

УДК 504.06

Сорбция тяжелых металлов фильтрующими модулями с вермикулит-сунгулитовыми продуктами

И. А. Мосендз*, И. П. Кременецкая, С. В. Дрогобужская, С. А. Алексеева

*Кольский научный центр РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;

e-mail: ia.mosendz@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3129-7305>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
04.02.2020;

получена
после доработки
28.05.2020

Ключевые слова:

сунгулит,
вермикулит,
горнопромышленные
отходы, тяжелые
металлы, техногенно-
загрязненная
территория,
ремедиация

Поиск эффективных технологий ремедиации техногенно загрязненных природных объектов является актуальной проблемой защиты окружающей среды. На экспериментальной площадке вблизи АО "Кольская ГМК" (Мурманская область, г. Мончегорск) проведены опыты по использованию горнопромышленных отходов для создания фитоадсорбционных площадок на техногенно загрязненных территориях. В ходе экспериментов использовались фильтрующие модули с целью изучения процессов сорбции/десорбции компонентов выбросов материалами вермикулит-сунгулитового состава, полученными посредством обогащения отходов добычи флогопита (Мурманская область, г. Ковдор). Для загрузки фильтрующих модулей двух типов, предназначенных для изучения открытых (I) и частично открытых (II) систем, использовали исходный и термообработанный зернистый сунгулитовый, а также шламовый продукты (содержание сунгулита и вермикулита составляло 30 %). В качестве контрольного варианта проведен опыт с применением чистого торфа, отобранного в окрестностях г. Апатиты (Мурманская область). В результате исследования определено послойное содержание кислоторастворимой (или условно-валовой) формы компонентов; рассчитан модуль токсичности (отношение суммарного мольного содержания металлов (Cu + Ni) и макроэлементов (Ca + Mg)), применяемый для оценки возможного токсичного эффекта продуктов по отношению к растениям. Наибольшей сорбционной способностью обладал чистый торф, однако по завершении эксперимента для торфа отмечалась самая высокая степень токсичности; продукты минерального происхождения были наименее токсичными. Анализ распределения металлов по слоям фильтрующих модулей (II) показал, что в верхних слоях наблюдалось интенсивное накопление металлов; с увеличением глубины (слои 2–4) происходило постепенное снижение содержания меди, в некоторых продуктах наблюдалось выщелачивание никеля в нижних слоях. В модулях (I) возрастала сорбция металлов зернистыми продуктами, шламовый продукт уступал зернистым по величине сорбции меди и никеля в первом слое. Результаты исследования показали, что для загрузки фитоадсорбционных площадок целесообразно использовать зернистый сунгулитовый продукт, отличающийся хорошей сорбционной способностью и низкой токсичностью.

Для цитирования

Мосендз И. А. и др. Сорбция тяжелых металлов фильтрующими модулями с вермикулит-сунгулитовыми продуктами. Вестник МГТУ. 2020. Т. 23, № 2. С. 182–189. DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-2-182-189

Sorption of heavy metals by the filtering containers with serpentine materials

Irina A. Mosendz*, Irina P. Kremenetskaya,
Svetlana V. Drogobuzhskaya, Svetlana A. Alekseeva

*Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Murmansk region, Russia;

e-mail: ia.mosendz@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3129-7305>

Article info

Received
04.02.2020;

received
in revised
28.05.2020

Key words:

sungulite,
vermiculite,
mining waste,
heavy metals,
industrial barren,
remediation

