

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОНКОЙ ФРАКЦИИ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЛОПАРИТОВЫХ РУД С ПОЧВЕННЫМИ ВОДАМИ

^{1,2}Е.А. Красавцева, ^{1,2}В.В. Максимова, ¹В.А. Маслобоев,
¹Д.В. Макаров, ¹Т.Т. Горбачева

¹Институт проблем промышленной экологии Севера Кольский научный центр РАН, г. Апатиты,

²Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики
Федеральный исследовательский центр Кольский научный центр РАН, г. Апатиты

Представлены результаты моделирования взаимодействия тонкой фракции хвостов обогащения (-0,071 мм) лопаритовых руд с растворами, имитирующими почвенные воды, с разным содержанием органического углерода. Установлено, что внесение растворённого органического вещества интенсифицирует процесс перехода редких и цветных металлов в растворимые формы. При этом концентрации загрязняющих веществ в растворах по истечении пяти часов взаимодействия превышают предельно допустимые для водных объектов рыбохозяйственного значения в несколько раз. Методом фитотестирования определено, что в отличие от общей пробы хвостов обогащения, водная вытяжка тонкой фракции оказывает токсическое влияние на рост и развитие высших растений. Результаты исследований свидетельствуют об экологической опасности тонкой фракции хвостов обогащения лопаритовых руд вследствие попадания минеральных частиц в почву и их взаимодействия с почвенными водами.

Ключевые слова: хвосты обогащения, экологическая опасность, растворенное органическое вещество, фитотестирование

Статья поступила в редакцию 28.09.2020, доработана 23.10.2020, принята к публикации 25.12.2020

Modeling the Interaction of the Fine Fraction of Loparite Ore Mill Tailings with Soil Waters

^{1,2}E.A. Krasavtseva, ^{1,2}V.V. Maximova, ¹V.A. Masloboyev, ¹D.V. Makarov, ¹T.T. Gorbacheva

¹Institute of North Industrial Ecology Problems, "Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", 184209 Apatity, Russia,

²Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic of the Federal Research Centre "Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", 184209 Apatity, Russia

The results of modeling of the interaction of the fine fraction of loparite ore mill tailings (-0.071 mm) with solutions simulating soil waters, with different contents of organic carbon, are presented. It was found that the introduction of dissolved organic matter intensifies the process of transition of rare and non-ferrous metals into soluble forms. At the same time, the concentrations of pollutants in solutions after five hours of interaction exceed the maximum permissible concentrations for the objects of commercial fishing importance several times. Phytotesting method determined that, in contrast to the general sample of mill tailings, the water extract of the fine fraction has a toxic effect on the growth and development of higher plants. The research results indicate the environmental hazard of the fine fraction of the loparite ore mill tailings due to the ingress of mineral particles into the soil and their interaction with soil waters.

Keywords: tailings, environmental hazard, dissolved organic matter, phytotesting

Received 28.09.2020, revised 23.10.2020, accepted for publication 25.12.2020

DOI: 10.18412/1816-0395-2021-4-28-33

Мурманская область характеризуется преобладающим вкладом отходов предприятий горнопромышленного комплекса в общий объем отходов производства и потребления. Размещение хвостов обогащения, вскрышных и проходческих пород приводит к целому комплексу долговременных последствий для природных сред. В толще хвостохранилищ непрерывно происходят процессы химического взаимодействия веществ хвостов с атмосферными и фильтрующимися оборотными водами, что приводит к рассеянию в окружающую среду загрязняющих веществ. Дробление и измельчение руды перед обогащением и, как следствие, на-

личие мелкой фракции в хвостах приводит к целому комплексу специфических последствий [1, 2]. Тонкодисперсный материал хвостов обладает высокой удельной поверхностью, следовательно, должен активнее взаимодействовать с промывающими растворами. Наличие тонкой фракции, обладающей сравнительно небольшой насыпной плотностью частиц, часто приводит к пылению хвостохранилищ в летний период. В частности, это характерно для хвостохранилища АНОФ-2 Кировского филиала АО "Апатит" в Мурманской области [3]. При большей удельной плотности частиц тонкой фракции происходит легкая миграция с растворами, фильтрующимися через хвостохранилище, в сопредельные среды. Активная миграция загрязняющих веществ приводит к деградации ландшафтов, ухудшению качества почв и водоемов и оказывает негативное воздействие на качество жизни и здоровье населения Мурманской области, проживающего в непосредственной близости от предприятий горнопромышленного комплекса (ГПК).

