в себя классификацию по крупности, винтовую сепарацию для отделения преимущественно крупных сростков эгирина и лопарита, концентрацию на столах и электромагнитную сепарацию. Предложенная технология была опробована на отвальных хвостах Карнасуртской фабрики с получением нефелинового концентрата, содержащего 28,3-28,5 % Al_2O_3 при извлечении 86,9 %, и на хвостах Умбозерской фабрики с получением нефелинового концентрата с содержанием Al_2O_3 порядка 25 %. Препятствием к получению концентрата более высокого качества стало высокое содержание в пробе полевых шпатов [36]. В работах [37, 38] отмечено, что применением гравитационных и магнитных методов предконцентрации можно удалить значительную часть минералов пустой породы, повысив селективность извлечения РЗЭ и снизив расход реагентов как для флотации, так и для последующего выщелачивания.

Перспективными реагентами для осуществления последующей флотации предконцентрированного редкометалльного продукта является класс комплексообразователей на основе гидроксамовых кислот, позволяющий эффективно осуществлять совместную флотацию лопарита и эгирина [35, 39]. Эффект воздействия гидроксамовых кислот был опробован [35] при флотации шламовых продуктов обогащения лопаритовых руд, позволив получить 3,7 %-ный концентрат оксида ниобия при исходном содержании в шламах 0,17 %.

При осуществлении гидрохимического передела в продуктивный раствор вместе с ионами редкоземельных элементов неизбежно будет переходить и торий, изоморфно замещающий РЗЭ в ряде минералов. Учитывая разнообразный минеральный состав разрабатываемых руд Ловозерского массива [40], можно предположить, что в основном торий будет концентрироваться в Na-Th силикатах, витусите-(Ce), лопарите. Помимо этого, может обнаруживаться значительное присутствие тория в минералах группы рабдофана, титаните [41], пирохлоре, стенструпине, апатитах (беловите-(Ce), фтор и стронциоапатитах) и др. Осуществление селективного выщелачивания тория является сложной технической задачей за счет близости свойств тория и РЗЭ. Возможен классический вариант совместного осаждения тория и РЗЭ из кислых растворов путем добавления щавелевой кислоты [42, 43]. Полученные оксалаты четырехвалентного церия и тория подвергаются прокаливанию, повторной кислотной обработке и экстракции трибутилфосфатом. В водном растворе остаются растворенные редкоземельные элементы, в органической – торий. По данным [43] 30 %-ная концентрированная щавелевая кислота осаждает 99 % тория и 98 % РЗЭ при 30 °С.

Многостадийность и сложность процесса переработки хвостов обогащения лопаритовых руд требует применения новых инновационных технологий и дальнейшего углубленного исследования материала хвостов, тем не менее интерес к данной теме не ослабевает. Разрабатываются новые технологии биовыщелачивания [44], флотационные реагенты и пр. Совершенствование технологии предконцентрации хвостов и последующей гидрометаллургической переработки позволит снизить количество необходимых этапов и затрачиваемых ресурсов. Вовлечение в переработку хвостов может позволить не только снизить объем накопленных отходов и наносимый ими вред окружающей среде, но и получить дополнительный товарный продукт, реализуя принцип перехода к устойчивой экономике горнопромышленной отрасли.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.В.Максимова, Е.А.Красавцева, Е.Э.Савченко, П.В.Икконен, И.Р.Елизарова, В.А.Маслобоев, Д.В.Макаров, 2022

Заключение. В ходе исследования был изучен состав и свойства хвостов обогащения лопаритовых руд текущего производства. Преобладающими фракциями являются 0,05-0,1 и 0,1-0,25 мм. Установлено среднее содержание лопарита в хвостах – 0,98 %. С учетом объема накопленных за годы работы предприятия отходов, хвосты обогащения лопаритовых руд представляют интерес как источник редкометалльного сырья.

Методом сканирующей электронной микроскопии были диагностированы минералы-концентраторы РЗЭ в хвостах обогащения лопаритовых руд – лопарит, эвдиалит, стронциевый апатит. Анализ расситованных фракций выявил концентрирование РЗЭ и тория в тонкодисперсном материале хвостов обогащения. На основе радионуклидного анализа были рассчитаны значения эффективной удельной активности проб и установлен радиево-ториевый характер радиоактивности.

