

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

2024

№ 4

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.17

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И СВОЙСТВ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЛОПАРИТОВЫХ РУД ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ “УМБОЗЕРО”

Е. А. Красавцева^{1,2}, В. В. Максимова^{1,2}

¹*Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности
Арктики Центра наноматериаловедения ФИЦ КНЦ РАН,*

E-mail: vandeleur2012@yandex.ru, г. Апатиты, Россия

²*Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН,
ул. Ферсмана, 14А, 184029, г. Апатиты, Россия*

Представлены результаты определения состава и свойств хвостов обогащения лопаритовых руд обогатительной фабрики “Умбозеро”, закрытой в 1999 г. В ходе исследования проведен отбор проб хвостов поверхностного слоя и с глубины методом “режущего кольца”. Исследованы инженерно-геологические характеристики, выполнен ситовой, химический, рентгенофазовый и радионуклидный анализ. Установлена неоднородность вещественного состава и свойств отходов обогащения. В минеральном составе хвостов преобладают нефелин и К, Na-полевые шпаты. Лопарит диагностирован методом рентгенофазового анализа в одной из четырех исследуемых областей хвостохранилища, с тенденцией к увеличению его содержания в тонкой фракции. Радионуклидный анализ определил радиево-ториевый характер радиоактивности исследуемых отходов обогащения.

Хвостохранилища, хвосты обогащения лопаритовых руд, инженерно-геологические свойства, вещественный состав, радиоактивность, рентгенофазовый анализ, лопарит

DOI: 10.15372/FTPPI20240410

EDN: OEAALJ

Значительные запасы редкометалльного сырья Кольского полуострова отличаются высокой долей нетрадиционных источников, в том числе отходов добычи и переработки апатит-нефелиновых и лопаритовых руд. Активная деятельность горнопромышленных предприятий привела к накоплению значительного объема техногенного сырья, складированного на открытых площадках, в том числе хвостохранилищах, отвалах горных и проходческих работ, промплощадках рудников, обогатительных фабрик, металлургических заводов.

Содержание редкоземельных металлов (РЗМ) в отходах обогащения может быть значительно ниже, чем в первичных источниках, таких как монацит, бастнезит, лопарит и подобные минералы, тем не менее их переработка имеет большое значение как с экономической, так и с экологической точки зрения [1]. Исследование горнопромышленных отходов, пригодных к эффективной перера-

ботке, является актуальной темой, поскольку разработка таких технологий позволит не только снижать экологический ущерб, наносимый территориям, но и увеличивать комплексность и срок использования месторождений редкоземельных металлов и существующих производств [2]. Более того, в связи с постепенным истощением традиционных ресурсов растет необходимость переработки низкосортных, труднообогатимых руд и отходов обогащения [3].

Современные исследования отмечают экологические преимущества переработки вторичных источников РЗМ по сравнению с разработкой первичного традиционного сырья [4, 5]. В зависимости от элементного состава отходов, хвостохранилища — значимые источники загрязнения окружающей среды с разными уровнями риска, требующими пристального внимания, мониторинга и разработки стратегий восстановления нарушенных территорий [6]. Эффективное извлечение ценных компонентов из техногенного сырья позволит снизить процессы миграции элементов в сопредельные среды. Низкое содержание РЗМ нивелируется огромным объемом накопленных отходов. Комплексная переработка отходов обогащения позволит не только сохранить качество природной среды в долгосрочной перспективе, но и диверсифицировать получаемые товарные продукты, что даст положительный экономический эффект [7].

Затраты на дробление и измельчение руд обычно составляют более половины затрат на обогащение [8], в то время как материал хвостохранилищ имеет диапазон размеров частиц, подходящий для последующей обработки и не требующий доизмельчения. Наличие тонкоизмельченных шламовых частиц вносит свои корректиры в схему переработки, так как может активно мигрировать в окружающую среду. С точки зрения инвестиционной привлекательности переработка горнопромышленных отходов в непосредственной близости от действующего предприятия также будет приводить к снижению затрат на транспортировку материала. Сокращение добычи и переработки первичных традиционных источников РЗМ в пользу инновационных технологий извлечения из вторичных источников — важный аспект формирования устойчивой горнодобывающей промышленности [7].

Несмотря на доступность основных коммерческих источников РЗМ, на территории Китая активно ведутся исследовательские работы по извлечению металлов из вторичных источников, в том числе горнопромышленных отходов и кислотных растворов с использованием различных катионных, анионных и сольватирующих растворителей [8, 9].

Получены перспективные результаты переработки сложного низкосортного сырья с высоким содержанием оксидов железа и силикатов [10]. Растет интерес исследователей к использованию микроорганизмов для извлечения РЗМ из различных типов отходов с применением биовыщелачивания [11]. Например, так используются материалы хвостохранилищ недействующих урановых рудников в Онтарио, Канада [12].