При рассмотрении хранилищ отходов ГПК как источника загрязнения окружающей природной среды на первый план выходят токсичность веществ, поступающих из хвостохранилища в сопредельные среды, для биоты; взаимодействие с компонентами природных сред и интенсивность миграции загрязнителей. При ветровом переносе пылеватых частиц и миграции загрязняющих веществ с водными потоками и химическом выветривании наблюдается взаимодействие с атмосферными осадками и с почвенными органосодержащими растворами. Это происходит вследствие геомиграционных процессов при проникновении в более глубокие горизонты почв и при нарастании отвалов и хвосто-



Рис. 1. Фитотестирование водной вытяжки тонкой фракции хвостов (Овес посевной *Avena sativa*)

Fig. 1. Phytotesting of a water extract of the tailing fine fraction (*Avena sativa* oat)

хранилищ первичными сукцессиями.

Растворенное органическое вещество оказывает существенное влияние на миграционную способность химических соединений за счет вовлечения в широкий ряд физических, химических и биохимических процессов [4]. Гуминовые кислоты и фульвокислоты как часть растворенного органического вещества участвуют в комплексообразовании, ионных, молекулярных и окислительно-восстановительных процессах, влияют на транспорт металлов в водных и почвенных системах, вступают в реакции с широким спектром соединений. При взаимодействии с экотоксикантами, в частности с тяжелыми металлами, характерным процессом является образование органо-минеральных соединений [5]. Сложный комплекс взаимодействий растворов органических кислот природного происхождения с тонкими фракциями хвостов обогащения и добычи руд интересен с точки зрения влияния на мобильность загрязняющих веществ, увеличения их подвижности либо фиксации загрязнителей в почвах.

Цель данной работы — изучение влияния растворенного органического вещества почв на интенсивность перехода экологически опасных элементов в подвижные формы.

Объекты и методы

В лабораторных условиях было проведено моделирование взаимодействия тонкой фракции хвостов с модельными растворами, имитирующими почвенные воды. В качестве объекта исследования выбраны хвосты обогащения лопаритовых руд текущего производства ООО "Ловозерский ГОК". Товарный продукт, получаемый на предприятии (лопаритовый концентрат), представляет собой комплексное сырье для дальнейшего производства: тантала, ниобия, цериевой группы редких земель и титана [6].

По результатам минералогического анализа хвостов обогащения (фракция $-0,25$ мм), проведенного в ОАО "Кольский геологический информационно-лабораторный центр", хвосты представлены следующими минералами, %: нефелин $((Na,K)AlSi_3O_8)$ — 67,01; полевошпат $((Na,K)AlSi_3O_8)$ — 18,49; эгирин $(NaFe^{3+}(Si_2O_6))$ — 11,91; эвдиалит $(Na_4(CaCeFeMn)_2ZrSi_6O_{17}(OHCl)_2)$ — 0,63; апатит $(Ca_{10}(PO_4)_6(OH,F,Cl)_2)$ — 0,36; лопарит $((Na,Ce,Ca,Sr,Th)(Ti,Nb,Fe)O_3)$ — 0,27. Результаты ситового анализа хвостов обогащения лопаритовых руд показали большое содержание тонкой фракции ($-0,071$ мм) — порядка 12 % общей массы хвостов [7].

