

УДК 504.054

Исследование растворимости пылевых частиц в почвенном растворе при различных температурах (на примере хвостов обогащения лопаритовых руд)

В. В. Максимова, Е. А. Красавцева*, В. А. Маслобоев, Д. В. Макаров

**Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН; Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;
e-mail: Vandeleur2012@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8821-4446>*

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
30.12.2020;

получена
после доработки
08.03.2021

Ключевые слова:

хвосты обогащения,
экологическая
опасность,
лопарит, пыление,
хвостохранилища

На территории Мурманской области расположен ряд крупных горнопромышленных предприятий. Пыление отвалов вскрышных пород и хранилищ хвостов обогащения приводит к комплексу долговременных последствий для окружающей среды. Выход пылевой фракции (–0,071 мм) "лежалых" хвостов обогащения лопаритовых руд (первое поле хвостохранилища) составляет около 22 %. Исследуемый материал представлен нефелином, микроклином, эгирином; в примесных количествах диагностируются лопарит, анальцит; среднее содержание церия, лантана, неодима – редкоземельных элементов легкой группы – 0,18, 0,03 и 0,015 % соответственно. В лабораторных условиях проведено моделирование попадания тонкой фракции хвостов обогащения лопаритовых руд в почву; изучено взаимодействие материала хвостов с дистиллированной водой и водной вытяжкой из условно фоновой почвы при различных температурах. В ходе исследования установлено, что внесение растворенного органического вещества интенсифицирует процессы разрушения и частичного растворения алюмосиликатной матрицы породообразующих минералов; зафиксирован интенсивный переход редкоземельных элементов и тяжелых металлов в растворимые формы. Результаты исследований свидетельствуют об экологической опасности тонкодисперсного материала "лежалых" хвостов обогащения лопаритовых руд вследствие попадания пылевых частиц в почву и их взаимодействия с почвенными водами.

Для цитирования

Максимова В. В. и др. Исследование растворимости пылевых частиц в почвенном растворе при различных температурах (на примере хвостов обогащения лопаритовых руд). Вестник МГТУ. 2021. Т. 24, № 1. С. 107–117. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-107-117>.

Investigation of the solubility of dust particles in soil solution at different temperatures (on the example of the tailings of the loparite ores' concentration)

Victoria V. Maksimova, Eugenia A. Krasavtseva*, Vladimir A. Masloboev,
Dmitry V. Makarov

**Industrial Ecology Problems of the North KSC RAS, Laboratory of Nature-Inspired Technologies
and Environmental Safety of the Arctic KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;
e-mail: Vandeleur2012@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8821-4446>*

Article info

Received
30.12.2020;

received
in revised
08.03.2021

Key words:

tailings,
environmental
hazard, loparite,
dusting,
tailing dumps

Abstract

A number of large mining enterprises are located on the territory of the Murmansk region. Dusting overburden dumps and tailings storage sites leads to a complex of long-term consequences for the environment. The output of the silty fraction (–0.071 mm) of "stale" tailings of loparite ore dressing (the first field of the tailing dump) is about 22 %. The investigated material is represented by nepheline, microcline, aegirine; loparite, analcime are diagnosed in impurity quantities; the average content of cerium, lanthanum, neodymium – rare earth elements of the light group – 0.18, 0.03 and 0.015 %, respectively. In laboratory conditions, a simulation of the ingress of a fine fraction of loparite ore dressing tailings into the soil has been carried out; the interaction of tailings material with distilled water and water extract from conditionally background soil at different temperatures has been studied. In the course of the study, it has been found that the introduction of dissolved organic matter intensifies the processes of destruction and partial dissolution of the aluminosilicate matrix of rock-forming minerals; an intensive transition of rare earth elements and heavy metals into soluble forms has been recorded. The research results indicate the ecological danger of the finely dispersed material of "stale" tailings of loparite ore dressing due to the ingress of dust particles into the soil and their interaction with soil waters.

For citation

Maksimova, V. V. et al. 2021. Investigation of the solubility of dust particles in soil solution at different temperatures (on the example of the tailings of the concentration of loparite ores). *Vestnik of MSTU*, 24(1), pp. 107–117. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-107-117>.

Введение

В настоящее время проводятся исследования различных аспектов негативного влияния отходов горнопромышленных комплексов (ГПК) на компоненты окружающей среды в регионах, относящихся к Арктической зоне (Moncur et al., 2013; Lindsay et al., 2015; Askaer et al., 2008). Сокращение степени загрязнения окружающей среды является важной комплексной проблемой развития горнодобывающей промышленности. Размещение действующих и выведенных из эксплуатации хвостохранилищ (хвостов обогачения), вскрышных и проходческих пород приводит к целому ряду долговременных последствий для окружающей среды. В процессе анализа экологической опасности размещения отходов предприятий по добыче и переработке руд используются следующие основные параметры: химический и минералогический состав отходов; степень дисперсности; объем и площадь хвостохранилищ и отвалов; наличие и целостность гидроизоляции; методы утилизации отходов. Помимо внутренних параметров, необходимо учитывать внешние параметры среды, такие как географическое положение, гидрология, геологическое строение и климатические условия района (Amos et al., 2015).

Территория Мурманской области в течение длительного периода времени подвергается антропогенному воздействию; отходы горнопромышленного комплекса в общем объеме отходов производства и потребления составляют преобладающую долю.