Рассмотренные в данной работе особенности отходов обогащения лопаритовых руд имеют большое значение при разработке современных экономически и экологически целесообразных технологий переработки. Так, концентрирование РЗЭ легкой группы и тория в мелкой фракции хвостов, подтверждаемое, в том числе, более высокой эффективной удельной активностью фракции менее 0,071 мм, предусматривает включение в разрабатываемую технологию этапов гравитационно-магнитного и флотационного обогащения. Данный факт обращает на себя внимание в связи с повышенной миграционной активностью пылеватой фракции хвостов, что ведет к увеличению уровня экологического риска для прилегающих к хвостохранилищам территорий. Товарным продуктом, получаемым на начальной стадии переработки, может стать нефелиновый и калиево-шпатовый концентрат, применяемый как сырье для получения глинозема, цемента, поташа, соды. Черновой РЗЭ-содержащий концентрат в дальнейшем может перерабатываться гидрометаллургическим способом. Продуктивный раствор подвергается осаждению с получением на выходе суммы РЗЭ и тория, либо экстрагированию органическими растворителями с получением индивидуальных металлов. При этом наименее разработанным вопросом остается отделение тория, обеспечивающего основную часть радиоактивности материала. Введение в технологию этапа отделения тория от РЗЭ на существующем уровне развития технологий будет приводить к заметному росту затрат на производство и увеличению объема сопутствующих отходов. Нахождение эффективного способа преодоления этой проблемы повлечет за собой значительное увеличение спектра применения отходов обогащения лопаритовых руд.

Рассмотрение хвостохранилищ как техногенных месторождений с низким содержанием ценных компонентов, но значительным объемом материала приводит к необходимости разработки специфических технологий переработки, обеспечивающих не только получение ценного товарного продукта, но и снижающих ущерб окружающей среде.

Авторы выражают признательность старшему научному сотруднику А.В.Светлову и младшему научному сотруднику А.А.Горячеву за помощь в отборе проб хвостов обогащения лопаритовых руд, инженеру М.Ю.Сидорову за изготовление препаратов для СЭМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kyung Taek Rim, Kwon Ho Koo, Jung Sun Park.* Toxicological evaluations of rare earths and their health impacts to workers: A Literature Review // Safety and Health at Work. 2013. Vol. 4. Iss. 1. P. 12-26. DOI: 10.5491/SHAW.2013.4.1.12

2. *Goodenough K.M., Wall F., Merriman D.* The rare earth elements: demand, global resources, and challenges for resourcing future generation // Natural Product Research. 2018. Vol. 27. P. 201-216. DOI: 10.1007/s11053-017-9336-5

3. *Jordens A., Ying Ping Cheng, Waters K.E.* A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals // Minerals Engineering. 2013. Vol. 41. P. 97-114. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.10.017

4. *Binnemans K., Jones P.T., Blanpain B. et al.* Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: A critical review // Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 99. P. 17-38. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.089

5. *Abaka-Wood G.B., Ehrig K., Addai-Mensah J., Skinner W.* Recovery of Rare Earth Elements Minerals from Iron-Oxide-Silicate-Rich Tailings: Research Review // Eng. 2022. Vol. 3. Iss. 2. P. 259-275. DOI: 10.3390/eng30200200

6. *Abaka-Wood G.B., Zanin M., Addai-Mensah J., Skinner W.* Recovery of rare earth elements minerals from iron oxide-silicate rich tailings – Part 1: Magnetic separation // Minerals Engineering. 2019. Vol. 136. P. 50-61. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.02.026

7. *Binnemans K., Jones P.T., Blanpain B. et al.* Recycling of rare earths: A critical review // Journal of Cleaner Production. 2013. Vol. 51. P. 1-22. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.12.037

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

8. *Tunsu C., Petranikova M., Gergorić M. et al.* Reclaiming rare earth elements from end-of-life products: A review of the perspectives for urban mining using hydrometallurgical unit operations // Hydrometallurgy. 2015. Vol. 156. P. 239-258. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.06.007

9. *Lokshin E.P., Tareeva O.A.* Recovery of lanthanides from extraction phosphoric acid produced by the dihydrate process // Russian Journal of Applied Chemistry. 2010. Vol. 83. P. 951-957. DOI: 10.1134/S1070427210060042

10. *Abhilash, Sinha S., Sinha M.K., Pandey B.D.* Extraction of lanthanum and cerium from Indian red mud // International Journal of Mineral Processing. 2014. Vol. 127. 70-73. DOI: 10.1016/j.minpro.2013.12.009