В качестве источника водорастворимого органического

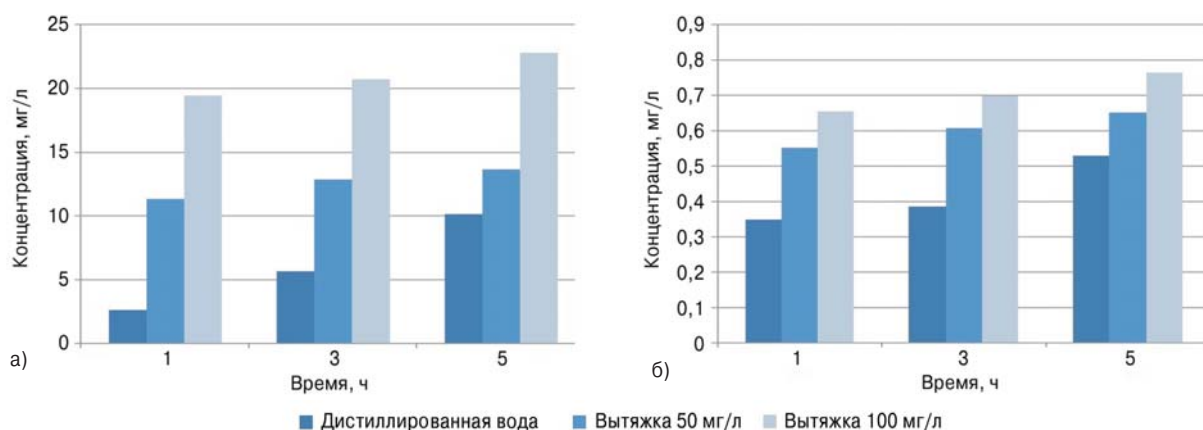


Рис. 2. Концентрация кремния (а) и алюминия (б) в исследуемых растворах после взаимодействия с хвостами обогащения лопаритовых руд (1, 3, 5 ч) в дистиллированной воде и вытяжках 50 и 100 мг/л

Fig. 2. Concentration of silicon (a) and aluminum (b) in the test solutions after interaction with the concentration tailings of loparite ores (1, 3, 5 h) in distilled water and extracts 50 and 100 mg/L

вещества использовали фрезерный торф верхового типа (ГОСТ Р 52067-2003). Водную вытяжку приготавливали при соотношении Т:Ж 1:1,5 (1) и 1:3 (2) в течение 24 ч, полученный раствор фильтровали через двойной бумажный фильтр "синяя лента". Содержание органического углерода в вытяжках составило порядка 100 мг/л (1) и 50 мг/л (2). В полученные растворы вносили навески хвостов обогащения лопаритовых руд (фракция -0,071 мм) в соотношении Т:Ж 1:10. Для оценки миграции элементов в отсутствие органического вещества проводили аналогичную серию экспериментов с дистиллированной водой. Время взаимодействия составляло 1, 3, 5 ч при непрерывном перемешивании. Полученные растворы фильтровали через мембранный фильтр марки "Влади-

пор" типа МФАС-ОС-2 и передавали на количественный химический анализ.

Для интегральной оценки токсичности хвостов текущего производства применялся метод фитотестирования [8]. Исследовали влияние водной вытяжки средней пробы и тонкой фракции хвостов обогащения на рост и развитие высших растений. За основу взята методика "Фитотест", позволяющая экспериментально определять класс опасности отходов производства. В качестве тест-культур были выбраны семена однокольных (овёс посевной *Avena sativa*) и двудольных (кресс-салат *Lepidium sativum*) растений. В чашки Петри помещали листы фильтровальной бумаги, смоченные водными вытяжками исследуемых хвостов, контролем выступала дистиллированная

вода. Время экспозиции составило 7 сут (рис. 1).

Токсическое действие отхода считается доказанным, если тест-функция — длина корней проростков по отношению к контролю — угнетение роста корней превышает 20 %.

Экспериментальная часть

На основе данных количественного химического анализа построены диаграммы, иллюстрирующие влияние количества внесенного растворенного органического вещества (0, 50 и 100 мг $C_{\text{общ}}/\text{л}$) на содержание химических элементов в результирующих растворах.