Анализ результатов перечисленных исследований показывает, что характеристики исходного материала, в основном минералогический и гранулометрический состав, являются одними из ключевых факторов для обогащения сложных низкосортных хвостов. Присутствие ассоциаций РЗМ с конкретными минералами может иметь как синергетическое, так и антагонистическое влияние на эффективность переработки [10].

Цель настоящей работы — исследование особенностей инженерно-геологических характеристик и вещественного состава хвостов обогащения лопаритовых руд, депонированных на хвостохранилище обогатительной фабрики “Умбозеро” в Мурманской области.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования служили хвосты обогащения лопаритовых руд, складированные на хвостохранилище ОФ “Умбозеро”. Хвостохранилище образовано в результате переработки комплексных редкометалльных руд Ловозерского щелочного массива и расположено в цен-

тральной части Мурманской области, вблизи горы Аллуайв, на расстоянии 20 км от оз. Умбозеро. Объект введен в эксплуатацию в 1984 г. В августе 1999 г. в массиве рудника произошел горно-тектонический удар магнитудой 4.0–4.4 [13]. (По данным других авторов, магнитуды составили 5.1). В результате произошло разрушение значительной части горных выработок; производство было остановлено и до настоящего момента не возобновлено. В 2009 г. все подземные выработки рудника “Умбозеро” затоплены шахтными водами. По причине остановки производства хвостохранилище переведено в разряд законсервированных. По сведениям Кадастра отходов горно-металлургического производства Мурманской области [14], на момент остановки производства масса накопленных хвостов составила 16 млн т на площади хвостохранилища 13.5 га.

Летом 2023 г. сотрудниками ИППЭС КНЦ РАН проведен отбор проб хвостов обогащения с поверхностного слоя 0–8 см ($n=36$) и глубины 0.3 м (30–38 см) методом “режущего кольца” (рис. 1). Точки отбора проб располагались на расстоянии \sim 1 м друг от друга.

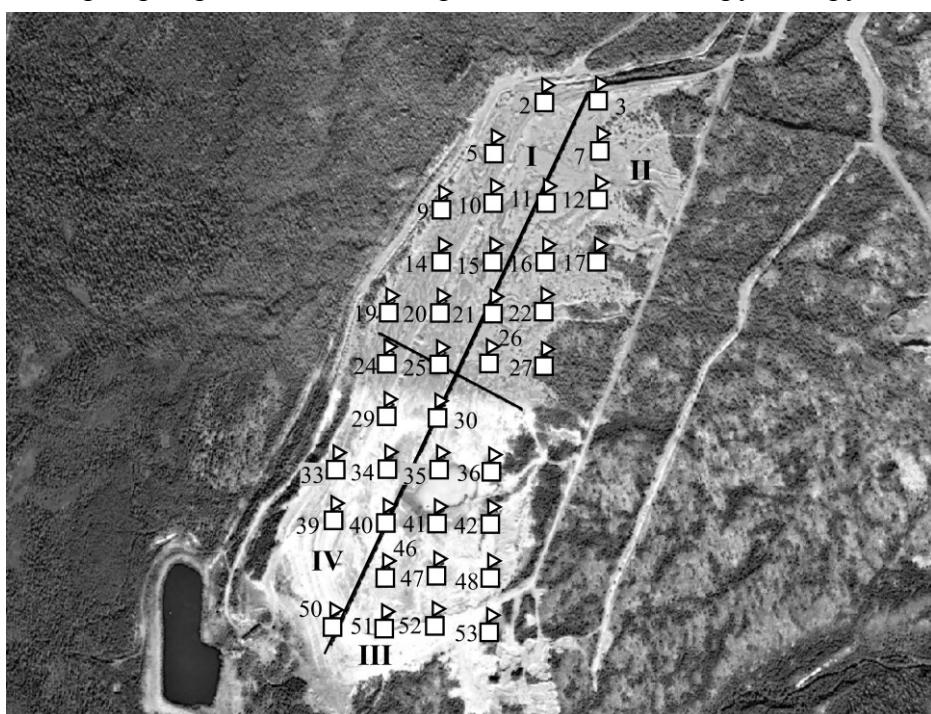


Рис. 1. Схема отбора проб хвостохранилища рудника “Умбозеро”

В лабораторных условиях для каждой из проб определяли инженерно-геологические характеристики хвостов обогащения: влажность, плотность, истинная плотность, пористость и коэффициент пористости в соответствии с ГОСТ 5180-84 [15]. Гранулометрический состав хвостов обогащения определяли с помощью ударного ситового анализатора AC200-У с использованием сит размером 1.0, 0.5, 0.25, 0.1, 0.05 мм и поддона.