Abstract

The search for effective technologies for the remediation of technologically polluted natural objects is an urgent problem of environmental protection. At the experimental site near Kola MMC JSC (Murmansk region, Monchegorsk), experiments have been carried out on the use of mining waste to create phyto-adsorption sites in technologically polluted territories. During the experiments, filtering modules were used to study the processes of sorption/desorption of emission components with vermiculite-sungulite composition materials obtained by enriching phlogopite mining waste (Murmansk Region, Kovdor). To load two types of filtering modules designed to study open (I) and partially open (II) systems, the authors have used the initial and heat-treated granular sungulite, as well as slurry products (the content of sungulite and vermiculite was 30 %). As a control option, an experiment has been carried out using pure peat, selected in the vicinity of Apatity (Murmansk region). As a result of the study, the layer-by-layer content of the acid-soluble (or semi-gross) form of the components has been determined; the toxicity module has been calculated (the ratio of the total molar content of metals (Cu + Ni) and macronutrients (Ca + Mg)) used to assess the possible toxic effect of products in relation to plants. Pure peat has proved to possess the greatest sorption ability, however, at the end of the experiment, the highest degree of toxicity has been observed for peat; mineral products have been the least toxic. An analysis of the distribution of metals among the layers of filtering modules (II) has shown that intense accumulation of metals is observed in the upper layers; with increasing depth (layers 2–4) there is a gradual decrease in the copper content, in some products nickel is leached in the lower layers. The results of the study have shown that for loading phyto-adsorption sites it is advisable to use a granular sungulite product characterized by good sorption ability and low toxicity.

For citation

Mosendz, I. A. et al. 2020. Sorption of heavy metals by the filtering containers with serpentine materials. *Vestnik of MSTU*, 23(2), pp. 182–189. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-2-182-189

Введение

Цветная металлургия является одной из ведущих отраслей промышленности Российской Федерации. Производственная деятельность предприятий данного профиля способствует повышению антропогенной нагрузки на природную среду (Ананьева и др., 2012). Для снижения объема поступления загрязняющих веществ в окружающую среду разрабатываются и внедряются новые технологии. В настоящее время уделяется особое внимание проблеме возникновения неорганизованных источников загрязнения, к которым относятся техногенно загрязненные территории вокруг предприятий (Копчик, 2014; Joseph et al., 2019). В Мурманской области примером такой территории является зона влияния подразделения АО "Кольская ГМК", расположенного в г. Мончегорске, где наблюдается значительное ухудшение состояния растительности, почвы и водоемов в результате воздействия азротехногенных выбросов, содержащих диоксид серы и тяжелые металлы (Кашулина, 2002). Поиск эффективных и безопасных технологий ремедиации техногенно загрязненных природных объектов – приоритетная задача в области решения проблем защиты окружающей среды.

На территориях, загрязненных тяжелыми металлами, применяются сорбционные методы очистки, в том числе с использованием в качестве сорбентов материалов из горнопромышленных отходов (Кременецкая и др., 2012). Один из вариантов использования таких материалов предусматривает создание гидрботанических площадок из сорбционно активных материалов, засаженных высшими растениями (Кривицкий, 2009). Материалы для гидрботанических площадок должны соответствовать следующим требованиям: 1) обладать свойством удерживать тяжелые металлы в условиях эксплуатации; 2) не оказывать токсического воздействия на растения (даже после накопления в них максимально возможного количества металлов). Как показали результаты исследований (Кременецкая и др., 2015), указанными свойствами обладают материалы вермикулит-сунгулитового состава, которые могут быть получены из заскларированных отходов добычи флогопита (Мурманская область, г. Ковдор).

В настоящей работе представлены результаты полевого эксперимента, проведенного в непосредственной близости от промышленной площадки АО "Кольская ГМК" (Мурманская область, г. Мончегорск), с применением фильтрующих модулей из вермикулит-сунгулитовых продуктов. Целью исследования является изучение процессов сорбции/десорбции тяжелых металлов материалами, которые предполагается использовать для создания гидрботанических площадок; создание таких площадок будет направлено на снижение степени загрязнения почвенных и водных объектов.

Материалы и методы

Характеристика использованных материалов

Вермикулит-сунгулитовые продукты получены по гравитационной схеме переработки вермикулит-сунгулитового сырья – отходов добычи флогопита на предприятии "Ковдорслюда" (Кременецкая и др., 2015). В конечных сунгулитсодержащих продуктах (зернистом и шламовом) содержание вермикулита и сунгулита увеличивается в 1,5–2,3 раза по сравнению с исходным продуктом (при извлечении сунгулитсодержащих продуктов более 85 %).