Интенсивность разрушения минеральной матрицы материала хвостов. Преимущественно материал хвостов представлен минералами класса калиево-натриевых силикатов (нефе-

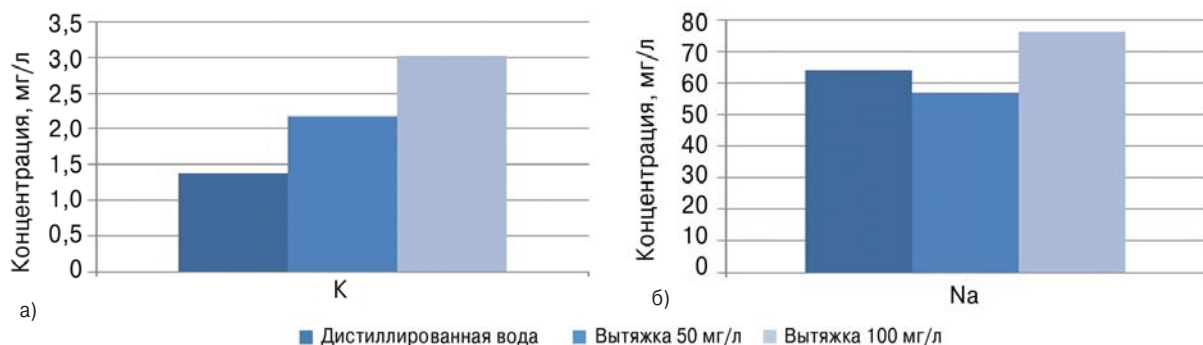


Рис. 3. Концентрация ионов калия (а) и натрия (б) в исследуемых растворах после пяти часов взаимодействия с хвостами обогащения лопаритовых руд в дистиллированной воде и вытяжках 50 и 100 мг/л

Fig. 3. Concentration of potassium (a) and sodium (b) ions in the test solutions after five hours of interaction with the concentration tailings of loparite ores in distilled water and extracts of 50 and 100 mg/l

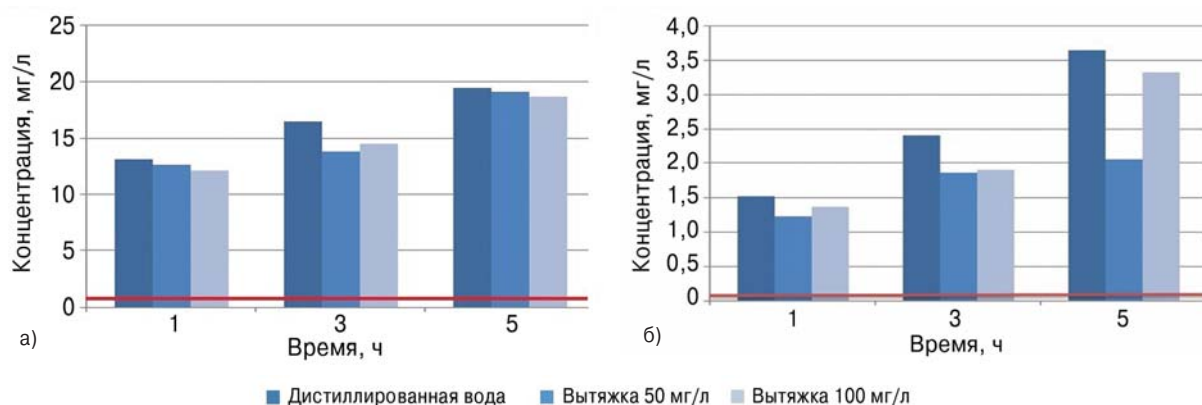


Рис. 4. Концентрация фтор-иона (а) и фосфат-иона (б) в исследуемых растворах после взаимодействия с хвостами обогащения лопаритовых руд (1, 3, 5 ч) в дистиллированной воде и вытяжках 50 и 100 мг/л (линией обозначен уровень ПДК_{рбхз} – 0,75 мг/л и 0,05 мгР/л соответственно)

Fig. 4. The concentration of fluorine ion (a) and phosphate ion (b) in the test solutions after interaction with the concentration tailings of loparite ores (1, 3, 5 h) in distilled water and extracts of 50 and 100 mg/L (the line indicates the level of MPC_{rbhz} – 0.75 mg/L and 0.05 mgP/L, respectively)

лин, полевые шпаты), соответственно изменение концентраций Si, Al, K, Na в результирующем растворе иллюстрирует ускорение разрушения минеральной матрицы при добавлении органического вещества (рис. 2).

Характер изменения концентраций натрия и калия после пяти часов взаимодействия (рис. 3) свидетельствует о том, что растворение минералов происходит неравномерно с преимущественным переходом в раствор натрия.