Для последующих анализов пробы объединялись и усреднялись согласно схеме на рис. 1. Силикатный анализ хвостов обогащения выполняли в аккредитованных лабораториях ОАО “Кольский геологический информационно-лабораторный центр” по установленным методикам.

Поскольку в результате ранее проведенных исследований [16, 17] выявлено концентрирование лопарита в тонкой фракции (-0.071 мм) хвостов ОФ “Карнасурт”, повышенные относительно средней пробы содержания природных радионуклидов и прочее, на последующие анализы брали средние пробы и тонкодисперсный материал изучаемых хвостов.

Рентгенофазовый анализ (РФА) выполняли на дифрактометре Rigaku SmartLab Miniflex II в Центре коллективного пользования ФИЦ КНЦ РАН. Во всех измерениях использовали медный анод, излучение $\text{CuK}_{\alpha 1+2}$. Съемку образцов осуществляли при напряжении на рентгеновской трубке 40 кВ, токе 15 мА, углах отражения 2θ $3 - 70^\circ$ с шагом 0.02° , скорость съемки 3° / мин. Управление экспериментом, включая сбор данных, проводили с помощью программного обеспечения PDXL. Перед съемкой образец тщательно перетирали в агатовой ступке, полученный порошок помещали в стеклянную кювету. Фазовый анализ выполняли с использованием базы порошковых данных PDF-4. На основании количества совпадающих рефлексов и соотношения их интенсивностей определяли соответствующие соединения из базы данных. Количественный анализ проводили методом Ритвельда с использованием программного комплекса RietveldToThensor, а также международной базы структурных данных ICSD.

По аналогии с ранее проведенными исследованиями на радионуклидный анализ передавали усредненные образцы, а также фракции, разделенные на сите с размером ячеек 0.071 мм: -0.071 мм и $+0.071$ мм. Анализ выполняли в лаборатории Института химии ФИЦ КНЦ РАН с помощью сцинтилляционного γ -спектрометра с программным обеспечением “Прогресс” [18]. Значения удельных активностей ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K проб хвостов обогащения рассчитывали в соответствии с ГОСТ 30108-94 [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения влажности, плотности, истинной плотности, пористости и коэффициента пористости проб хвостов обогащения ОФ “Умбозеро” представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Инженерно-геологические характеристики хвостов обогащения ОФ “Умбозеро”

Параметр	Плотность	Влажность	Истинная плотность	Пористость	Коэффициент пористости
Слой 0 – 8 см	1.473 ± 0.01	4.73 ± 0.82	2.785 ± 0.01	49.40 ± 0.52	0.98 ± 0.02
Слой 30 – 38 см	1.398 ± 0.02	4.84 ± 0.82	2.792 ± 0.01	52.09 ± 0.91	1.11 ± 0.05

Примечание. Приведены средние значения \pm стандартная ошибка.

Сопоставление результатов исследования с полученными ранее для хвостов ОФ “Карнасурт” позволило выявить качественную схожесть определенных параметров [16]. Изученные пробы по величине коэффициента пористости варьируют от плотных грунтов до грунтов средней плотности согласно ГОСТ 25100-2011 [20]. В отличие от действующего хвостохранилища ООО “Ловозерский ГОК”, за длительное время депонирования отходов обогащения ОФ “Умбозеро” некоторые характеристики хвостов показали низкую вариабельность (коэффициент вариации значительно ниже 0.33), за исключением влажности. Методом радиальной экстраполяции в программе ArcGis 10 построена схема распределения влаги в материале хвостов (рис. 2).

Влажность проб, отобранных вблизи прудка в южной части хвостохранилища, была закономерно выше, чем у проб, отобранных в северной части и по периметру. Результаты ситового анализа (рис. 3) также оказались качественно схожи с полученными ранее [16, 17].

