

ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622.17

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СВОЙСТВ И СОСТАВА ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЛОПАРИТОВЫХ РУД

Е. А. Красавцева^{1,2}, Д. В. Макаров², В. В. Максимова^{1,2},
Е. А. Селиванова³, П. В. Икконен⁴

¹Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики КНЦ РАН,
E-mail: e.krasavtseva@ksc.ru, ул. Ферсмана, 14, 184209, г. Апатиты, Россия

²Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН,
E-mail: makarov@inep.ksc.ru, ул. Ферсмана, 14а, 184209, г. Апатиты, Россия

³Геологический институт КНЦ РАН,
E-mail: selivanova@geoksc.apatity.ru, ул. Ферсмана, 14, 184209, г. Апатиты, Россия

⁴Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН,
E-mail: ikkonen.p@mail.ru, ул. Ферсмана, 26а, 184209, г. Апатиты, Россия

Исследованы инженерно-геологические свойства и вещественный состав хвостов обогащения лопаритовых руд, хранящихся на двух полях — действующем и выведенном из эксплуатации свыше тридцати лет назад. Изучена неоднородность вещественного состава и содержания ценных компонентов. Определено, что содержание легких редкоземельных элементов в тонкодисперсной фракции хвостов (-0.071 мм) превышает аналогичные значения для средних проб в полтора – два раза. На основании расчета эффективной удельной активности природных радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K исследованные пробы относятся к первой категории отходов, в то время как тонкодисперсный материал хвостов — ко второй.

Хвосты обогащения, инженерно-геологические свойства, вещественный состав, эффективная удельная активность, лопарит

DOI: 10.15372/FTPRI20210318

На территории Мурманской области расположены крупнейшие предприятия минерально-сырьевого комплекса. В регионе ежегодно складывается более 220 млн т отходов горного, обогатительного и металлургического производств [1]. Актуальной задачей как для Российской Федерации, так и для других стран является разработка и внедрение эффективных методов их переработки и снижения негативного воздействия на окружающую среду [2–4].

Единственное отечественное предприятие, производящее концентрат редкоземельных металлов цериевой группы, тантала и ниобия, находится в Мурманской области. Применяемая схема обогащения добываемой руды состоит из трех стадий: гравитационное разделение, флотационная очистка, электромагнитная сепарация. Первое поле хвостохранилища функционирует

вало с 1951 до 1985 г. Накопленный объем хвостов обогащения лопаритовых руд составил 6,7 млн т [5]. С 1985 г. в эксплуатацию ввели второе поле хвостохранилища, куда в настоящее время происходит сброс пульпы. Примерный объем отходов второго поля равен 11 млн т с ежегодным приращением 400–450 тыс. т.

Актуальность мониторинга за состоянием компонентов окружающей природной среды и внимание к хвостовым отвалам обусловлена повышенным радиационным фоном добываемого и перерабатываемого сырья. Добыча и переработка редкоземельного сырья — технически сложный многостадийный процесс, который сопровождается образованием значительного количества жидких и твердых отходов (пустой породы, хвостов, шламов и сточных вод) [6], а загрязненные территории нуждаются в последующей экологической реабилитации [7].

Негативными следствиями размещения отходов переработки являются физические нарушения ландшафта и загрязнение сопредельных сред. Карьеры и отвалы затрагивают обширные территории, особенно при проведении открытых горных работ. При этом количество пустой породы в карьерах обычно в несколько раз превышает количество добытой руды, значительные территории занимают хранилища отходов обогащения. Ущерб ландшафту сохраняется до тех пор, пока нарушенные участки не будут рекультивированы. На территориях вокруг хвостохранилищ происходит процесс загрязнения грунтов и водных объектов [8, 9]. Дезинтегрированные породы, смешанные с остатками реагентов, легко поддаются гипергенным и эрозионным процессам, приводящим к мобилизации металлов в частично или полностью биодоступных формах.

Гипергенез дезинтегрированного материала хвостов обогащения и пустой породы приводит к возникновению кислотного дренажа из отвалов и хвостохранилищ, ускорению мобилизации металлов и вторичному загрязнению территории с водными потоками. Наибольшую опасность для окружающей среды представляют мелкодисперсные хвосты обогащения [12]. Распространению химически активных тонкодисперсных частиц хвостов на значительные расстояния способствует пыление хвостохранилищ в летний период при возникновении неблагоприятных метеорологических условий [13].