Для алюминия и кремния, входящих в состав нефелина и полевых шпатов, характерен рост концентраций в исследуемых растворах:

в меньшей степени это характерно для алюминия, в большей — для кремния. Увеличение концентрации органического вещества до 100 мг/л несколько снижает интенсивность роста содержания Al и Si по сравнению с $C_{общ}$ — 50 мг/л, что может быть обусловлено блокированием части поверхности зерен минералов за счет адсорбции гуминовых кислот.

На рис. 4 представлены концентрации фторидов и фосфатов в результирующих растворах. Наблюдается значительное превышение уровня ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

Концентрация фтора с увеличением времени взаимодействия возрастает во всех рассматриваемых растворах, причём количество внесённого органического вещества не оказывает существенного влияния. Зафиксирован резкий рост концентрации F — после одного часа взаимодействия, затем — незначительный. Характер изменения концентрации фосфат-ионов во всех рассматриваемых растворах качественно схож.

На рис. 5, 6 представлено изменение концентраций тяжёлых металлов в растворе на примере Cu, Ni, Zn, Pb.

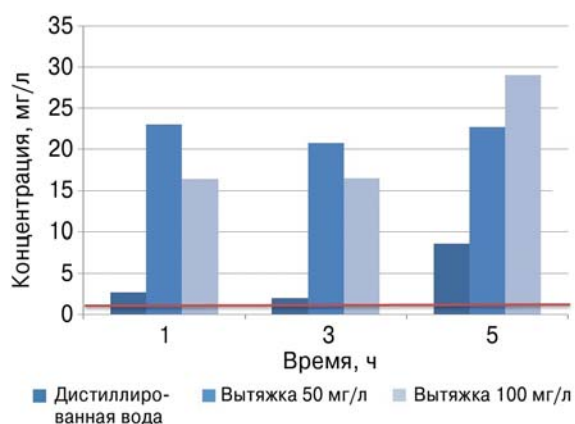


Рис. 5. Концентрация ионов меди в исследуемых растворах после взаимодействия (1, 3, 5 ч) в дистиллированной воде и вытяжках 50 и 100 мг/л (линией обозначен уровень ПДК_{рбхз} – 0,001 мг/л)

Fig. 5. The concentration of copper ions in the test solutions after interaction (1, 3, 5 h) in distilled water and extracts of 50 and 100 mg/L (the line indicates the level of MPC_{rbhz} – 0.001 mg/L)

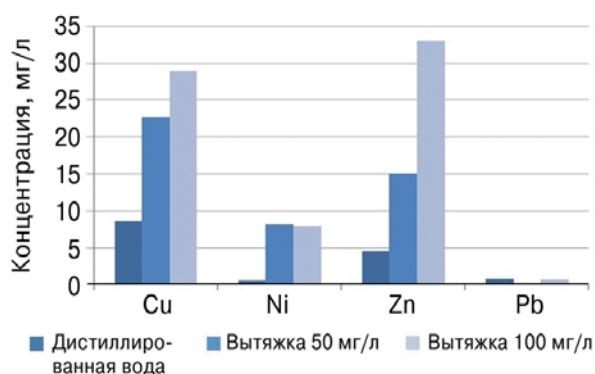


Рис. 6. Концентрация ионов меди, никеля, цинка и свинца в исследуемых растворах после пяти часов взаимодействия с хвостами обогащения лопаритовых руд в дистиллированной воде и вытяжках 50 и 100 мг/л

Fig. 6. Concentration of copper, nickel, zinc and lead ions in the test solutions after five hours of interaction with the concentration tailings of loparite ores in distilled water and extracts of 50 and 100 mg/L