Поддержание хвостохранилищ, отвалов вскрышных пород и шламоохранилищ требует значительных материальных затрат и выведения земель из хозяйственного оборота на длительное время. Тонкодисперсные отходы обогачения руд способствуют загрязнению воздушного бассейна, водных объектов, почвы, в том числе за счет пыления отвалов и хвостохранилищ (Амосов и др., 2017). Для тонкодисперсного материала характерна высокая площадь поверхности частиц, что интенсифицирует протекание химического взаимодействия с растворами, и небольшие линейные размеры, что облегчает миграцию частиц во взвешенном виде с фильтрующимися растворами. При попадании тонкодисперсных частиц на поверхность почвы происходит химическое взаимодействие с атмосферными водами и почвенными органосодержащими растворами. Результирующие растворы, содержащие экологически опасные вещества (в том числе в высоколабильных растворенных формах), могут дренироваться как вглубь почвы до водоупорного горизонта, так и по направлению понижения рельефа в близлежащие водотоки (в частности, при более высоком уровне атмосферных осадков). Особенно опасна ситуация промывания грунта во время подъема паводковых вод, потому что даже при непосредственном отсутствии пыления в период снеготаяния депонированные в почве растворы вымываются потоком в водоемы. В центральной части Мурманской области, где отбирались пробы для исследования, таким водоемом является река Сергевань – крупный приток озера Ловозеро, отнесенного к высшей категории водоемов рыбохозяйственного значения.

Наличие растворенного органического вещества в растворе оказывает значительное влияние на протекание процесса взаимодействия пылевых частиц с почвенными водами. Органические вещества почв участвуют в физических, химических и биологических процессах, комплексообразовании, ионных, молекулярных и окислительно-восстановительных реакциях, воздействуют на транспорт металлов в водных и почвенных системах (Волков, 2016; Mostofa et al., 2013). Гуминовые и фульвокислоты усиливают миграционную способность элементов и способствуют их накоплению в почве вследствие образования труднорастворимых соединений. Значительное влияние на миграционную способность экотоксикантов органические вещества оказывают в поликомпонентных редкометалльных хвостах обогачения за счет формирования с металлами как растворимых, так и нерастворимых органокомплексов. Интенсивность протекания реакций в растворе варьируется в зависимости от концентрации элементов, наличия катализаторов, площади поверхности раздела фаз и температурного режима.

Средняя температура воздуха теплого периода на территории центральной части Кольского полуострова составляет 14–15 °С (июль); регион относится к зоне избыточного увлажнения (Яковлев, 1961).

По результатам оценки долговременных трендов температуры и влажности территории Кольского полуострова учеными Кольского научного центра РАН сделан вывод о продолжающемся потеплении и увеличении количества осадков (Природа и коренное население Арктики..., 2020). Арктические территории являются одними из наиболее экологически и климатически уязвимых регионов мира, что обусловлено интенсивной промышленной деятельностью (Катцов и др., 2011). Изучение последствий изменения климатических условий в связи с рассеиванием загрязнителей в природной среде имеет большое научное и практическое значение.

Цель настоящего исследования включает изучение вещественного состава минеральных пылевых частиц предприятий горнопромышленного комплекса Мурманской области, а также анализ растворимости пылевых частиц в почвенном растворе при различных температурах.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбрана пылевая фракция (–0,071 мм) хвостов обогачения лопаритовых руд поверхностного слоя глубиной до 8 см неэксплуатируемого поля хвостохранилища горнорудного предприятия. Товарный продукт, получаемый на предприятии (лопаритовый концентрат),

представляет собой комплексное сырье для дальнейшего производства тантала, ниобия, цериевой группы редких земель и титана (Твердов, 2016).

Отбор проб хвостов обогащения лопаритовых руд производился в летний период 2020 г. в центральной части Мурманской области сотрудниками Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН (ИППЭС КНЦ РАН) (рис. 1).



Рис. 1. Карта-схема отбора проб
Fig. 1. Sampling map-scheme

Ситовой анализ проводили на анализаторе с набором сит (размеры ячеек составляли 1, 0,5, 0,25, 0,1, 0,071 мм). Валовые содержания элементов в пылеватой фракции хвостов обогащения лопаритовых руд определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) с помощью прибора ELAN 9000 (Perkin Elmer, США) на базе Центра коллективного пользования (ЦКП) ИППЭС КНЦ РАН.

Для диагностики минерального состава тонкодисперсного материала хвостов методом порошковой рентгеновской дифракции применяли прибор ДРОН-2.0 (излучение $\text{Cu-K}\alpha$).

В лабораторных условиях провели моделирование взаимодействия тонкой фракции хвостов с модельными растворами, имитирующими почвенные воды. В качестве модельного раствора использовали водную вытяжку почвы, отобранной на удалении 20 км от предприятия; вытяжку готовили в соответствии с ГОСТ 26423-85¹ при соотношении твердого вещества и жидкости (Т : Ж), равном 1 : 5. Перемешивание почвы с дистиллированной водой осуществляли в течение 3 минут, затем оставляли на 5 минут для отстаивания. Содержание органического углерода в вытяжках составило порядка 40 мг/л, что сопоставимо со средним содержанием $\text{C}_{\text{орг}}$ в подзолистых почвах Кольского полуострова согласно литературным данным (Никонов и др., 2004).

¹ ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200023484>.

В полученные растворы вносили навески хвостов обогащения лопаритовых руд (фракция $-0,071$ мм) в соотношении Т : Ж = 1 : 10. В качестве контрольных опытов проводилась серия аналогичных экспериментов с дистиллированной водой. Время взаимодействия составляло 1, 3, 5 часов при непрерывном перемешивании в термостате ТСО-1/80 СПУ при выбранных температурах (5 и 15 °С – среднемесячные температуры весенне-осеннего и летнего периодов).