11. *Franus W., Wiatros-Motyka M.M., Wdowin, M.* Coal fly ash as a resource for rare earth elements // Environmental Science and Pollution Research. 2015. Vol. 22. P. 9464-9474. DOI: 10.1007/s11356- 015-4111-9

12. *Delgado J., Pérez-López R., Galván L. et al.* Enrichment of rare earth elements as environmental tracers of contamination by acid mine drainage in salt marshes: a new perspective // Marine Pollution Bulletin. 2012. Vol. 64. Iss. 9. P. 1799-1808. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2012.06.001

13. *Stanujkic D., Zavadskas E.K., Karabasevic D. et al.* An approach to solving complex decision-making problems based on IVIFNs: A case of comminution circuit design selection // Minerals Engineering. 2019. Vol. 138. P. 70-78. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.04.036

14. *Cleary P.W., Delaney G.W., Sinnott M.D. et al.* Advanced comminution modelling: Part 1– crushers // Applied Mathematical Modelling. 2020. Vol. 88. P. 238-265. DOI: 10.1016/j.apm.2020.06.049

15. *Owusu K.B., Karageorgos J., Greet C., Zanin M. et al.* Predicting mill feed grind characteristics through acoustic measurements // Minerals Engineering. 2021. Vol. 171. № 107099. DOI: 10.1016/J.MINENG.2021.107099

16. *Wall F., Rollat A., Pell R.S.* Responsible sourcing of critical metals // Elements. 2017. Vol. 13. Iss. 5. P. 313-318. DOI: 10.2138/gselements.13.5.313

17. *Derome J., Lindroos A.J.* Effects of heavy metal contamination on macronutrient availability and acidification parameters in forest soil in the vicinity of the Harjavalta Cu-Ni smelter, SW Finland // Environmental Pollution. 1998. Vol. 99. Iss. 2. P. 225-232. DOI: 10.1016/s0269-7491(97)00185-1

18. *Xiuwu Zhang, Linsheng Yang, Yonghua Li et al.* Impacts of lead/zinc mining and smelting on the environment and human health in China // Environmental Monitoring & Assessment. 2012. Vol. 184. P. 2261-2273. DOI: 10.1007/s10661-011-2115-6

19. *Jie Liang, Chunting Feng, Guangming Zeng et al.* Spatial distribution and source identification of heavy metals in surface soils in a typical coal mine city, Lianyuan, China // Environmental Pollution. 2017. Vol. 225. P. 681-690. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.03.057

20. *Csavina J., Field J., Taylor M.P. et al.* A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations // Science of the Total Environment. 2012. Vol. 433. P. 58-73. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.06.013

21. *Zhen Cheng, Jingkun Jiang, Fajardo O.A. et al.* Characteristics and health impacts of particulate matter pollution in China (2001-2011) // Atmospheric Environment. 2013. Vol. 65. P. 186-194. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.10.022

22. *Красавцева Е.А., Макаров Д.В., Максимова В.В. и др.* Результаты исследований свойств и состава хвостов обогащения лопаритовых руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 3. С. 190-198. DOI: 10.15372/FTPRPI20210318

23. *Горячев А.А., Красавцева Е.А., Лащук В.В. и др.* Оценка экологической опасности и возможности переработки хвостов обогащения лопаритовых руд // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 12. С. 46-51. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-12-46-51

24. *Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Савичев А.Н., Кисин А.Ю.* Редкоземельный состав апатита для целей фациального анализа и поисков особочистого кварца // Труды Института геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого. 2020. № 167. С. 122-128

25. *Taylor S.R., McLennan S.M.* The continental crust: its composition and evolution. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985. 312 p.

26. *Greenwood N.N., Earnshaw A.* Chemistry of the Elements. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. 1359 p.

27. *Котельникова А.Д., Рогова О.Б., Столбова В.В.* Лантаноиды в почве: поступление, содержание, влияние на растения, генотоксичность (обзор) // Почвоведение. 2021. № 1. С. 100-119. DOI: 10.31857/S0032180X21010056

28. *Hailong Tang, Xiaojing Wang, Weitao Shuai, Yangsheng Liu.* Immobilization of Rare Earth Elements of the Mine Tailings Using Phosphates and Lime // Procedia Environmental Sciences. 2016. Vol. 31. P. 255-263. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.02.034

29. *Bo Zhang, Chengjun Liu, Chunlong Li, Maofa Jiang.* A novel approach for recovery of rare earths and niobium from Bayan Obo tailings // Minerals Engineering. 2014. Vol. 65. P. 17-23. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.04.011