Высокая концентрация водорастворимых редкоземельных элементов (РЗЭ) в почвах вредна для почвенных экосистем и может препятствовать росту растений [14, 15]. Они также могут накапливаться при попадании в организм, вдыхании и контакте с кожей, что приводит к хронической токсичности для клеток и увеличению рисков для здоровья [16, 17]. Способом снижения экологической нагрузки на экосистемы в зоне влияния горнодобывающих предприятий является вовлечение отходов производства в переработку.

Цель настоящей работы — исследование инженерно-геологических свойств, вещественного состава и радионуклидной характеристики материалов хвостов обогащения лопаритовых руд.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В 2020 г. сотрудниками ИППЭС КНЦ РАН проведен отбор проб хвостов обогащения с двух полей хвостохранилищ — выведенного из эксплуатации (первое поле) и намываемого (второе поле) в настоящее время. Отбор выполнен с поверхностного слоя и с глубины 0,3 м методом режущего кольца; в двух точках первого поля пробы отобраны также с глубины 1,5 м (рис. 1).

Инженерно-геологические характеристики определялись в соответствии с [18]. Минералогический и силикатный анализы отобранных проб осуществлялись в аккредитованных лабораториях Кольского геологического информационно-лабораторного центра. Качественный состав образцов контролировался методом порошковой рентгенографии на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2.0, излучение $\text{CuK}\alpha$. Для идентификации фаз использовалась база данных PDF2.

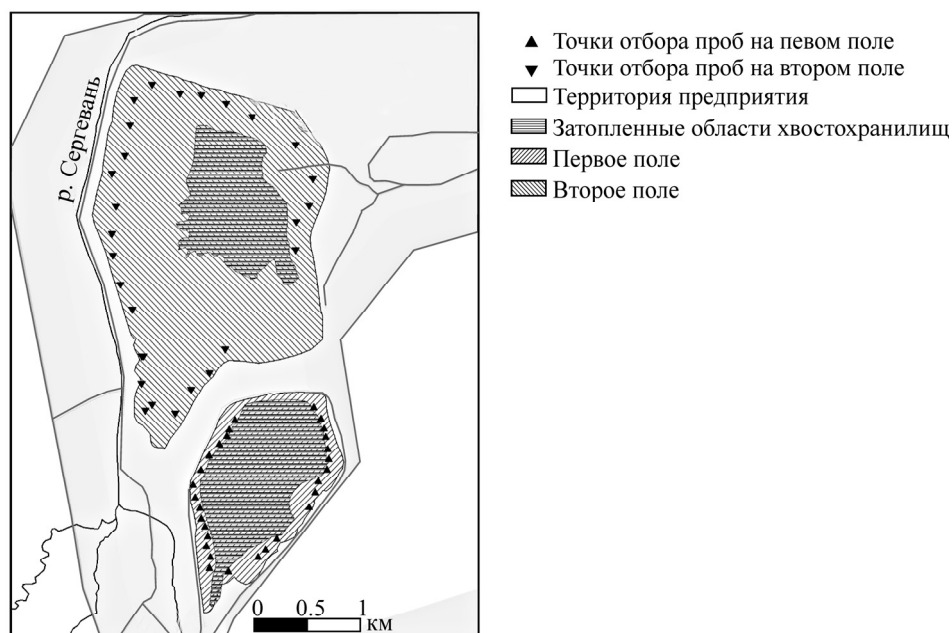


Рис. 1. Схема отбора проб хвостов обогащения лопаритовых руд

Валовые содержания элементов в пробах хвостов определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС, средство измерения ELAN 9000 (PerkinElmer, США)) на базе Центра коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН. Радионуклидный анализ отобранных проб проводился с помощью сцинтилляционного γ -спектрометра с программным обеспечением “Прогресс” [19, 20]. Значения удельных активностей ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K проб хвостов обогащения рассчитаны в соответствии с [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты ситового анализа и определения инженерно-геологических характеристик исследуемого материала приведены в табл. 1, 2.