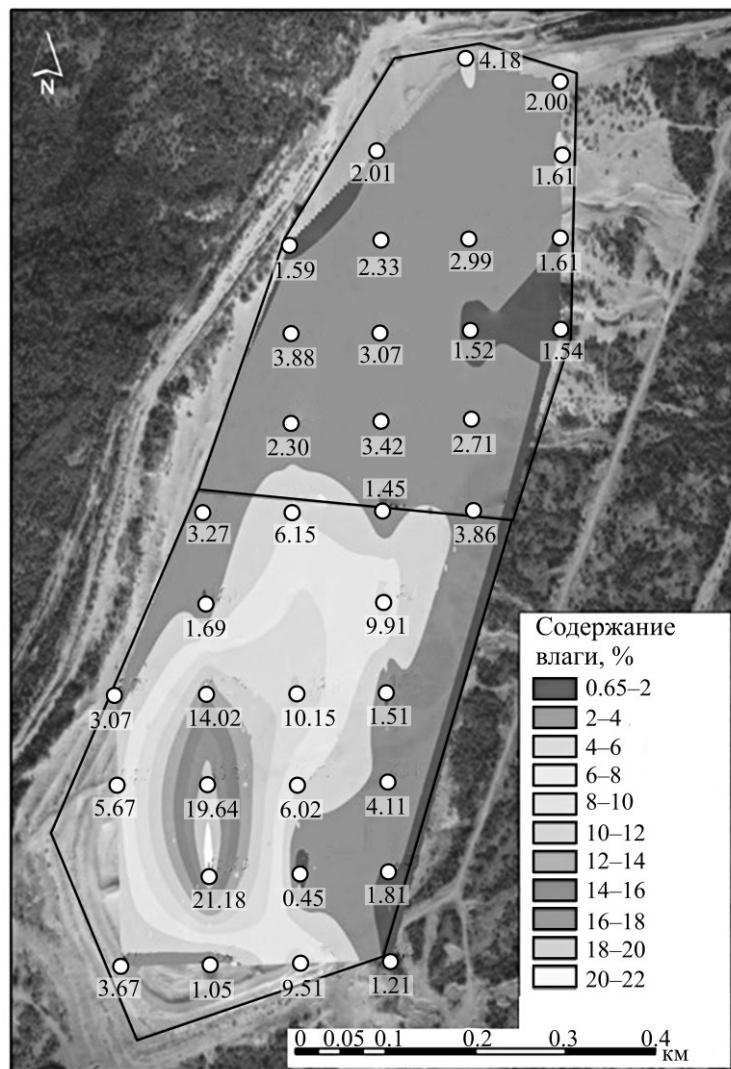


Рис. 2. Схема распределения влаги в хвостах обогащения

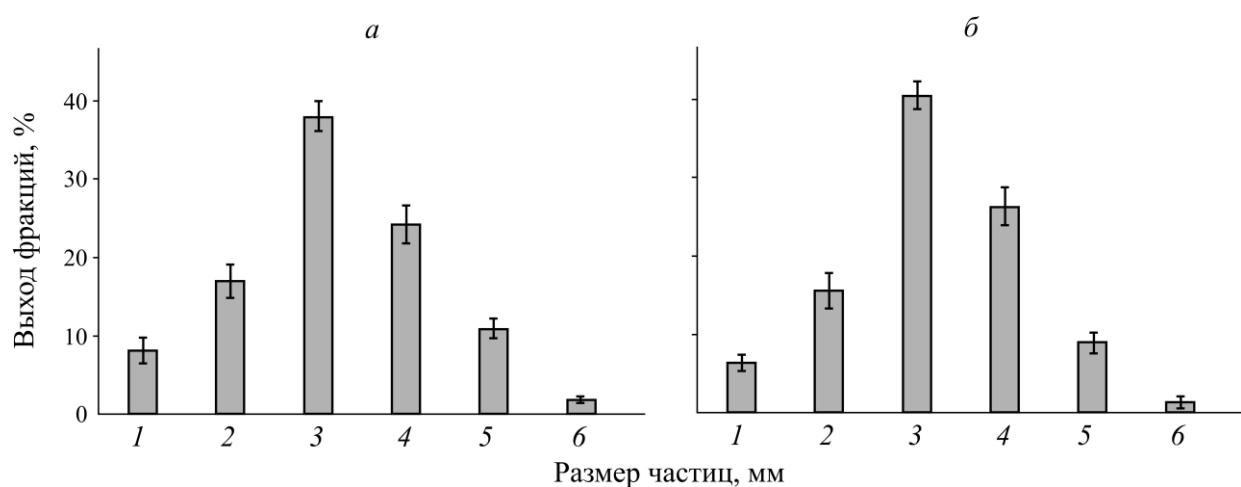


Рис. 3. Гранулометрический состав хвостов обогащения лопаритовых руд ОФ “Умбозеро”: а — слой 0–8 см, б — слой 30–38 см. Размер частиц, мм: –0.05 (1); –0.10+0.05 (2); –0.25+0.10 (3); –0.50+0.25 (4); –1.00+0.50 (5); > 1.00 (6)

Преобладающие фракции в пробах хвостов поверхностного слоя и на глубине 30 см: 0.10–0.25 и 0.25–0.50 мм, что позволяет отнести изучаемые отходы к мелко- и среднезернистым пескам [21]. Содержание в поверхностном слое хвостов крупных частиц размером более 1 мм не превышает 2 %, а потенциально пылящей фракции (–0.05 мм), при среднем содержании около 8 %, достигает 20 % в отдельных пробах. Коэффициент вариации выхода фракций превышает 0.33, что указывает на неоднородность содержания частиц определенного размера в материале хвостов.