Для загрузки фильтрующих модулей использовали исходный и термообработанный зернистый сунгулитовый, а также шламовый продукты. Содержание в зернистом продукте целевых минералов сунгулита и вермикулита составляет 31 и 33 % соответственно. В продукте присутствует около 36 % примесей, среди которых преобладают частицы оливин-пироксеновых пород и пород типа мелкокристаллических фенитов или сиенитов, а также единичные зерна диопсида, кварца, полевого шпата. Шламовый продукт представляет собой мелкодисперсный материал, содержание сунгулита и вермикулита в нем примерно одинаковое и составляет величину порядка 30 %. Вермикулит в этом продукте не содержит пачек и представлен мелкими тонкими листочками. Термообработанный зернистый сунгулитовый продукт получен путем обжига при температуре 700 °С в электрической модульно-спусковой печи конструкции А. И. Нижегородова (Иркутский национальный исследовательский университет, ИрГТУ) (Нижегородов, 2014; Nizhegorodov, 2015). Печь изготовлена в Центре экспериментальной обработки инноваций (ЦЭОИ ИрГТУ, г. Иркутск), смонтирована и запущена в работу в экспериментальном цехе Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН (ИХТРЭМС КНЦ РАН) под руководством директора ЦЭОИ ИрГТУ А. В. Звезда. Контрольный эксперимент поставлен с применением чистого торфа, отобранного в окрестностях г. Апатиты; торф использован как материал, способный накапливать металлы, что представляет интерес с точки зрения изучения влияния процессов загрязнения на его агрохимические свойства.

Конструкция фильтрующих модулей

Модули для изучения в полевых условиях процесса взаимодействия сорбционно активных материалов с компонентами загрязненных сред изготовлены в двух вариантах. Модули для изучения открытых систем (тип I) предусматривают возможность контакта загрузки как с атмосферными осадками, так и почвенными растворами, и изготовлены из водопроницаемого геотекстильного материала. Варианты эксперимента, в которых исключается контакт загрузки модулей с почвенными растворами, можно отнести

к частично открытым системам (открытым по отношению к атмосферным осадкам) (тип II); данные модули изготовлены из пластика. Внешний вид модулей представлен на рис. 1, а и б.

Конструкция фильтрующих модулей представляет собой цилиндры диаметром 10 см и высотой 20 см. Материалы загружали в модули послойно, разделяя слои диском из геотекстильного материала. Количество материала на слой составило для сунгулитсодержащих продуктов 400 г, для торфа – 100 г. В процессе работы выявлено, что в модуле со шламовым продуктом происходит застой воды, в связи с чем в эксперимент добавлены фильтрующие модули с меньшим количеством материала – 200 г на слой.

Опыт с фильтрующими модулями закладывали на экспериментальной площадке вблизи АО "Кольская ГМК". Участок предварительно был очищен от камней, веток и др. Модули заглубляли в слой грунта до совмещения уровней верхнего слоя модулей и поверхности участка (рис. 1, в и г); закладка модулей проведена в трехкратной повторности для каждого варианта опыта. Продолжительность эксперимента составила один год; описание вариантов эксперимента представлено в таблице.

Таблица. Описание вариантов эксперимента
Table. Description of experiment variants

Маркировка	Материал	Наличие контакта с почвой	Мт* исходного продукта	Мт продукта после эксперимента
I-Ш	Шламовый продукт	+	0,164	0,417
II-Ш		–		0,437
I-С	Зернистый сунгулитовый продукт	+	0,089	0,626
II-С		–		0,15
I-Ст	Термоактивированный сунгулитовый продукт	+	0,07	0,387
II-Ст		–		0,138
II-Т	Торф	–	0,086	2,012

Примечание. *Мт – модуль токсичности; $Mt = (\beta_{Cu} + \beta_{Ni}) \cdot 100 / (\beta_{Ca} + \beta_{Mg})$, где β – содержание компонента в материале, моль/кг.