Полученные растворы фильтровали через мембранный фильтр марки "Владипор" типа МФАС-ОС-2 (размер пор 0,47 мкм) и передавали для количественного химического анализа в ЦКП. Концентрацию фтора определяли потенциометрическим методом с помощью ион-селективного электрода Элис-131F (иономер И-МИ 160). Результаты сравнивали с предельно-допустимыми концентрациями вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рбхз}), указанными в нормативном документе Минсельхоза РФ². Сравнение с ПДК_{рбхз} – предельными концентрациями загрязняющих веществ, не наносящими ущерба гидробионтам, – позволяет ориентировочно судить об ущербе результирующих растворов для водных экосистем.

Результаты и обсуждение

Исследование материала пылевой фракции хвостов обогащения лопаритовых руд

Хвосты обогащения лопаритовых руд были исследованы в работе (Горячев и др., 2020). В процессе изучения установлена неоднородность вещественного состава и содержания ценных компонентов, а также доказана вероятность пыления незакрепленного материала хвостов в условиях сухой ветреной погоды. Однако тонкодисперсный материал детально не был рассмотрен в указанной работе.

В результате ситового анализа "лежалых" хвостов обогащения лопаритовых руд было определено значительное содержание тонкой фракции (фракция $-0,071$ мм) – 22 % от общей массы хвостов. Значение коэффициента вариации содержания данной фракции (0,8) указывает на неоднородность гранулометрического состава исследованных проб.

Валовое содержание некоторых элементов приведено в таблице.

Таблица. Валовое содержание некоторых элементов в тонкодисперсном материале хвостов, мг/кг

Table. The gross content of some elements in the finely dispersed material of the tailings

Cu	Zn	La	Pr	Nd	Th	U	Ta	Nb*	Mn*	Al*	Fe*	Zr*	Sr*	Ce*
13,3	321	266	44,5	151	32,4	23,2	210	0,24	0,19	6,81	3,92	0,3	0,13	0,18

Примечание. *Содержание данного элемента представлено в %.

По результатам рентгенофазового анализа определены основные фазы (в порядке убывания): нефелин, микроклин, эгирин, альбит, содалит (рис. 2). В примесных количествах присутствовали лопарит, анальцим, натролит.

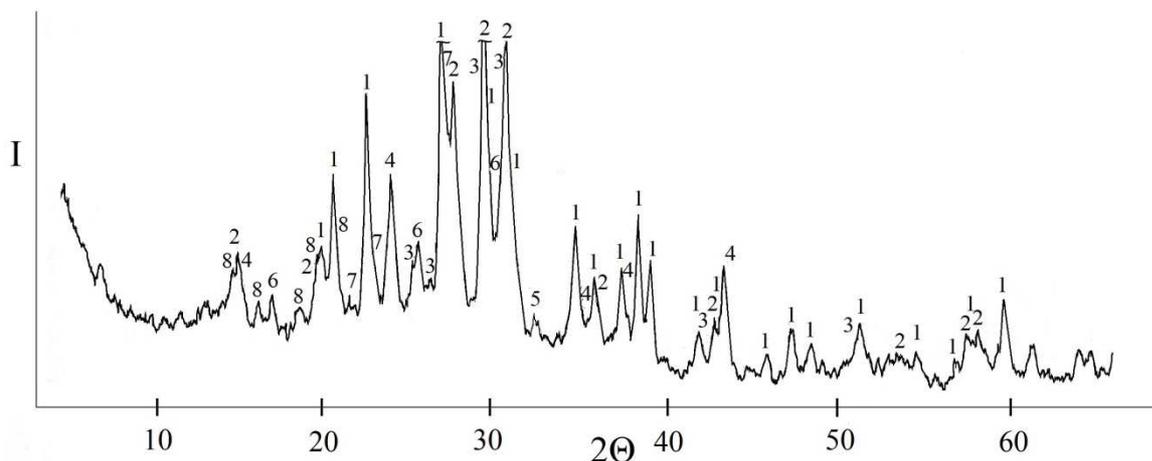


Рис. 2. Дифрактограмма пылевых частиц хвостов. Рефлексы: 1 – нефелин; 2 – эгирин; 3 – микроклин; 4 – содалит; 5 – лопарит; 6 – анальцим; 7 – альбит; 8 – натролит
 Fig. 2. Diffraction pattern of dusty particles of tailings. Reflexes: 1 – nepheline; 2 – aegirine; 3 – microcline; 4 – sodalite; 5 – loparite; 6 – analcime; 7 – albite; 8 – natrolite

² Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 № 552 "Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения" (зарегистрирован в Минюсте России 13.01.2017 № 45203). URL: <http://docs.cntd.ru/document/420389120>.

Изучение растворимости пылевых частиц в почвенном растворе

На основе данных количественного химического анализа фильтратов после выщелачивания тонкодисперсного материала хвостов дистиллированной водой и водной вытяжкой из условно фоновой почвы построены графики и диаграммы, иллюстрирующие влияние температуры, времени взаимодействия и внесенного растворенного органического вещества на концентрации химических элементов в результирующих растворах.

Изменение величины водородного показателя в ходе эксперимента приведено на рис. 3. Как видно из рисунка, с повышением температуры с 5 до 15 °С значение рН растворов закономерно повышалось и для дистиллированной воды, и для водной вытяжки.

Интенсивность разрушения минеральной матрицы материала хвостов оценивали по изменению концентраций натрия, калия, кремния и алюминия в результирующих растворах (рис. 4, 5), так как основными минералами являются алюмосиликаты (нефелин и микроклин).

Характер изменения концентраций натрия и калия (рис. 4) свидетельствовал о том, что растворение минералов происходило неравномерно с преимущественным переходом в раствор натрия. При этом повышение температуры и внесение растворенного органического вещества (водной вытяжки из условно фоновой почвы) закономерно интенсифицировали этот процесс.