В химическом составе хвостов обогащения ОФ “Умбозеро” преобладает кремний, алюминий и натрий (средние значения ± стандартная ошибка):

Элемент	Содержание, масс. %	Элемент	Содержание, масс. %
SiO ₂	54.47 ± 0.12	MgO	0.63 ± 0.04
TiO ₂	0.80 ± 0.02	K ₂ O	5.86 ± 0.11
Al ₂ O ₃	20.45 ± 0.14	Na ₂ O	9.71 ± 0.06
Fe ₂ O ₃	4.62 ± 0.10	P ₂ O ₅	0.04 ± 0.00
FeO	0.54 ± 0.02	SrO	0.10 ± 0.00
MnO	0.20 ± 0.00	F	0.05 ± 0.00
CaO	2.69 ± 0.02	S	0.03 ± 0.00

Сопоставляя результаты анализа с полученными ранее для лежальных хвостов хвостохранилища “Карнасурт” [16], можно отметить большее содержание SiO₂, CaO, K₂O, меньшее — Al₂O₃, Na₂O, SrO и F. Вероятно, выявленные особенности обусловлены некоторыми различиями в минеральном составе изучаемых отходов обогащения.

Результаты РФА — дифрактограммы усредненных проб (средняя проба и –0.071 мм) на примере области IV и рассчитанный минеральный состав хвостов обогащения — представлены на рис. 4 и в табл. 2.

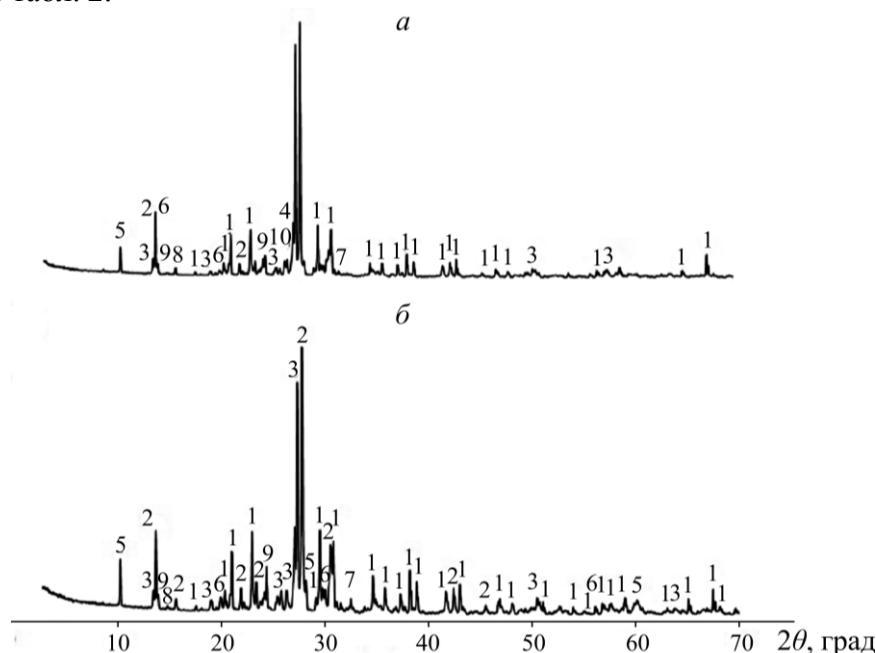


Рис. 4. Дифрактограммы хвостов обогащения: *а* — средняя проба; *б* — тонкая фракция –0.071 мм. Цифрами обозначены рефлексы минералов: 1 — нефелин; 2 — альбит; 3 — микроклин; 4 — андезит; 5 — арфведсонит; 6 — эгирин; 7 — лопарит; 8 — натролит; 9 — содалит; 10 — кварц

ТАБЛИЦА 2. Минеральный состав хвостов обогащения ОФ “Умбозеро”

Минерал	Содержание, %	
	Средняя проба	Тонкая фракция
Нефелин (Na,K)AlSiO ₄	40.80±1.10	38.32±1.70
Альбит NaAlSi ₃ O ₈	19.10±1.00	18.89±2.00
Микроклин K[AlSi ₃ O ₈]	23.14±0.40	21.01±0.33
Аннит KFe ₃ ²⁺ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	0.54±0.10	0.64±0.00
Арфведсонит NaNa ₂ (Fe ₄ ²⁺ Fe ³⁺)Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	3.73±0.10	5.46±0.40
Эгирина NaFe ³⁺ Si ₂ O ₆	7.15±0.10	9.90±1.00
Лопарит (Na,Ce,Sr)(Ce,Th)(Ti,Nb) ₂ O ₆	0.32	0.86
Натролит Na ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ ·2H ₂ O	2.61±0.20	2.98±0.20
Содалит Na ₄ Si ₃ Al ₃ O ₁₂ Cl	2.11±0.40	2.44±0.50
Кварц SiO ₂	0.99±0.30	0.33±0.00

Примечание. Приведены средние значения ± стандартная ошибка.