ТАБЛИЦА 1. Гранулометрический состав хвостов обогащения лопаритовых руд

Размер частиц, мм	Первое поле	Второе поле
+1.0	1.4 ± 0.57	0.4 ± 0.21
–1.0+0.5	11.7 ± 2.95	6.8 ± 1.32
–0.5+0.25	24.9 ± 3.85	27.6 ± 3.06
–0.25+0.1	34 ± 3.53	47.8 ± 2.92
–0.1+0.05	17.4 ± 3.46	11.9 ± 1.87
–0.05	10.6 ± 3.15	5.5 ± 2.57

На основе результатов ситового анализа отобранных проб хвосты могут быть отнесены к мелко- и среднезернистым пескам [22]. Преобладающими фракциями для проб обоих полей являются $-0.5+0.25$ мм и $-0.25+0.1$ мм (табл. 1). В то же время выход фракций +1.0 и –0.1 мм для проб первого поля существенно превышает аналогичный показатель для хвостов второго поля. Коэффициент вариации почти для всех фракций выше 0.33, что указывает на неоднородность относительного содержания частиц данного размера в тех или иных пробах.

С учетом достаточно высокого содержания тонкодисперсных частиц при высыхании поверхности хвостохранилищ в летний период и быстрой потери влаги верхними слоями вследствие ветровой эрозии велика вероятность пыления хвостов. При этом постоянное увлажнение поверхности действующего хвостохранилища можно поддерживать, регулируя фронт намыва пульпы. Поверхность первого поля необходимо закреплять с использованием соответствующих реагентов либо рекультивировать.

Лежалые хвосты (первое поле) характеризуются достаточно высокой влажностью, что связано с временным заведением трубопровода с шахтными водами на первое поле в период строительства шандорного колодца. Среднее значение влажности текущих хвостов (второе поле) несколько ниже, однако вблизи точки разгрузки хвостовой пульпы данный параметр достигал 38 % (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Инженерно-геологические характеристики хвостов обогащения лопаритовых руд

Параметр	Первое поле	Второе поле
Плотность грунта в естественном залегании, г/см ³	1.7±0.06	1.7±0.07
Плотность сухого грунта, г/см ³	1.5±0.07	1.5±0.01
Истинная плотность, г/см ³	2.7±0.01	2.7±0.02
Пористость, %	45.8±1.22	44.5±0.86
Влажность грунта, %	15.4±2.01	9.7±2.13
Коэффициент пористости	0.9±0.09	0.8±0.02

Остальные параметры, в частности плотность грунта в естественном залегании, плотность сухого грунта, истинная плотность, пористость, не имеют значимых отличий для проб обоих полей в сравнении друг с другом. Отмечено закономерное увеличение плотности материала хвостов с ростом влажности (коэффициент корреляции достаточно высок — 0.6–0.8). Обратная корреляционная зависимость характерна для плотности и пористости, а соответственно, и коэффициента пористости — 0.93–0.98. По коэффициенту пористости ε пробы варьируют от плотных грунтов до грунтов средней плотности [23].

Результаты минералогического анализа отобранных проб хвостов обогащения представлены в табл. 3. Преобладающими минералами являются нефелин, полевой шпат, эгирин. Среднее содержание лопарита в хвостах обогащения составляет 0.63–0.94 %, эвдиалита — 0.01–0.09 %. С учетом накопленного объема отходов их можно рассматривать как техногенное месторождение. Установлено, что лопарит сосредоточен в тонкой (–0.071 мм) фракции хвостов обогащения.

ТАБЛИЦА 3. Минеральный состав хвостов обогащения лопаритовых руд, %

Минерал	Первое поле	Второе поле
Нефелин	59.17±0.41	57.93±0.76
Полевой шпат	18.10±2.03	18.76±0.21
Апатит	0.85±0.20	0.75±0.01
Лопарит	0.78±0.15	0.86±0.06
Эгирин	19.40±1.02	20.68±0.62
Диопсид	0.02±0.02	0.06±0.02
Содалит	1.39±0.18	0.27±0.11
Ломоносовит	0.15±0.02	0.18±0.03
Лампрофиллит	0.12±0.09	0.43±0.01
Эвдиалит	0.02±0.01	0.05±0.04
Пектолит	0	0.02±0.01