30. *Lim B., Alorro R.* Technospheric Mining of Mine Wastes: A Review of Applications and Challenges // Sustainable Chemistry. 2021. Vol. 2. Iss. 4. P. 686-706. DOI: 10.3390/suschem2040038

31. *Pan J., Vaziri Hassas B., Rezaee M. et al.* Recovery of rare earth elements from coal fly ash through sequential chemical roasting, water leaching, and acid leaching processes // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 284. № 124725. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124725

32. *Kuppusamy, V. K., Holuszko, M.* Sulfuric acid baking and water leaching of rare earth elements from coal tailings // Fuel. 2022. Vol. 319. № 123738. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123738

33. *Thi Thuy Nhi Nguyen, Man Seung Lee.* Purification of the Sodium Hydroxide Leaching Solution of Black Dross by Removal of Silicate (IV) with Polyacrylamide (PAM) // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2021. Vol. 42. Iss. 1. P. 9-16. DOI: 10.1080/08827508.2019.1657862

34. *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.

35. *Митрофанова Г.В., Черноусенко Е.В., Каменева Ю.С., Вишнякова И.Н.* Опробование комплексообразующего реагента на основе гидроксамовых кислот при флотации минералов переходных металлов // Вестник Кольского научного центра РАН. 2019. Т. 11. № 2. С. 95-104. DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2.95-104

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

36. *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.

37. *Marion C., Grammatikopoulos T., Rudinsky S. et al.* A mineralogical investigation into the pre-concentration of the Nechalacho deposit by gravity separation // Minerals Engineering. 2018. Vol. 121. P. 1-13. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.02.008

38. *Faris N., Ram R., Tardio J. et al.* Characterisation of a ferruginous rare earth bearing lateritic ore and implications for rare earth mineral processing // Minerals Engineering. 2019. Vol. 134. P. 23-36. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.01.019

39. *Черноусенко Е.В., Перункова Т.Н., Артемьев А.В., Митрофанова Г.В.* Совершенствование технологий флотационного обогащения руд Кольского полуострова // Горный журнал. 2020. № 9. С. 66-72. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.09

40. *Bochneva A., Lalomov A., LeBarge W.* Placer mineral deposits of Russian Arctic zone: Genetic prerequisites of formation and prospect of development of mineral resources // Ore Geology Reviews. 2021. Vol. 138. № 104349. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104349

41. *Huber M., Kamiński D., Czernel G., Kozlov E.* Optical and Spectroscopic Properties of Lorenzenite, Loparite, Perovskite, Titanite, Apatite, Carbonates from the Khibiny, Lovozero, Kovdor, and Afrikanda Alkaline Intrusion of Kola Peninsula (NE Fennoscandia) // Crystals. 2022. Vol. 12. Iss. 2. № 224. DOI: 10.3390/cryst12020224

42. *Deqian Li, Yong Zuo, Shulan Meng.* Separation of thorium(IV) and extracting rare earths from sulfuric and phosphoric acid solutions by solvent extraction method // Journal of Alloys and Compounds. 2004. Vol. 374. Iss. 1-2. P. 431-433. DOI: 10.1016/j.jallcom.2003.11.055

43. *García A.C., Latifi M., Amini A., Chaouki J.* Separation of Radioactive Elements from Rare Earth Element-Bearing Minerals // Metals. 2020. Vol. 10. Iss. 11. № 1524. DOI: 10.3390/met10111524

44. *Sarker S.K., Haque N., Bhuiyan M., Bruckard W., Pramanik B.K.* Recovery of strategically important critical minerals from mine tailings // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2022. Vol. 10. Iss. 3. № 107622. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107622

***Авторы*: В.В.Максимова,** *младший научный сотрудник, maksimova@ksc.ru, https://orcid.org/0000-0002-5080-5187* (*Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики КНЦ РАН, Апатиты, Россия*; *Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), **Е.А.Красавцева,** *младший научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-8821-4446* (*Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики КНЦ РАН, Апатиты, Россия*; *Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), **Е.Э.Савченко,** *научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-5639-1907* (*Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), **П.В.Икконен,** *инженер первой категории* (*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В.Тананаева КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), **И.Р.Елизарова,** *канд. техн. наук, заведующий центром, https://orcid.org/0000-0002-4975-1708* (*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), **В.А.Маслобоев,** *д-р техн. наук, главный научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-1536-921X* (*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), **Д.В.Макаров,** *д-р техн. наук, директор, https://orcid.org/0000-0001-8930-1288* (*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0