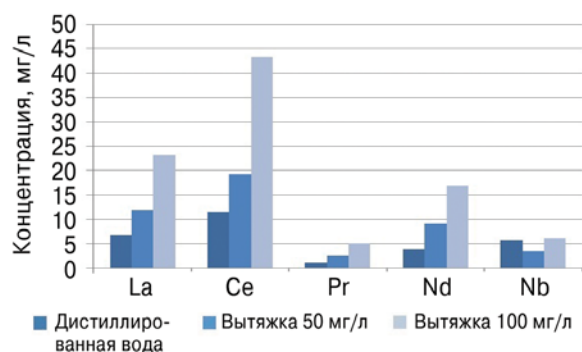


Рис. 7. Концентрация редкоземельных элементов в исследуемых растворах после 5 ч взаимодействия с хвостами обогащения лопаритовых руд в дистиллированной воде и вытяжках 50 и 100 мг/л

Fig. 7. The concentration of rare earth elements in the test solutions after five hours of interaction with the concentration tailings of loparite ores in distilled water and extracts of 50 and 100 mg/l

В водной вытяжке с содержанием $C_{\text{общ}} = 50$ мг/л отмечено ускорение перехода металлов в раствор, в частности для меди и цинка, обусловленное образованием растворимых комплексов. Динамика изменения концентраций ТМ в растворе с содержанием $C_{\text{общ}} = 100$ мг/л предположительно объясняется тем, что возрастающая ионная сила раствора препятствует комплексообразованию [4]. Концентрации цинка и меди в результирующих растворах после пяти часов взаимодействия многократно превышают предельно допустимые для рыбохозяйствен-

ных водоёмов: в 3,3 и в 29 раз соответственно; по никелю и свинцу превышение выявлено не было.

Концентрации редкоземельных элементов в растворе. Влияние водорастворимого органического вещества на переход РЗМ в раствор представлено на рис. 7. Внесение органики приводит к увеличению интенсивности перехода РЗМ в раствор, предположительно, за счёт действия фульвокислот, в течение первого часа взаимодействия пропорционально

количеству растворённого органического вещества. Процесс идёт интенсивнее для лантана, церия, неодима. Затем для большинства рассматриваемых элементов характерно снижение концентраций в связи с образованием комплексных соединений с гуминовыми веществами, что соотносится с литературными данными [9, 10].

Результаты фитотестирования водных вытяжек средней пробы и тонкодисперсных хвостов обогащения лопаритовых руд представлены в таблице. Как видно, токсическое действие (эффект торможения) оказывает натив-

ный экстракт тонкой фракции хвостов. Более чувствительным оказался овёс посевной *Аvena sativa*. Проведённое ранее фитотестирование усреднённой пробы хвостов эффекта торможения не выявило, что экспериментально подтверждает V класс опасности данных отходов [11].

Заключение

Таким образом, результаты проведенных в статических условиях экспериментов свидетельствуют о потенциальной экологической опасности хвостов обогащения лопаритовых руд вследствие попадания минеральных частиц в почву, их взаимодействия с почвенными водами и перехода экологически опасных элементов (алюминия, фтора, цветных и редкоземельных металлов) в подвижные формы. Стоит отметить, что концентрации этих элементов в растворах после пяти часов взаимодействия превышают предельно допустимые для рыбохозяйственных водоёмов в несколько раз: фосфатов — в 40 раз; фтора — в 24 раза; цинка — в 3,3 раза; меди — в 29 раз.

Наблюдаемое увеличение перехода ТМ и РЗМ в раствор при внесении органического вещества, по-видимому, связано с интенсивным разрушением минеральной матрицы гуминовым веществом.

Методом фитотестирования установлено, что водный экстракт тонкой фракции хвостов обогащения лопаритовых руд оказывает токсическое действие на рост и развитие высших растений. В то же время для средней пробы такой эффект не выявлен. Более чувствительной тест-культурой оказался овёс посевной *Аvena sativa*.

Характеристика влияния водных экстракта средней пробы и тонкой фракции хвостов обогащения лопаритовых руд на семена овса и кресс-салата

Characterization of the effect of an average sample aqueous extract and a fine fraction concentration tailings of loparite ores on oat and watercress seeds

Разведение экстракта	Средняя длина кор-ней овса ($L_{\text{ср}}$), % к контр.	Фито-эффект, %	Тест-реакция	Средняя длина кор-ней кресс-салата ($L_{\text{ср}}$), % к контр.	Фито-эффект, %	Тест-реакция
Контроль	100	0	Норма	100	0	Норма
Нативный, средняя проба	84,58	15,42	Норма	87,97	12,03	Норма
Нативный, тонкая фракция	72,37	27,63	Эффект торможения	77,76	22,24	Эффект торможения

Работа выполнена в рамках темы НИР №0226-2019-0011 и частично поддержана из средств грантов РФФИ №18-05-60142 Арктика и №19-05-50065 Микромир.