На рис. 2 представлена рентгенограмма средней пробы и фракции – 0.071 мм материала поверхностного слоя первого поля хвостохранилища. По данным РФА, образцы близки по составу, основные фазы в них: нефелин, микроклин, эгирин, альбит, содалит. Различия заключаются в содержании небольших примесей — натролита, анальцима. Так, на рентгенограмме (а) отмечен рефлекс при $2\theta = 32.5^\circ$, указывающий на присутствие лопарита, в то время как на рентгенограмме средней пробы он отсутствует.

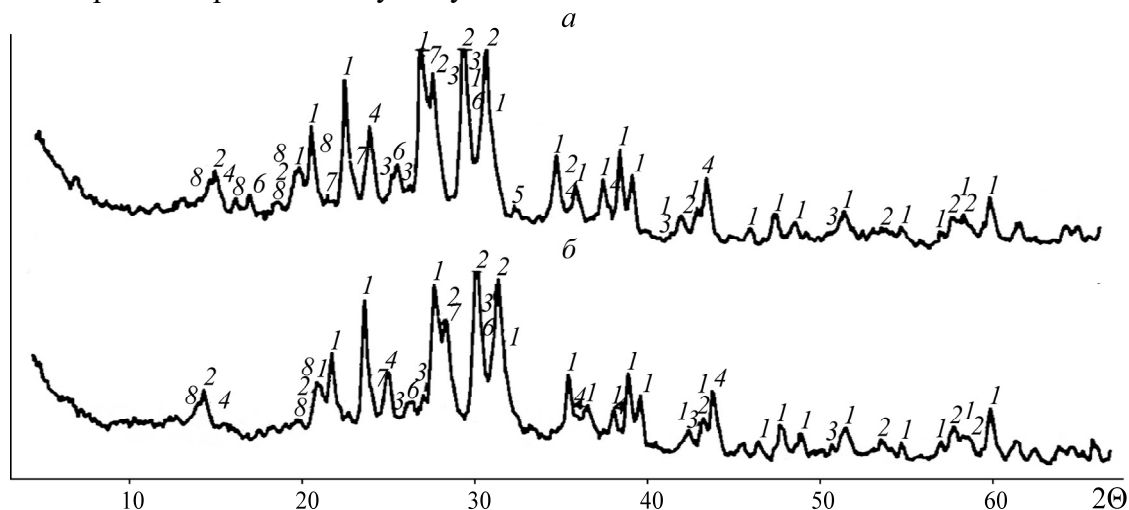


Рис. 2. Рентгенограммы проб хвостов: а — тонкая фракция, б — средняя проба. Рефлексы: 1 — нефелин; 2 — эгирин; 3 — микроклин; 4 — содалит; 5 — лопарит; 6 — анальцим; 7 — альбит; 8 — натролит

Усредненный химический состав:

- лежалые хвосты обогащения лопаритовых руд (первое поле), масс. %: SiO_2 — 48.255; TiO_2 — 0.975; Al_2O_3 — 23.085; Fe_2O_3 — 5.105; FeO — 0.59; MnO — 0.215; CaO — 1.48; MgO — 0.43; K_2O — 4.345; Na_2O — 13.475; P_2O_5 — 0.665; SrO — 0.285; F — 0.0745; SO_3 — 0.075;
- хвосты обогащения лопаритовых руд текущего производства (второе поле), масс. %: SiO_2 — 48.565; TiO_2 — 1; Al_2O_3 — 22.495; Fe_2O_3 — 5.425; FeO — 0.63; MnO — 0.235; CaO — 1.42; MgO — 0.405; K_2O — 4.37; Na_2O — 13.44; P_2O_5 — 0.67; SrO — 0.32; F — 0.074; SO_3 — 0.105.

Анализ на валовое содержание редкоземельных элементов проводился для средних проб хвостов и отделенной тонкой фракции. Значимых различий между образцами обоих полей не выявлено. Из редкоземельных элементов в составе хвостов преобладают церий, лантан и неодим, средние содержания которых составили 0.09, 0.02 и 0.01 % соответственно.