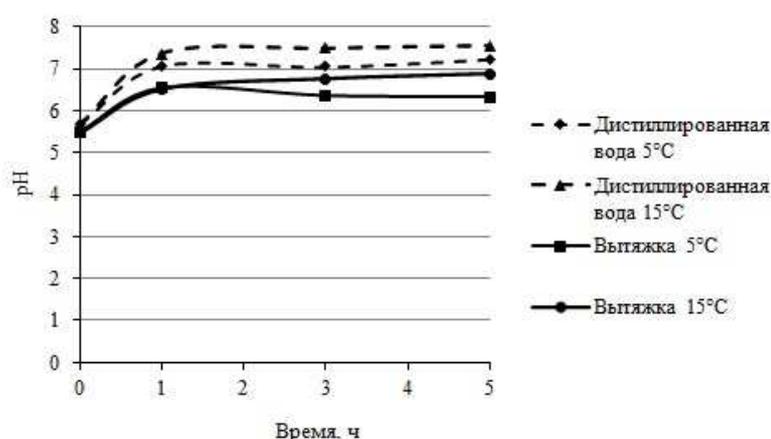


Рис. 3. Изменение рН в ходе эксперимента
Fig. 3. Change in pH during the experiment

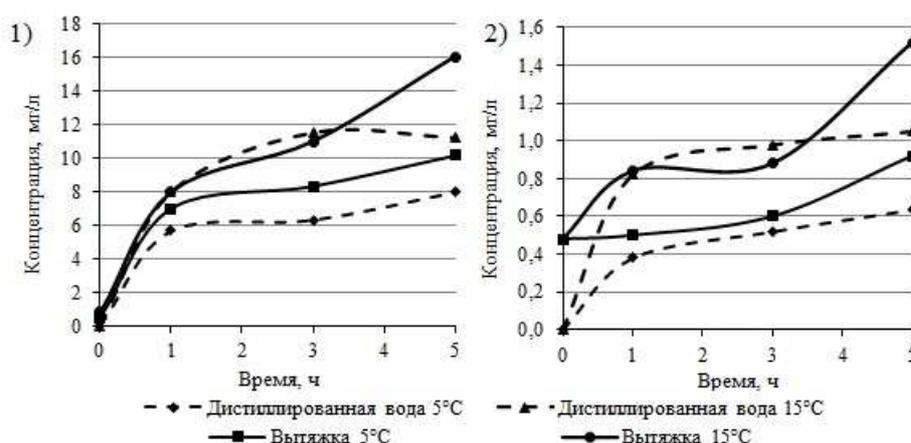


Рис. 4. Изменение концентраций ионов натрия (1) и калия (2) в исследуемых растворах в зависимости от времени взаимодействия и температуры
Fig. 4. Change in the concentration of sodium (1) and potassium (2) ions in the test solutions depending on the interaction time and temperature

Для алюминия и кремния, входящих в состав нефелина и полевых шпатов, также был характерен рост концентраций в исследуемых растворах (в большей степени – для кремния, в меньшей – для алюминия). При разложении алюмосиликатов в процессе гидролиза алюминий может образовывать комплексные соли с гуминовыми и фульвокислотами, входя в анионную часть молекулы (Орлов, 2003). Увеличение кислотности

при переходе от дистиллированной воды к водной вытяжке почвы ускоряет выщелачивание и приводит к более высокой концентрации щелочных и щелочноземельных элементов в растворе (Савенко и др., 2017).

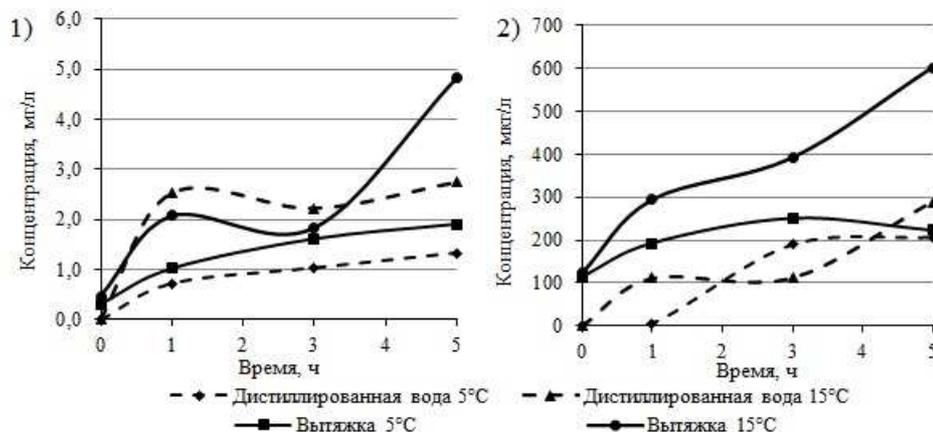


Рис. 5. Изменение концентрации кремния (1) и алюминия (2) в исследуемых растворах в зависимости от времени взаимодействия и температуры
 Fig. 5. Change in the concentration of silicon (1) and aluminum (2) in the test solutions depending on the interaction time and temperature

Концентрации фторидов и фосфатов в результирующих растворах, представленные на рис. 6, свидетельствуют о значительном превышении уровня ПДК в водах водных объектов рыбохозяйственного значения.