В минеральном составе хвостов обогащения ОФ “Умбозеро” преобладают нефелин и K, Na-полевые шпаты. В отличие от хвостов ОФ “Карнасурт”, методом РФА не диагностированы апатит, эвдиалит, но обнаружены другие минералы, преимущественно силикаты. Следует отметить, что лопарит обнаружен только в левом нижнем квадранте (IV). Вероятно, вследствие суффозионных процессов произошла миграция данного минерала в более глубокие слои хвостов, что указывает на необходимость опробования хвостохранилища с бурением шурфов и изучением кернов, отобранных с большей глубины.

Радионуклидный анализ выявил радиево-ториевый характер радиоактивности (табл. 3). В результате ранее проведенных исследований определены минералы-концентраторы урана и тория, присутствующие в рудах и вмещающих породах Хибинского массива с преемущественной концентрацией радиоактивных элементов в лопарите [22].

ТАБЛИЦА 3. Результаты радионуклидного анализа хвостов обогащения ОФ “Умбозеро”, Бк/кг

Проба	Удельная активность			$A_{\text{эфф}}$
	Ra-226	Th-232	K-40	
Средняя проба	70±22	152±23	1709±290	421±46
Тонкая фракция (-0.071 мм)	129±40	378±28	1473±226	752±61
Отсевянная фракция (+0.071 мм)	55±22	83±30	1770±236	322±51

Примечание. Приведены средние значения ± стандартная ошибка.

Эффективная удельная активность природных радионуклидов с учетом неопределенности измерений ($A_{\text{эфф}}$) в изученных пробах менее 1500 Бк/кг. В соответствии с СанПиН [23], данные пробы относятся к I категории отходов, обращение с которыми в производственных условиях, включая их сбор, временное хранение, переработку и транспортирование, осуществляется без ограничений по радиационному фактору. Также большая часть проб, а именно усредненные образцы и отсевянная фракция +0.071 мм, относится к I классу материалов, содержащих природные радионуклиды. Данная продукция может использоваться в производственных условиях

без ограничений по радиационному фактору. Вместе с тем, согласно НРБ-99/2009 [24], образцы относятся к стройматериалам II класса ($A_{\text{эфф}}$ более 370 Бк/кг). Данная продукция может применяться в дорожном строительстве в пределах территории населенных пунктов и зон перспективной застройки, а также при возведении производственных сооружений. При строительстве (реконструкции, капитальном ремонте) жилых и общественных зданий данные материалы допускается использовать только для наружной и внутренней облицовки зданий (керамическая и керамогранитная плитка, облицовочные изделия из природного и искусственного камня и т. п.).

Пробы крупностью – 0.071 мм с рассчитанными значениями $A_{\text{эфф}}$ выше 740 Бк/кг относятся к минеральному сырью и материалам II класса — с повышенным содержанием природных радионуклидов. Работы с данными материалами должны сопровождаться радиационным контролем: годовых эффективных доз облучения работников за счет природных источников излучения, $A_{\text{эфф}}$, материалов и изделий, готовой продукции, производственных отходов. В помещениях, где хранятся данные материалы, доступ посторонних лиц должен быть исключен, постоянные рабочие места должны располагаться на расстоянии, на котором мощность дозы не превышает 1 мкЗв/ч. Материалы, соответствующие тонкодисперсным пробам, допускается применять в дорожном строительстве за пределами населенных пунктов и зон перспективной застройки (III класс). Транспортирование материалов всех проб допускается всеми видами транспорта как безопасных грузов в радиационном отношении [23].

В сравнении с лежалыми хвостами обогащения хвостохранилища “Карнасурт” [16] и хвостами текущего производства [17], хвосты обогащения ОФ “Умбозеро” характеризуются меньшими значениями удельной радиоактивности, что может быть обусловлено использованием более эффективных технологических схем обогащения лопаритовой руды, применявшимся на фабрике.