На рис. 3 показано распределение содержаний РЗЭ в хвостах обогащения лопаритовых руд первого поля в зависимости от крупности частиц.

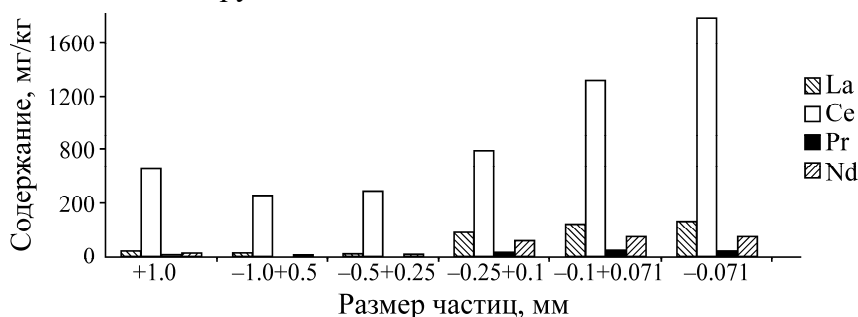


Рис. 3. Содержание редкоземельных элементов в материале хвостов обогащения в зависимости от размера частиц

Как видно, содержание РЗЭ цериевой группы в тонкой фракции превышает аналогичные показатели для средней пробы в 1.5–2 раза. Также для тонкодисперсных частиц характерны повышенные содержания цинка, стронция и марганца.

Радионуклидный анализ проводился для усредненных проб хвостов обогащения, а также для фракций +0.071 и –0.071 мм. Результаты представлены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Радиационные характеристики проб хвостов обогащения

Проба	Удельная активность, Бк/кг			$A_{\text{эфф}}$, Бк/кг	Класс строительного материала [24]	Класс минерального сырья [25]	Категория отходов [25]
	Ra-226	Th-232	K-40				
Первое поле							
0–8 см	110 ± 37	413 ± 73	891 ± 440	727 ± 172	II	I	I
0–8 см, +0.071 мм	102 ± 21	271 ± 24	989 ± 153	543 ± 40	II	I	I
0–8 см, –0.071 мм	223 ± 38	888 ± 55	901 ± 176	1459 ± 83	III	II	I
30–38 см	126 ± 38	318 ± 62	1186 ± 448	646 ± 159	II	I	I
30–38 см, +0.071 мм	90 ± 30	227 ± 27	1095 ± 200	483 ± 49	II	I	I
30–38 см, –0.071 мм	238 ± 16	938 ± 32	977 ± 283	1545 ± 50	IV	III	II
Второе поле							
0–8 см	143 ± 40	332 ± 63	1200 ± 452	683 ± 163	II	I	I
0–8 см, +0.071 мм	108 ± 32	287 ± 22	989 ± 222	570 ± 47	II	I	I
0–8 см, –0.071 мм	303 ± 34	1213 ± 47	1072 ± 196	1976 ± 72	IV	III	II
30–38 см	94 ± 35	383 ± 69	968 ± 412	679 ± 162	II	I	I
30–38 см, +0.071 мм	100 ± 24	240 ± 33	1011 ± 235	503 ± 53	II	I	I
30–38 см, –0.071 мм	327 ± 65	1072 ± 63	1040 ± 288	1814 ± 107	IV	III	II

Примечание. Значения удельных активностей и абсолютных погрешностей определения рассчитаны в соответствии с ГОСТ 30108-94. Жирным шрифтом выделены значения больше 1500 Бк/кг

Эффективная удельная активность $A_{\text{эфф}}$ большинства исследуемых проб как сырья для стройматериалов относится ко II классу, которые можно использовать в дорожном строительстве в пределах территории населенных пунктов и зон перспективной застройки, а также при возведении производственных сооружений. Строительные материалы III класса по $A_{\text{эфф}}$ — тонкая фракция поверхностного слоя первого поля — можно использовать в дорожном строительстве вне населенных пунктов [24]. Тонкодисперсные отходы, $A_{\text{эфф}}$ которых более 1500 Бк/кг, но менее 4000 Бк/кг, относятся к IV классу строительных материалов, вопрос о применении которых решается на основании санитарно-эпидемиологического заключения федерального органа исполнительной власти, уполномоченного осуществлять государственный санитарно-эпидемиологический надзор.