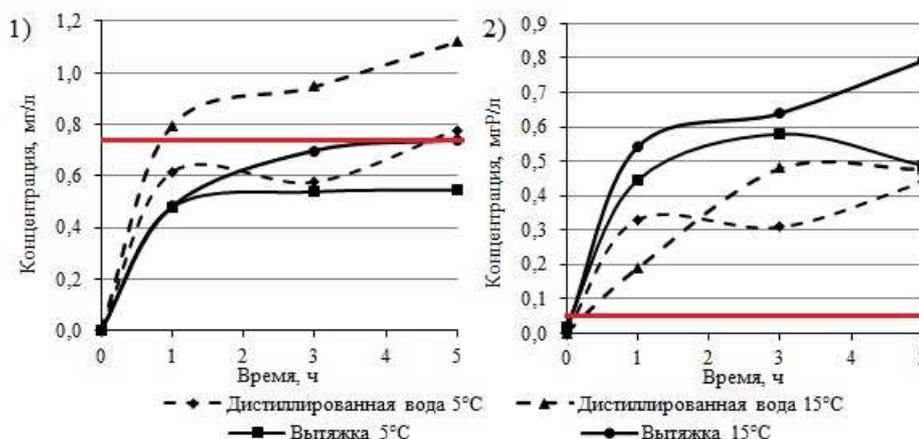


Рис. 6. Изменение концентрации фтор-иона (1) и фосфат-иона (2) в исследуемых растворах в зависимости от времени взаимодействия и температуры.

Линией обозначены уровни ПДК_{рбхз}, равные 0,75 мг/л и 0,05 мгР/л соответственно
 Fig. 6. Change in the concentration of fluorine ion (1) and phosphate ion (2) in the test solutions depending on the interaction time and temperature.

The line indicates the MPC_{wbfs} level – 0,75 mg/l and 0,05 mgP/l, respectively

Концентрация фтора с увеличением времени взаимодействия возрастала во всех растворах; отмечался резкий рост концентрации F^- после одного часа взаимодействия, затем наблюдалось незначительное повышение. Характеры изменения концентрации фосфат-ионов во всех рассматриваемых растворах качественно схожи; уже после первого часа взаимодействия уровень фосфатов в растворах значительно превышал ПДК_{рбхз}.

Изменение концентраций тяжелых металлов (ТМ) в растворе на примере меди, цинка и марганца в зависимости от температуры и присутствия растворенного органического вещества представлено на рис. 7. Как видно из рисунка, концентрации меди, цинка и марганца в результирующих растворах после пяти часов взаимодействия многократно превышали ПДК_{рбхз} (0,001; 0,01; 0,01 мг/л соответственно). Формирование растворимых органоминеральных комплексов тяжелых металлов при взаимодействии с лизиметрическими водами рассмотрено в работах В. С. Аржановой и П. В. Елпатьевского (Аржанова и др., 1981; Елпатьевский

и др., 1990). По мнению исследователей, для Cu и Fe характерно образование комплексных соединений с высокомолекулярным растворенным органическим веществом, а Zn и Mn – со среднемолекулярным, что обеспечивает их частичный вынос за пределы почвенного профиля (Елпатьевский и др., 1990). Более интенсивный переход ТМ в растворимые формы наблюдался в водной вытяжке фоновой почвы при 15 °С.

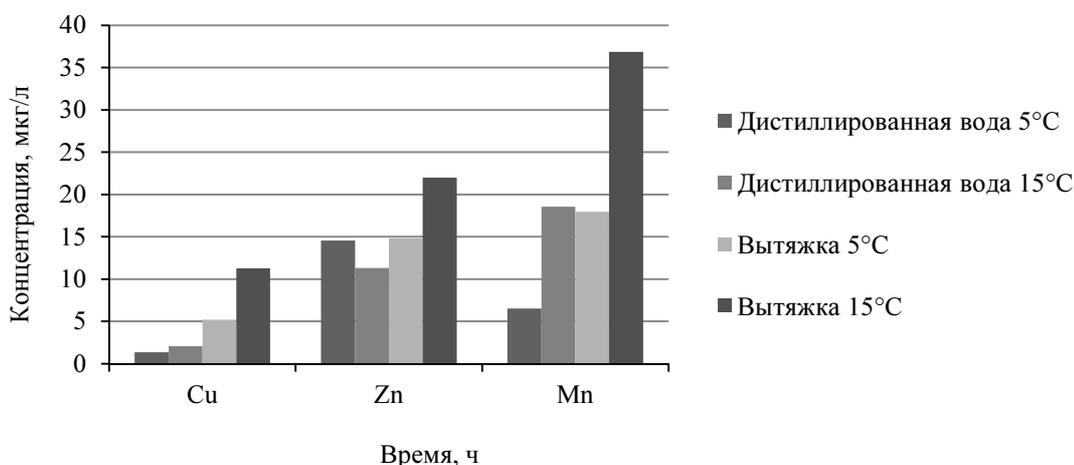


Рис. 7. Изменение концентраций ионов меди, цинка и марганца в исследуемых растворах после пяти часов взаимодействия с хвостами обогащения лопаритовых руд
Fig. 7. Change in the concentrations of copper, zinc and manganese ions in the test solutions after five hours of interaction with the tailings of the concentration of loparite ores

Влияние водорастворимого органического вещества и температуры на переход редкоземельных элементов (РЗЭ) в раствор показано на рис. 8. Внесение органики приводит к увеличению интенсивности растворения минералов, содержащих РЗЭ; более интенсивно осуществляется процесс растворения лантана, церия, неодима. Известно, что, попадая в почву, РЗЭ могут адсорбироваться, поскольку органические вещества являются источником отрицательных зарядов для выветрившихся почв (Beckwith et al., 1983). Однако стабильность связи РЗЭ с гуминовыми веществами различна, поэтому под влиянием растворенного органического вещества может происходить обратный процесс – десорбция (Wang Xiangke et al., 2000). Концентрация РЗЭ в почвенном растворе имеет прямую корреляцию с содержанием растворенного органического углерода и обратную корреляцию – с pH почвы (Pourret et al., 2007; Tang et al., 2010). В целом поведение РЗЭ в почвах схоже с поведением тяжелых металлов (Ramos et al., 2016). ПДК в водных объектах и почвах для данных элементов не установлено; влияние РЗЭ на биоту изучено недостаточно.