The work was carried out within the framework of the research project NIR № 0226-2019-0011 and was partially supported by the RFBR grants No. 18-05-60142 Arctic and No. 19-05-50065 Mikromir.

Литература

References

1. Волкова Н.М. Влияние горно-металлургического комплекса на окружающую среду на примере мурманской области СЗФО. Матер. XVII Геологического съезда Республики Коми "Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России". Сыктывкар, Институт геологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 2019. С. 297–299.
2. Душкова Д.О., Евсеев А.В. Анализ техногенного воздействия на геосистемы европейского севера России. Арктика и Север. 2011. № 4. С. 162–195.
3. Амосов П.В., Бакланов А.А. К вопросу оценки интенсивности пыления хвостохранилищ. Математические методы в технике и технологиях. 2015. № 1(71). С. 3–5.
4. Волков И.В. Реакции микроэлементов с гуминовыми кислотами как основа сорбционной дезактивации и очистки техногенных отходов. Автореф. дис. ... канд. хим наук: 02.00.04 "физическая химия". Екатеринбург, 2016. 164 с.
5. Mostofa K.M.G. et al. Complexation of Dissolved Organic Matter with Trace Metal Ions in Natural Waters. In: Mostofa K., Yoshioka T., Mottaleb A., Vione D. (eds) Photobiogeochemistry of Organic Matter. Environmental Science and Engineering (Environmental Engineering). Springer. 2013. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-32223-5_9. Date Views 12.09.2020.
6. Твердов А.А. Редкие металлы Ловозерского массива. Редкие земли. 2016. №3(8). С. 164–169.
7. Горячев А.А., Красавцева Е.А., Лашук В.В., Икконен П.В., Смирнов А.А., Макаров Д.В., Маслобоев В.А. Исследования хвостов обогащения лопаритовых руд. Матер. Международного совещания "Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке" (Плакинские чтения-2019). Иркутск, Репроцентр А1, 2019. С. 433–434.
8. Методические рекомендации МР-2.1.7.2297-07 Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности. М., Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. 15 с.
9. Орлов Д.С. Гуминовые вещества в биосфере. Пochоведение. 2003. № 8. С. 1019–1022.
10. Переломов Л.В., Чилачава К.Б., Швыкин А.Ю., Атрошенко Ю.М. Влияние органических веществ гумуса на поглощение тяжелых металлов глинистыми минералами. Агрохимия. 2017. №2. С. 89–96.
11. Krasavtseva E.A., Maksimova V.V. Application of the phytotesting method to assess the environmental impact of the waste of Lovozersky GOK LLC. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Issue 548). IOP Publishing, 2020. URL: <https://iop-science.iop.org/article/10.1088/1755-1315/548/6/062063>. Date Views 12.09.2020.
1. Volkova N.M. Vliyanie gorno-metallurgicheskogo kompleksa na okruzhayushchuyu sredu na primere murmanskoj oblasti SZFO. Mater. XVII Geologicheskogo s'ezda Respubliki Komi "Geologiya i mineral'nye resursy Evropeiskogo Severo-Vostoka Rossii". Syktyvkar, Institut geologii Komi nauchnogo tsentra Ural'skogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk, 2019. S. 297–299.
2. Dushkova D.O., Evseev A.V. Analiz tekhnogennogo vozdeistviya na geosistemy evropeiskogo severa Rossii. Arktika i Sever. 2011. № 4. S. 162–195.
3. Amosov P.V., Baklanov A.A. K voprosu otsenki intensivnosti pyleniya khvostokhranilishch. Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh. 2015. № 1(71). S. 3–5.
4. Volkov I.V. Reaktsii mikroelementov s guminovymi kislotami kak osnova sorbtionnoi dezaktivatsii i ochistki tekhnogennykh otkhodov. Avtoref. dis. ... kand. khim nauk: 02.00.04 "fizicheskaya khimiya". Ekaterinburg, 2016. 164 s.
5. Mostofa K.M.G. et al. Complexation of Dissolved Organic Matter with Trace Metal Ions in Natural Waters. In: Mostofa K., Yoshioka T., Mottaleb A., Vione D. (eds) Photobiogeochemistry of Organic Matter. Environmental Science and Engineering (Environmental Engineering). Springer. 2013. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-32223-5_9. Date Views 12.09.2020.
6. Tverdov A.A. Redkie metally Lovozerskogo massiva. Redkie zemli. 2016. №3(8). S. 164–169.
7. Goryachev A.A., Krasavtseva E.A., Lashchuk V.V., Ikkonen P.V., Smirnov A.A., Makarov D.V., Masloboev V.A. Issledovaniya khvostov obogashcheniya loparitovykh rud. Mater. Mezhdunarodnogo soveshchaniya "Problemy i perspektivy effektivnoi pererabotki mineral'nogo syr'ya v 21 veke" (Plaksinskie chteniya-2019). Irkutsk, Reprot-sentr A1, 2019. S. 433–434.
8. Metodicheskie rekomendatsii MR-2.1.7.2297-07 Obosnovanie klassa opasnosti otkhodov proizvodstva i potrebleniya po fitotoksichnosti. M., Federal'nyi tsentr gigieny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2008. 15 s.
9. Orlov D.S. Guminovye veshchestva v biosfere. Pochovedenie. 2003. № 8. S. 1019–1022.
10. Perelomov L.V., Chilachava K.B., Shvykin A.Yu., Atroshchenko Yu.M. Vliyanie organicheskikh veshchestv gumusa na pogloshchenie tyazhelykh metallov glinistymi mineralami. Agrokimiya. 2017. №2. S. 89–96.
11. Krasavtseva E.A., Maksimova V.V. Application of the phytotesting method to assess the environmental impact of the waste of Lovozersky GOK LLC. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Issue 548). IOP Publishing, 2020. URL: <https://iop-science.iop.org/article/10.1088/1755-1315/548/6/062063>. Date Views 12.09.2020.