По результатам исследований хвосты, как усредненные пробы, так и пробы после отделения фракции –0.071 мм, можно отнести к минеральному сырью I класса. Тонкодисперсные пробы отвечают II и III классу и являются минеральным сырьем с повышенным содержанием природных радионуклидов. Согласно [25], обращение с минеральным сырьем и материалами (содержащими природные радионуклиды) I класса в производственных условиях осуществляется без ограничений по радиационному фактору. При обращении с минеральным сырьем II класса в производственных условиях должен проводиться радиационный контроль [26].

Установлено, что эффективная удельная активность природных радионуклидов в усредненных пробах хвостов обогащения лопаритовых руд фракции $+0.071$ мм для всех проб и фракции -0.071 мм пробы поверхностного слоя первого поля составляет менее 1500 Бк/кг, что позволяет отнести их к I категории отходов. Обращение с ними в производственных условиях выполняется без ограничений по радиационному фактору, они могут направляться в места захоронения промышленных отходов без ограничений по радиационному фактору. Остальные тонкодисперсные хвосты обогащения -0.071 мм относятся ко II категории отходов и должны направляться на специально выделенные участки в места захоронения промышленных отходов.

ВЫВОДЫ

Хвосты обогащения лопаритовых руд, отобранные на двух полях хвостохранилищ горно-промышленного предприятия, характеризуются преобладанием фракций -0.5 мм. Это указывает на вероятность возникновения пыления в условиях сухой ветреной погоды. Для решения этой проблемы на действующем поле возможно поддерживать постоянное увлажнение поверхности регулированием фронта намыва, а поверхностный слой лежалых хвостов необходимо закреплять с применением специальных реагентов либо рекультивировать.

По результатам химического анализа установлено, что содержание ценных компонентов во фракции -0.071 мм в 1.5 – 2 раза превышает содержание элементов в средней пробе. Поскольку хвосты могут представлять интерес как техногенное месторождение редкоземельных элементов, данные факты необходимо учитывать при разработке технологий его переработки.

На основании расчета удельных активностей ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K хвосты обогащения отнесены к первой категории отходов, строительным материалам II класса и I классу минерального сырья. Тонкодисперсные отходы (-0.071 мм) характеризуются повышенным расчетным значением эффективной удельной активности и относятся ко второй категории отходов, III и IV классам строительных материалов и II классу минерального сырья. Хвосты обогащения могут быть использованы в дорожном строительстве в пределах территории населенных пунктов и зон перспективной застройки, при возведении производственных сооружений.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИППЭС КНЦ РАН Н. А. Ильиной, А. В. Тимохину, А. А. Горячеву, Н. Л. Алфертьеву, А. В. Светлову за помощь в отборе проб и определении инженерно-геологических характеристик, а также руководителю аналитического центра коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН И. Р. Елизаровой за проведение анализов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2018 г. [Электронный ресурс] / Министерство природных ресурсов и экологии Мурманской области, 2019. <https://gov-murman.ru/region/environmentstate>.
2. Lottermoser B. G. Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes, Elements, 2011, Vol. 7, No. 6. — P. 405–410.
3. Lèbre É. and Corder G. Integrating industrial ecology thinking into the management of mining waste, Resources, 2015, Vol. 4. — P. 765–786.