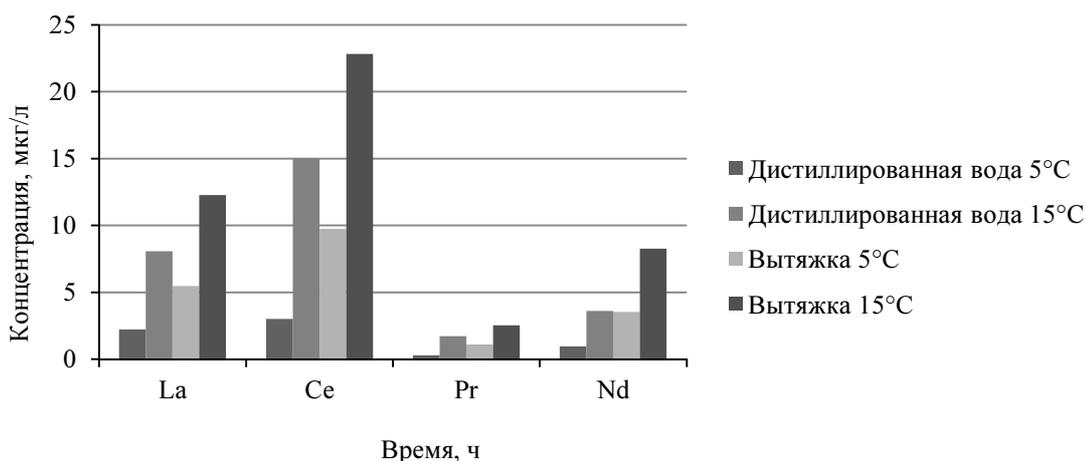


Рис. 8. Изменение концентраций редкоземельных элементов в исследуемых растворах после пяти часов взаимодействия с хвостами обогащения лопаритовых руд
Fig. 8. Change in the concentration of rare earth elements in the test solutions after five hours of interaction with the tailings of the concentration of loparite ores

Следует отметить, что сильная мобилизационная способность органических кислот, входящих в состав водной вытяжки почвы, по отношению к микроэлементам была отмечена для цинка, меди, марганца, тория, ванадия, лантана, ниобия и других элементов в работах (Панов, 1980; Hausrath et al., 2009).

Заключение

В процессе исследования проанализирован материал пылевой фракции ($-0,071$ мм) "лежалых" хвостов обогащения лопаритовых руд первого поля хвостохранилища, выведенного из эксплуатации 35 лет назад (в среднем выход данной фракции составляет порядка 22 %). Тонкодисперсный материал хвостов обогащения лопаритовых руд преимущественно представлен нефелином, микроклином, эгирином; в примесных количествах диагностированы лопарит, анальцит, натролит. Среднее содержание РЗЭ легкой группы – церия, лантана, неодима – составляет 0,18, 0,03 и 0,015 % соответственно.

Результаты экспериментов, проведенных в статических условиях и моделировавших попадание минеральных частиц в почву, их взаимодействие с почвенными водами и переход экологически опасных элементов (алюминия, фтора, фосфатов, цветных и редкоземельных металлов) в подвижные формы, свидетельствуют о потенциальной экологической опасности пыления хвостов обогащения лопаритовых руд. Концентрации указанных элементов в растворах после пяти часов взаимодействия значительно превышают ПДК_{рбхз}: алюминия – в 15 раз, фосфатов – в 25, фтора – в 1,2, цинка – в 2,1, меди – в 12, марганца – в 3,6 раза.

Наблюдаемое увеличение перехода ТМ и РЗЭ в раствор при внесении органического вещества связано с интенсивным разрушением минеральной матрицы гуминовым веществом. Присутствие водорастворимых органических веществ почв с повышением температуры закономерно приводит к интенсификации перехода в раствор как основных катионов породообразующих минералов, так и катионов тяжелых металлов и редкоземельных элементов.

Миграция ТМ и РЗЭ в растворенной форме в большей степени регулируется не наличием свободных катионов в растворе, а образованием комплексных органических и неорганических соединений. Переход металлов в лабильную форму при взаимодействии с органическим веществом почв способствует их аккумуляции в наиболее токсичной для биоты форме в верхнем органогенном слое почв.

В результате исследования взаимодействия хвостов обогащения лопаритовых руд с водорастворимыми веществами почв в условиях различных температур определены процессы трансформации минералов хвостов обогащения и переход экологически опасных элементов в подвижные формы в условиях изменяющегося климата.

Благодарности

Авторы выражают благодарность А. В. Тимохину, А. А. Горячеву за помощь в отборе проб; Е. А. Селивановой – за рентгенофазовый анализ образцов; коллективу Центра коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН – за проведение анализов растворов и материала хвостов обогащения.

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.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Амосов П. В., Бакланов А. А., Маслобоев В. А. Результаты оценки загрязнения атмосферы при пылении хвостохранилища (на базе трехмерного моделирования) // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 6. С. 87–94.
- Аржанова В. С., Вертель Е. Ф., Елпатьевский П. В. Микроэлементы и растворимое органическое вещество лизиметрических вод // Почвоведение. 1981. № 11. С. 50–60.
- Волков И. В. Реакции микроэлементов с гуминовыми кислотами как основа сорбционной дезактивации и очистки техногенных отходов : автореф. дис. ... канд. хим. наук : 02.00.04. Екатеринбург, 2016. 25 с.
- Горячев А. А., Лашук В. В., Красавцева Е. А., Алфертьев Н. Л. [и др.]. Геоэкологическая оценка современного состояния разновозрастных хвостохранилищ рудника Карнасурт // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2020. № 17. С. 128–132. DOI: <https://doi.org/10.31241/FNS.2020.17.023>.
- Елпатьевский П. В., Луценко Т. Н. Роль водорастворимых органических веществ в переносе металлов техногенного происхождения по профилю горного бурозема // Почвоведение. 1990. № 6. С. 30–42.
- Катцов В. М., Порфирьев Б. Н. Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу (резюме доклада) // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2011. № 563. С. 7–59.