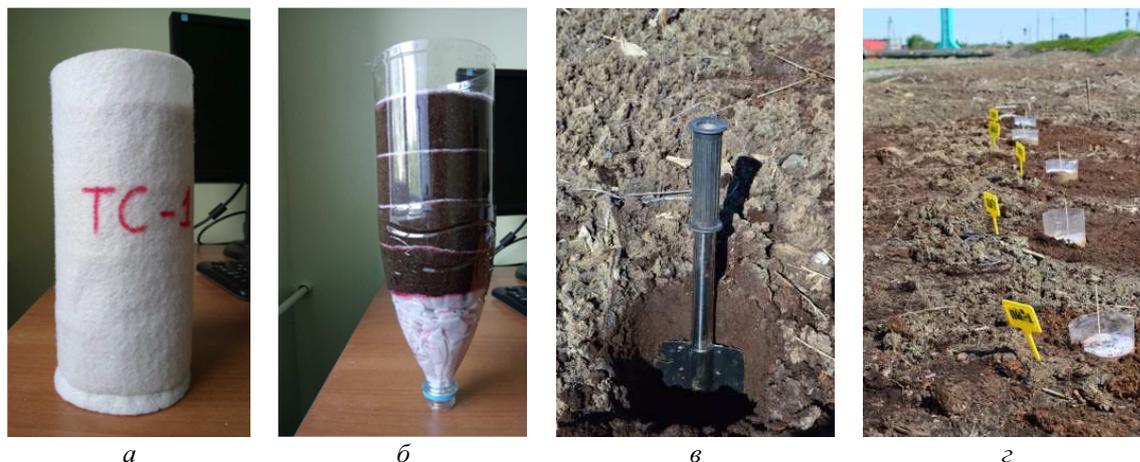


Рис. 1. Закладка фильтрующих модулей: а – модуль из геотекстильного материала; б – модуль из пластикового материала; в – углубление под модули; г – закладка модулей

Fig. 1. Experimental design with filtering containers: а – containers with the geotextile material; б – containers with the plastic material; в – pit for containers; г – experimental site

Методы проведения исследований

Послойное содержание кислоторастворимой (или условно-валовой) формы компонентов определено методом выщелачивания при соотношении 2 г анализируемого материала на 50 мл раствора; концентрация HNO_3 составила 1 моль/л. Аналитические работы выполнены в аккредитованной лаборатории химических и оптических методов анализа ИХТРЭМС КНЦ РАН на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой ELAN-9000 DRC-e (PerkinElmer, США).

Степень токсичности материалов оценивали по такому критерию, как модуль токсичности Мт (Slukovskaya et al., 2019). Данный критерий определяется как отношение суммарного мольного содержания меди и никеля к кальцию и магнию. Мт применяли для оценки свойств грунта в качестве интегрального показателя, включающего четыре основных компонента, оказывающих наибольшее влияние на характеристики почвенных субстратов данной территории: чем меньше значение Мт, тем ниже токсичность.

Результаты и обсуждение

Распределение металлов по профилю модулей частично открытого типа

Анализ распределения металлов по слоям торфяного модуля показывает, что в верхнем слое наблюдается интенсивное накопление никеля и меди (рис. 2). Содержание кобальта в торфе на один-два порядка меньше по сравнению с медью и никелем, однако и для него проявляется тот же процесс сорбции верхним слоем.

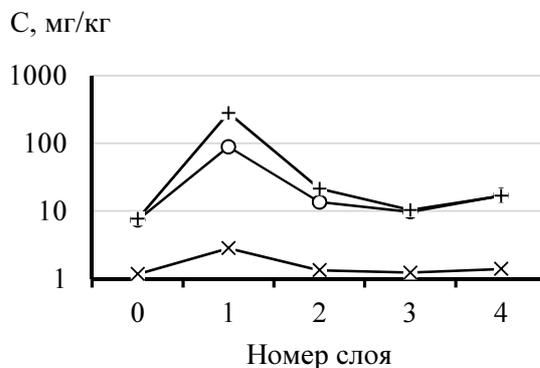


Рис. 2. Распределение металлов Ni (○), Cu (+) и Co (×) по глубине модуля с торфом.
Слой 0 соответствует характеристикам исходного материала, слой 1 – верхнему слою модуля
Fig. 2. The distribution of metals Ni (○), Cu (+) and Co (×) along the depth of the container with peat.
Layer 0 corresponds to the original peat material, layer 1 – to the top layer in the field experiment