Е.А. Красавцева – мл. науч. сотрудник, Институт проблем промышленной экологии Севера Федеральный исследовательский центр Кольский научный центр РАН (ИППЭС ФИЦ КНЦ РАН), Лаборатория природоподобных технологий и техноферной безопасности Арктики Федеральный исследовательский центр Кольский научный центр РАН (ЛПТИТБА ФИЦ КНЦ РАН), e-mail: e.krasavtseva@ksc.ru • В.В. Максимова – мл. научный сотрудник, ИППЭС ФИЦ КНЦ РАН, ЛПТИТБА ФИЦ КНЦ РАН, e-mail: v.maksimova@ksc.ru • В.А. Маслобоев – д-р техн. наук, научный руководитель, ИППЭС ФИЦ КНЦ РАН, e-mail: masloboev@mail.ru • Д.В. Макаров – д-р техн. наук, директор, ИППЭС ФИЦ КНЦ РАН, e-mail: makarov@iner.ksc.ru • Т.Т. Горбачева – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник, ИППЭС ФИЦ КНЦ РАН, e-mail: podzol@mail.ru

E.A. Krasavtseva – Junior Research Fellow, Institute of North Industrial Ecology Problems of the Federal Research Centre "Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences" (INEP FRC KSC RAS), Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic of the Federal Research Centre "Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences" (LNTESA FRC KSC RAS), e-mail: e.krasavtseva@ksc.ru • V.V. Maximova – Junior Research Fellow, INEP FRC KSC RAS, LNTESA FRC KSC RAS, e-mail: v.maksimova@ksc.ru • V.A. Masloboev – Dr. Sci. (Eng.), Academic Adviser, INEP FRC KSC RAS, e-mail: masloboev@mail.ru • D.V. Makarov – Dr. Sci. (Eng.), Director, INEP FRC KSC RAS, e-mail: makarov@iner.ksc.ru • T.T. Gorbacheva – Cand. Sci. (Biol.), Senior Research Fellow, INEP FRC KSC RAS, e-mail: podzol@mail.ru