- Никонов В. В., Лукина Н. В., Безель В. С. [и др.]. Рассеянные элементы в бореальных лесах. М. : Наука, 2004. 410 с.
- Орлов Д. С., Чуков С. Н. II всероссийская конференция "Гуминовые вещества в биосфере" // Почвоведение. 2003. № 8. С. 1019–1022.
- Панов Е. Н. Поведение элементов-примесей при обработке микроклина раствором органических кислот // Геохимия. 1980. № 10. С. 1568–1572.
- Природа и коренное население Арктики под влиянием изменения климата и индустриального освоения: Мурманская область / под ред. Е. А. Боровичева, Н. В. Вронского. М. : Графит, 2020. 180 с.
- Савенко А. В., Савенко В. С., Дубинин А. В. Выщелачивание микроэлементов из горных пород под действием органических кислот // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2017. № 6. С. 70–76.
- Твердов А. А. Редкие металлы Ловозерского массива // Редкие земли. 2016. № 3(8). С. 164–169.
- Яковлев Б. А. Климат Мурманской области. Мурманск : Кн. изд-во, 1961. 180 с.
- Amos R. T., Blowes D. W., Bailey B. L., Segó D. C. [et al.]. Waste-rock hydrogeology and geochemistry // Applied Geochemistry. 2015. Vol. 57. P. 140–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.06.020>.
- Askaer L., Schmidt L. B., Elberling B., Asmund G. [et al.]. Environmental impact on an arctic soil – plant system resulting from metals released from coal mine waste in Svalbard (78° N) // Water, Air, and Soil Pollution. 2008. Vol. 195, Iss. 1–4. P. 99–114. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9730-z>.
- Beckwith R., Butler J. Aspect of the chemistry of soil organic matter. Soil, an Australian viewpoint. Vic CSIRO/Academic Press, 1983. P. 561–581.
- Hausrath E. M., Neaman A., Brantley S. L. Elemental release rates from dissolving basalt and granite with and without organic ligands // American Journal of Science. 2009. Vol. 309, Iss. 8. P. 633–660. DOI: <https://doi.org/10.2475/08.2009.01>.
- Lindsay M. B. J., Moncur M. C., Bain J. G., Jambor J. L. [et al.]. Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings // Applied Geochemistry. 2015. Vol. 57. P. 157–177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.01.009>.
- Moncur M. C., Ptacek C. J., Hayashi M., Blowes D. W. [et al.]. Seasonal cycling and mass-loading of dissolved metals and sulfate discharging from an abandoned mine site in northern Canada // Applied Geochemistry. 2013. Vol. 41. P. 176–188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.12.007>.
- Mostafa K. M. G., Liu C.-q., Feng X., Yoshioka T. [et al.]. Complexation of dissolved organic matter with trace metal ions in natural waters // Photobiogeochemistry of Organic Matter. Principles and Practices in Water Environments / eds.: K. M. G. Mostafa [et al.]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. P. 769–849. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-32223-5_9.
- Pourret O., Davranche M., Gruau G., Dia A. Organic complexation of rare earth elements in natural waters: Evaluating model calculations from ultrafiltration data // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2007. Vol. 71, Iss. 11. P. 2718–2735. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.04.001>.
- Ramos S. J., Dinali G. S., Oliveira C., Martins G. C. [et al.]. Rare earth elements in the soil environment // Current Pollution Reports. 2016. Vol. 2, Iss. 1. P. 28–50. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40726-016-0026-4>.
- Tang J., Johannesson K. H. Rare earth elements adsorption onto Carrizo sand: Influence of strong solution complexation // Chemical Geology. 2010. Vol. 279, Iss. 3–4. P. 120–133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.10.011>.
- Wang Xiangke, Dong Wenming, Dai Xiongxin, Wang Aixia [et al.]. Sorption and desorption of Eu and Yb on alumina: Mechanisms and effect of fulvic acid // Applied Radiation and Isotopes. 2000. Vol. 52, Iss. 2. P. 165–173. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(99\)00133-5](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(99)00133-5).

References

- Amosov, P. V., Baklanov, A. A., Masloboev, V. A. 2017. The results of assessing atmospheric pollution during dusting of the tailing dump (based on three-dimensional modeling). *News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 6, pp. 87–94. (In Russ.)
- Arzhanova, V. S., Vertel, E. F., Elpatievsky, P. V. 1981. Trace elements and soluble organic matter of lysimetric waters. *Soviet Soil Science*, 11, pp. 50–60. (In Russ.)
- Volkov, I. 2016. Reactions of microelements with humic acids as a basis for sorption decontamination and purification of technogenic waste. Abstract of Ph.D. dissertation. Yekaterinburg. (In Russ.)
- Goryachev, A., Laschuk, V., Krasavtseva, E., Alfertyev, N. et al. 2020. Geoecological assessment of the current state of tailing dumps of different ages at the Karnasurt mine. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTS RAN*, 17, pp. 128–132. DOI: <https://doi.org/10.31241/FNS.2020.17.023>. (In Russ.)
- Elpatevsky, P. V., Lutsenko, T. N. 1990. The role of water-soluble organic substances in the transport of technogenic metals along the profile of mountain burozem. *Soviet Soil Science*, 6, pp. 30–42. (In Russ.)