В опыте со шламовым продуктом процесс накопления в первом слое является наиболее выраженным для меди; величина сорбции составляет 145 мг/кг (рис. 3). Следует отметить, что в исходном шламовом продукте содержание меди является низким и составляет 2 мг/кг. В отличие от меди никель обладает высоким сродством к магнезиальным силикатным минералам и может входить в состав как вермикулита, так и серпентиновых минералов, образуя минеральные фазы с высокой степенью замещения магния на никель, что подтверждается изначально высоким содержанием никеля в шламовом продукте (98 мг/кг). По сравнению с результатами, полученными для меди, сорбция никеля шламовым продуктом незначительна (30 мг/кг). С увеличением глубины отбора проб шламового продукта (слои 2–4) происходит постепенное снижение содержания меди; количество металла в сорбированной форме составляет соответственно 38, 16, 15 мг/кг. Никель в нижних слоях частично десорбируется в результате сдвига равновесия из-за уменьшения концентрации поступающего в них раствора. Аналогичная ситуация прослеживается в распределении кобальта по профилю фильтрующего модуля, однако степень выщелачивания элемента незначительна.

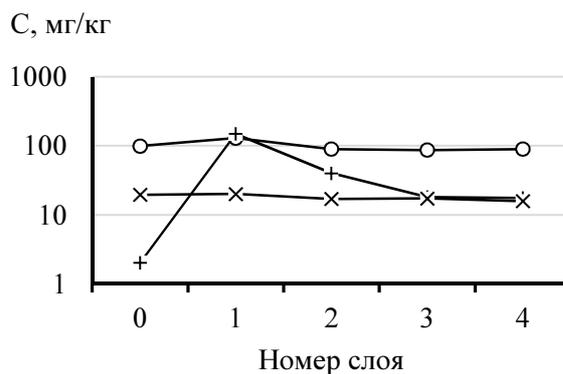


Рис. 3. Распределение металлов Ni (○), Cu (+) и Co (×) по глубине модуля со шламовым продуктом.
Слой 0 соответствует характеристикам исходного материала, слой 1 – верхнему слою модуля
Fig. 3. The distribution of metals Ni (○), Cu (+) and Co (×) along the depth of the container with slime product.
Layer 0 corresponds to the original slime material, layer 1 – to the top layer in the field experiment

Данные о распределении никеля по глубине слоя исходного зернистого продукта схожи с таковыми для шламового продукта (рис. 4). В первом слое химический состав продукта не изменяется, а из более глубоких слоев наблюдается частичное выщелачивание никеля. Для никеля и кобальта наблюдаются симбатные зависимости. Медь в первом слое сорбируется (28 мг/кг), но в меньших количествах по сравнению со шламовым продуктом, для которого данный показатель составляет 145 мг/кг. Указанные закономерности можно объяснить исходя из того, что высокодисперсный шламовый продукт обладает более высокой удельной поверхностью по сравнению с грубозернистым сунгулитовым материалом.

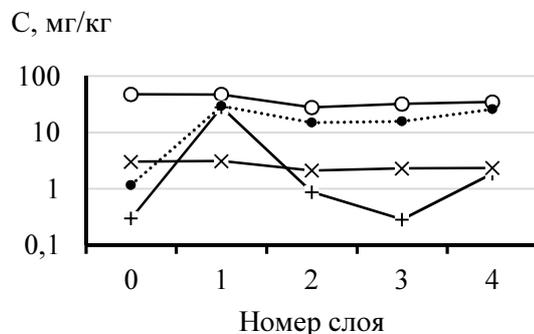


Рис. 4. Распределение металлов Ni (○), Cu (+), Co (×), Zn (•) по глубине модуля с зернистым продуктом.