Проведенное исследование подтвердило сложный состав хвостов обогащения с высоким содержанием силикатных минералов и эгирина. Для переработки данного вида отходов перспективно повышение качества сырья с помощью физических методов концентрирования, включая гравитационное, электромагнитное и электростатическое [25]. Использование концентрационных и вибростолов может быть полезным для получения предконцентратов РЗМ и удаления части силикатных минералов. При этом следует учитывать, что эффективность обработки на вибростолах будет уменьшаться по мере увеличения содержания шламистой части.

Даже при близком вещественном составе хвостов обогащения ОФ “Умбозеро” и Карнасуртского рудника оптимальные режимы их переработки будут различаться, как указано в [26], где отмечалось заметно худшее вскрытие умбозерских хвостов. Меньшая, чем у хвостов рудника “Карнасурт”, удельная радиоактивность снимает некоторые технологические ограничения, но стоит учитывать, что при дальнейшей гидрометаллургической переработке предконцентратов радионуклиды могут концентрироваться вместе с РЗМ в продуктивных растворах.

Для разделения хвостов на магнитную фракцию, содержащую эгирин и оксиды железа, и немагнитную, содержащую силикаты, перспективным представляется метод мокрой магнитной сепарации. При этом также важной задачей оптимизации физического концентрирования является обесшламливание хвостов.

Применение комбинированных схем обработки открывает широкие возможности для реализации комплексных и экологически безопасных технологий переработки отходов обогащения редкометалльных руд. Минералогические характеристики сырья и его гранулометрический состав, наряду с контрастностью физических свойств минералов, будут оказывать существенное влияние на параметры гравитационного разделения.

ВЫВОДЫ

Изучены характеристики отходов обогащения лопаритовых руд ОФ “Умбозеро”, складированные в хвостохранилище после закрытия производства более 20 лет назад. Результаты гранулометрического анализа отобранных проб свидетельствуют о значительной доле тонкодисперсного материала в составе хвостов, что может привести к затруднениям при разработке технологий переработки и рекультивационных мероприятий. Преобладание фракций менее 0.5 мм увеличивает вероятность пыления хвостов в сухую ветреную погоду. Наличие значительной доли шламовой фракции накладывает ограничение на применение оборудования для фильтрации и обогащения.

Результатами химического и минералогического исследования установлено преобладание в химическом составе хвостов кремния, алюминия и натрия. В минеральном составе хвостов обогащения ОФ “Умбозеро” преобладают нефелин и калий-натриевые полевые шпаты, что указывает на вероятность гипергенного изменения материала хвостов при открытом хранении. Определение РЗЭ-содержащих минералов, в том числе лопарита, апатита и эвдиалита, показало незначительное содержание этих минералов в средней пробе.

Радионуклидный анализ изученных проб свидетельствует о радиево-ториевой природе радиоактивности исследуемых отходов. Для тонкой фракции сырья коэффициент удельной радиоактивности повышен, что необходимо учитывать при оценке последствий пыления и разработке технологий биологической ремедиации хвостов. При выносе тонкой фракции за пределы хвостохранилища и взаимодействии с природными гуминовыми веществами почв ожидается накопление радиоактивных элементов в верхнем органогенном слое грунта.

Необходимость снижения экологического ущерба от открытого хранения хвостов обогащения и вовлечения техногенного сырья в переработку требует дальнейшего изучения объекта. Установленные особенности состава и свойств хвостов обогащения лопаритовых руд ОФ “Умбозеро” следует учитывать при разработке технологий переработки и природоохранных мероприятий в зоне влияния хвостохранилища.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИППЭС КНЦ РАН: А. А. Тимохину за помощь в отборе проб хвостов обогащения, Н. А. Ильиной за помощь в определении инженерно-геологических характеристик, О. Е. Поторочину за построение схемы в программе ArcGis; сотрудникам ИХТРЭМС КНЦ РАН: П. В. Икконену и В. В. Семушину за проведение радионуклидного анализа технологических проб хвостов; сотруднику ГИ КНЦ РАН М. Ю. Глазуновой за выполнение рентгенофазового анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aleksandrova T. N. Complex and deep processing of mineral raw materials of natural and technogenic origin: state and prospects, J. Min. Institute, 2022, Vol. 256. — P. 503 – 504.
2. Chanturia V. A., Nikolaev A. I., and Aleksandrova T. N. Innovative environmentally safe processes for the extraction of rare and rare-earth elements from complex ores of perplexed material composition, geology of ore deposits, 2023, Vol. 65. — P. 425 – 437.
3. Echeverry-Vargas L., and Ocampo-Carmona L. M. Recovery of rare earth elements from mining tailings: A case study for generating wealth from waste, Miner., 2022, Vol. 12, No. 8. — P. 948.