- Kattsov, V., Porfiriev, B. 2011. Assessment of the macroeconomic consequences of climate change on the territory of the Russian Federation for the period up to 2030 and beyond (summary of the report). *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A. I. Voyeykova*, 563, pp. 7–59. (In Russ.)
- Nikonov, V., Lukina, N., Bezel, V. et al. 2004. Scattered elements in boreal forests. Moscow. (In Russ.)
- Orlov, D. S., Chukov, S. N. 2003. Humic substances in the biosphere. *Eurasian Soil Science*, 8, pp. 1019–1022. (In Russ.)
- Panov, E. 1980. Behavior of impurity elements during microcline treatment with organic acid solution. *Geokhimiya*, 10, pp. 1568–1572. (In Russ.)
- The nature and indigenous population of the Arctic under the influence of climate change and industrial development. Eds.: Borovichyov E., Vronsky N. Moscow. (In Russ.)
- Savenko, A., Savenko, V., Dubinin, A. 2017. Leaching of trace elements from rocks under the action of organic acids. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*, 6, pp. 70–76. (In Russ.)
- Tverdov, A. A. 2016. Rare metals of the Lovozero massif. *Redkie zemli*, 3(8), pp. 164–169. (In Russ.)
- Yakovlev, B. 1961. Climate of the Murmansk Region. Murmansk. (In Russ.)
- Amos, R. T., Blowes, D. W., Bailey, B. L., Sego, D. C. et al. 2015. Waste-rock hydrogeology and geochemistry. *Applied Geochemistry*, 57, pp. 140–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.06.020>.
- Askaer, L., Schmidt, L. B., Elberling, B., Asmund, G. et al. 2008. Environmental impact on an arctic soil – plant system resulting from metals released from coal mine waste in Svalbard (78° N). *Water, Air, and Soil Pollution*, 195(1–4), pp. 99–114. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9730-z>.
- Beckwith, R., Butler, J. 1983. Aspect of the chemistry of soil organic matter. Soil, an Australian viewpoint. Vic CSIRO/Academic Press, pp. 561–581.
- Hausrath, E. M., Neaman, A., Brantley, S. L. 2009. Elemental release rates from dissolving basalt and granite with and without organic ligands. *American Journal of Science*, 309(8), pp. 633–660. DOI: <https://doi.org/10.2475/08.2009.01>.
- Lindsay, M. B. J., Moncur, M. C., Bain, J. G., Jambor, J. L. et al. 2015. Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings. *Applied Geochemistry*, 57, pp. 157–177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.01.009>.
- Moncur, M. C., Ptacek, C. J., Hayashi, M., Blowes, D. W. et al. 2013. Seasonal cycling and mass-loading of dissolved metals and sulfate discharging from an abandoned mine site in northern Canada. *Applied Geochemistry*, 41, pp. 176–188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.12.007>.
- Mostofa, K. M. G., Liu, C.-q., Feng, X., Yoshioka, T. et al. 2013. Complexation of dissolved organic matter with trace metal ions in natural waters. In *Photobiogeochemistry of Organic Matter. Principles and Practices in Water Environments*. Eds.: K. M. G. Mostofa et al. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 769–849. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-32223-5_9.
- Pourret, O., Davranche, M., Gruau, G., Dia, A. 2007. Organic complexation of rare earth elements in natural waters: Evaluating model calculations from ultrafiltration data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(11), pp. 2718–2735. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.04.001>.
- Ramos, S. J., Dinali, G. S., Oliveira, C., Martins, G. C. et al. 2016. Rare earth elements in the soil environment. *Current Pollution Reports*, 2(1), pp. 28–50. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40726-016-0026-4>.
- Tang, J., Johannesson, K. H. 2010. Rare earth elements adsorption onto Carrizo sand: Influence of strong solution complexation. *Chemical Geology*, 279(3–4), pp. 120–133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.10.011>.
- Wang, Xiangke, Dong, Wenming, Dai, Xiongxin, Wang, Aixia et al. 2000. Sorption and desorption of Eu and Yb on alumina: Mechanisms and effect of fulvic acid. *Applied Radiation and Isotopes*, 52(2), pp. 165–173. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0969-8043\(99\)00133-5](https://doi.org/10.1016/s0969-8043(99)00133-5).

Сведения об авторах

Максимова Виктория Вячеславовна – Академгородок, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник; Ферсмана ул., 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: fourthmax@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5080-5187>

Victoria V. Maksimova – 14a Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, 184209; Institute of the North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Researcher; 14 Fersmana, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic KSC RAS, Researcher, e-mail: fourthmax@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5080-5187>

Красавцева Евгения Андреевна – Академгородок, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник;

Ферсмана ул., 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник;
e-mail: Vandeleur2012@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8821-4446>

Eugenia A. Krasavtseva – 14a Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209;
Institute of the North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Researcher;
14 Fersmana, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic KSC RAS, Researcher; e-mail: Vandeleur2012@yandex.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8821-4446>

Маслобоев Владимир Алексеевич – Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;
Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник;
e-mail: masloboev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1536-921X>

Vladimir A. Masloboev – 14a Akademgorodok, Apatity, Murmansk Region, Russia, 184209;
Institute of the North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Dr of Sci. (Engineering), Main Researcher;
e-mail: masloboev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1536-921X>

Макаров Дмитрий Викторович – Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;
Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, д-р техн. наук;
e-mail: d.makarov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8930-1288>

Dmitry V. Makarov – 14a Akademgorodok, Apatity, Murmansk Region, Russia, 184209;
Institute of the North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Dr of Sci. (Engineering);
e-mail: d.makarov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8930-1288>