Слой 0 соответствует характеристикам исходного материала, слой 1 – верхнему слою модуля

Fig. 4. The distribution of metals Ni (○), Cu (+) and Co (×), Zn (•) along the depth of the container with serpentine-reached grainy material. Layer 0 corresponds to the original serpentine-reached grainy material, layer 1 – to the top layer in the field experiment

Распределение металлов по профилю модулей открытого типа

В полностью открытых системах контакт материалов с высокозагрязненной почвой приводит к существенному увеличению сорбции металлов зернистыми продуктами (рис. 5). Результаты для сорбции меди термообработанным сунгулитовым продуктом в частично открытой системе не показаны, поскольку они совпадают с данными для исходного сунгулитового продукта. В частично открытой системе зернистые продукты никель практически не сорбируют, в то время как в открытой системе величина сорбции для первого слоя составляет 60 мг/кг. В еще большей степени при переходе к открытым условиям увеличивается поглощение зернистыми продуктами меди (до 150–230 мг/кг) по сравнению с величиной 28 мг/кг, полученной в условиях частично открытой системы.

Шламовый продукт в открытых системах уступает зернистым материалам по величине сорбции меди и никеля в первом слое, которая составляет для никеля 43 мг/кг, а для меди 96 мг/кг. Суммарное содержание металлов по слоям модулей со шламовым продуктом представлено на рис. 6. В полностью и частично открытых системах в первом слое наблюдается максимальное поглощение никеля и меди. Характер распределения металлов ниже по профилю модуля свидетельствует о частичном выщелачивании никеля из шламового продукта. Медь, в отличие от никеля, в слоях 2–4 накапливается, но в меньшей степени по сравнению с условиями в частично открытой системе.

Наличие в шламовом продукте нескольких компонентов, а также неопределенность состава растворов, с которыми взаимодействуют материалы, загруженные в модули, не позволяют дать исчерпывающее объяснение полученным данным. Можно лишь предположить, что шламовый продукт является насыщенным по никелю, что приводит к его десорбции при взаимодействии с растворами в слоях ниже первого слоя, поскольку поступающие в них растворы становятся менее концентрированными, пройдя очистку от металлов в первом слое.

Для использованных материалов рассчитан модуль токсичности Мт (см. таблицу). Проведенные ранее исследования, посвященные формированию фитоценозов с использованием горнопромышленных отходов, показали, что стократное превышение суммы молярного содержания макроэлементов относительно суммы металлов (Мт = 1) нейтрализует токсическое действие Cu и Ni на фотосинтетический аппарат растений, тогда как увеличение этого показателя в два раза (Мт = 2) приводит к угнетению фотосинтеза (Slukovskaya et al., 2019); т. е. чем меньше значение Мт, тем ниже токсичность материалов. По завершении эксперимента для торфа отмечается самая высокая степень токсичности (Мт ≈ 2), что может пагубно сказаться на росте растений при использовании данного материала в качестве загрузки для фитоадсорбционных площадок. Используемые минеральные материалы обладают более низкой токсичностью по сравнению с торфом. Так, наименьшей степенью токсичности обладает термообработанный сунгулитовый продукт (Мт = 0,1–0,4).