4. **Lèbre É., Corder G. D., and Golev A.** Sustainable practices in the management of mining waste: A focus on the mineral resource, *Miner. Eng.*, 2017, Vol. 107. — P. 34–42.
5. **Месяц С. П., Остапенко С. П.** Методический подход к оценке интенсивности химического выветривания минерального сырья техногенных месторождений // *Вестн. МГТУ*. — 2013. — Т. 16. — № 3. — С. 566–572.
6. **Edahbi M., Plante B., and Benzaazoua M.** Environmental challenges and identification of the knowledge gaps associated with REE mine wastes management, *J. Cleaner Production*, 2019, No. 212. — P. 1232–1241. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.228.
7. **Ali S.** Social and Environmental Impact of the Rare Earth Industries, *Resources*, 2014, No. 3(1). — P. 123–134. DOI: 10.3390/resources3010123.
8. **Hu Z., Haneklaus S., Sparovek G., and Schnug E.** Rare earth elements in soils, *Communications in Soil Sci. and Plant Analysis*, 2006, Vol. 37, No. 9–10. — P. 1381–1420. DOI: 10.1080/00103620600628680.
9. **Tang H., Wang X., Shuai W., and Liu Y.** Immobilization of rare earth elements of the mine tailings using phosphates and lime, *Procedia Environmental Sci.*, 2016, No. 31. — P. 255–263. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.02.034.
10. **Charalampides G., Vatalis K., Karayannis V., and Baklavaridis A.** Environmental defects and economic impact on global market of rare earth metals, *IOP Conf. Series: Mater. Sci. and Eng.*, 2016, No. 161. — P.012069. DOI: 10.1088/1757-899X/161/1/012069.
11. **Светлов А. В., Припачкин П. В., Маслобоев В. А., Макаров Д. В.** Классификация некондиционных медно-никелевых руд и техногенных минеральных образований по их экологической опасности и пригодности к гидрометаллургической переработке // *ФТПРПИ*. — 2020. — № 2. — С. 128–136. DOI: 10.15372/FTPRPI202002015.
12. **Маслобоев В. А., Селезнев С. Г., Макаров Д. В., Светлов А. В.** Оценка экологической опасности хранения отходов добычи и переработки медно-никелевых руд // *ФТПРПИ*. — 2014. — № 3. — С. 138–153.
13. **Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Амосов П. В.** Результаты оценки интенсивности пыления хвостохранилищ // *Вестн. МГТУ*. — 2016. — Т. 19. — № 1. — С. 13–19. DOI:10.21443/1560-9278-2016-1/1-13-19.
14. **Li S. J., Dou S., Wang L. M., and Liu Z. S.** Geochemical characteristics of rare earth elements on sunflower growing area in the west of Jilin province, *J. Environ. Sci., China*, 2011, No. 32(7). — P. 2081–2086.
15. **Thomas P. J., Carpenter D., Boutin C., and Allison J. E.** Rare earth elements (REEs): effects on germination and growth of selected crop and native plant species, *Chemosphere*, 2014, Vol. 96, No. 2. — P. 57–66.
16. **Wei B., Li Y., Li H., Yu J., Ye B., and Liang T.** Rare earth elements in human hair from a mining area of China, *Ecotox. Environ. Safe*, 2013, Vol. 96, No. 4. — P. 118–123.
17. **Oliveira M. S., Duarte I. M., Paiva A. V., Yunes S. N., Almeida C. E., Mattos R. C., Sarcinelli P. N.** The role of chemical interactions between thorium, cerium, and lanthanum in lymphocyte toxicity, *Arch. Environ. Occup. H.*, 2014, Vol. 69, No. 1. — P. 40–45.
18. **ГОСТ 5180-84.** Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. — Введ. 01.07.85.
19. **Методика** измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного γ -спектрометра с программным обеспечением “ПРОГРЕСС”. Свид. № 40090.3Н700 от 22.12.2003. Менделеево, ГНМЦ ВНИИФТРИ. — 30 с.

20. **Методические рекомендации** по приготовлению счетных образцов для спектрометрических комплексов с программным обеспечением “ПРОГРЕСС”. Разработана Центром метрологии ионизирующих излучений ВНИИФТРИ, ООО “НТЦ Амплитуда”. — М., Зеленоград, 2008. — 17 с.
21. **ГОСТ 30108-94.** Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов. — Введ. 01.01.1995. — 11 с.
22. **Ломтадзе В. Д.** Инженерная геология. Инженерная петрология. — Л.: Недра, 1984. — 511 с.
23. **ГОСТ 25100-2011.** Грунты. Классификация. — М.: Стандартиформ, 2013. — 38 с.
24. **СанПиН 2.6.1.2523-09.** Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009.
25. **СанПиН 2.6.1.2800-10.** Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения / СПС “ГАРАНТ”.
26. **СП 2.6.1.2612-10.** Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010).

Поступила в редакцию 22/XII 2020

После доработки 31/III 2021

Принята к публикации 24/V 2021