4. Hamilton J. L., Wilson S., Morgan B., Harrison A. L., Turvey C. C., Paterson D. J., Dipple G. M., and Southam G. Accelerating mineral carbonation in ultramafic mine tailings via direct CO₂ reaction and heap leaching with potential for base metal enrichment and recovery, Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 2020, Vol. 115, No. 2. — P. 303–323.
5. Abaka-Wood G. B., Addai-Mensah J., and Skinner W. The use of mining tailings as analog of rare earth elements resources: Part 1 – characterization and preliminary separation, Miner. Proc. and Extractive Metallurgy Review, 2022, Vol. 43, No. 6. — P. 701–715.
6. Agboola O., Babatunde D. E., Isaac Fayomi O. S., Sadiku E. R., Popoola P., Moropeng L., Yahaya A., and Mamudu O. A. A review on the impact of mining operation: Monitoring, assessment and management, Results in Eng., 2020, Vol. 8. — P. 100181.
7. Binnemans K., Jones P. T., Blanpain B., Van Gerven T., and Pontikes Y. Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: a critical review, J. Cleaner Production, 2015, Vol. 99. — P. 17–38.
8. Stanujkic D., Zavadskas E.K., Karabasevic D., Milanovic D., and Maksimovic M. An approach to solving complex decision-making problems based on IVIFNs: A case of comminution circuit design selection, Miner. Eng., 2019, Vol. 138. — P. 70–78.
9. Jha M. K., Kumari A., Panda R., Rajesh Kumar J., Yoo K., and Lee J. Y. Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals, Hydrometallurgy, 2016, Vol. 165. — P. 2–26.
10. Abaka-Wood G. B., Ehrig K., Addai-Mensah J., and Skinner W. Recovery of rare earth elements minerals from iron-oxide-silicate-rich tailings: Research review, Eng., 2022, Vol. 3, No. 2. — P. 259–275.
11. Kaksonen A. H., Lakaniemi A.-M., and Tuovinen O. H. Acid and ferric sulfate bioleaching of uranium ores: A review, J. Cleaner Production, 2020, Vol. 264. — P. 121586.
12. Reynier N., Gagné-Turcotte R., Coudert L., Costis S., Cameron R., and Blais J.-F. Bioleaching of uranium tailings as secondary sources for rare earth elements production, Miner., 2021, Vol. 11, No. 3. — P. 302.
13. Ловчиков А. В. Сильнейший горно-тектонический удар на подземных рудниках и в шахтах России: рудник “Умбозеро”, 17 августа 1999 года (магнитуда $m=5$, энергетический класс $k=11.8$). Апатиты: Изд-во КНЦ, 2022. — 127 с.
14. Кадастр отходов горно-металлургического производства Мурманской области (по состоянию на 01.01.2000 г.). Горный институт КНЦ РАН, Государственный комитет по охране окружающей среды Мурманской области. — Апатиты-Мурманск, 2000. — 104 с.
15. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.
16. 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.
17. Maksimova V. V., Krasavtseva E. A., Savchenko Y. E., Ikkonen P. V., Elizarova I. R., Masloboev V. A., and Makarov D. V. Study of the composition and properties of the beneficiation tailings of currently produced loparite ores, J. Min. Institute, 2022, Vol. 256. — P. 642–650.
18. Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного γ -спектрометра с программным обеспечением “ПРОГРЕСС”. Свидетельство № 40090.3Н700 от 22.12.2003. Менделеево, ГНМЦ ВНИИФТРИ. — 30 с.
19. ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов.
20. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация.
21. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. — Л.: Недра, 1984. — 511 с.

22. **Мелентьев Г. Б.** Естественная радиоактивность редкометалльно специализированного минерального сырья и урбанизированных территорий Карело-Кольского региона как фактор их радиоэкологической оценки // Тр. КНЦ РАН. — 2021. — № 2. — С. 27–43.
23. **СанПиН 2.6.1.2800-10.** Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения // Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: СанПиН 2.6.1.2800-10 // СПС “ГАРАНТ”.
24. **СанПиН 2.6.1.2523-09.** Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009.
25. Marion C., Grammatikopoulos T., Rudinsky S., Langlois R., Williams H., Chu P., Awais M., Gauvin R., Rowson N. A., and Waters K. E. A mineralogical investigation into the pre-concentration of the Nechalacho deposit by gravity separation, Miner. Eng., 2018, Vol. 121. — Р. 1–13.
26. **Калинников В. Т., Николаев А. И., Коцарь М. Л.** Нетрадиционное редкометалльное сырье Кольского полуострова: обоснование и перспективы его использования в технологии // ГИАБ. — 2007. — № 12 (12). — С. 13–23.

Поступила в редакцию 23/V 2024

После доработки 15/VI 2024

Принята к публикации 27/VI 2024