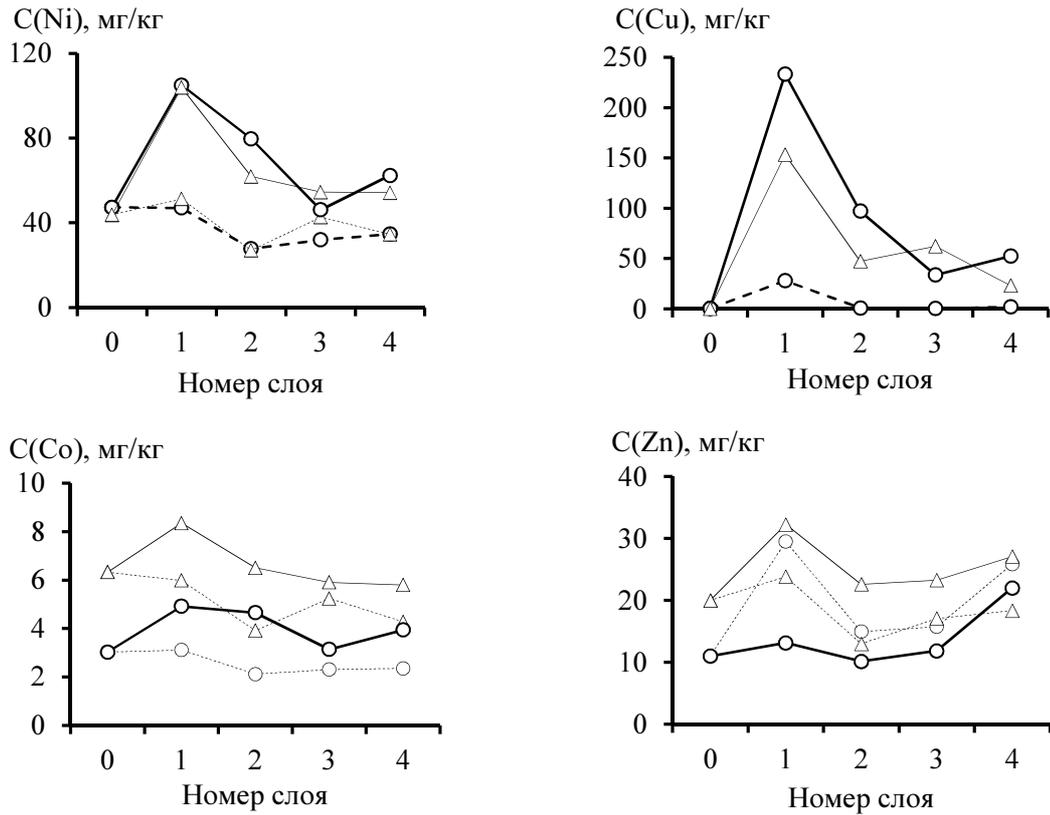


Рис. 5. Распределение металлов по глубине модулей с исходным (○) и термоактивированным (Δ) сунгулитовыми продуктами в полностью открытых (сплошная линия) и частично открытых (пунктир) системах. Слой 0 соответствует характеристикам исходного материала, слой 1 – верхнему слою модуля
 Fig. 5. Distribution of metals along the depth of containers with non-expanded (○) and expanded (Δ) serpentine material in open (solid line) and semi-open (dashed) systems, layer 0 corresponds to the characteristics of original material, layer 1 – to the upper layer in the field experiment

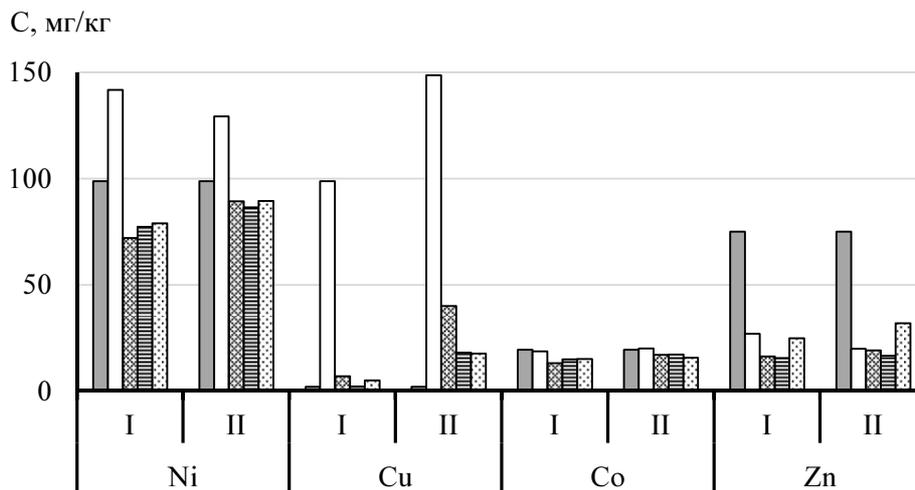


Рис. 6. Распределение металлов по глубине модуля со шламовым продуктом в открытых (I) и частично открытых (II) системах. Нумерация слоев: ■ 0 □ 1 ▨ 2 ▩ 3 ▪ 4.
 Слой 0 соответствует характеристикам исходного материала, слой 1 – верхнему слою модуля
 Fig. 6. The distribution of metals along the depth of the container with slime product in open (I) and semi-open (II) containers. Layer 0 corresponds to the original slime material, layer 1 – to the upper layer in the field experiment

Заключение

Таким образом, в частично открытых системах, т. е. при отсутствии контакта наполнителей модулей с почвенными растворами, наибольшей сорбционной способностью по отношению к никелю и меди обладает чистый торф. Несмотря на хорошие показатели поглотительной способности природного материала, спустя некоторое время (в данном случае – время проведения эксперимента) торф становится токсичным и его дальнейшее использование может пагубно повлиять на растения. Зернистый сунгулитовый продукт характеризуется меньшей активностью по сравнению с торфом. Для термообработанного сунгулитового продукта получены более высокие значения сорбции никеля и такой же, как и у исходного сунгулитового продукта, показатель сорбции меди. При использовании модулей открытого типа величина сорбции зернистыми продуктами увеличивается. На основании результатов полевого эксперимента, моделирующего взаимодействие сорбционно активных материалов с атмосферными осадками и почвенными растворами, можно сделать вывод о том, что для создания фитоадсорбционных площадок пригоден зернистый сунгулитовый продукт. Рассчитанный модуль токсичности также показал, что минеральная основа фитоадсорбционных площадок не будет оказывать токсичное действие на растения.

Конструирование фитоадсорбционных площадок предусматривает засаживание их травянистыми растениями с целью предотвращения размывания и пыления сорбционно активных материалов. Растения, помимо придания площадкам механической устойчивости, служат дополнительным биофильтром, поглощая экотоксиканты. Наблюдения за состоянием растительного покрова, сформированного на поверхности модулей, являются одной из важных задач будущих исследований.

Библиографический список

- Ананьева С. И., Белова Е. А., Булычев А. Г., Булычева И. А. [и др.]. Кольская горно-металлургическая компания (промышленные площадки "Никель" и "Заполярный"): влияние на наземные экосистемы / под ред. О. А. Хлебосоловой. Рязань : Голос губернии, 2012. 92 с.
- Кашулина Г. М. Аэротехногенная трансформация почв Европейского Субарктического региона : дис. ... д-ра биол. наук : 03.00.27. Апатиты, 2002. 158 с.
- Копчик Г. Н. Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение. 2014. № 7. С. 851–868. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0032180x14070077>.
- Кременецкая И. П., Алексеева С. А., Рухленко Е. Д., Лашук В. В. [и др.]. Материалы природоохранного назначения из отходов добычи флогопита // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19, № 2. С. 18–23.
- Кременецкая И. П., Лашук В. В., Волочковская Е. Ю., Дрогобужская С. В. [и др.]. Применение магниезильно-силикатного реагента для очистки от тяжелых металлов природно-антропогенных водных источников, расположенных в зоне воздействия ОАО "Кольская ГМК" (площадка Мончегорск) // Цветные металлы. 2012. № 7. С. 35–40.
- Кривицкий С. В. Методы биоинженерной геоэкологии при проведении экологической реабилитации природных объектов // Вестник МГСУ. 2009. № 4. С. 285–291.
- Нижегородов А. И. Развитие концепции энерготехнологических агрегатов для обжига вермикулитовых концентратов на базе электрических модульно-спусковых печей // Огнеупоры и техническая керамика. 2014. № 1/2. С. 36–44.
- Joseph L., Jun B.-M., Flora J. R. V., Park C. M. [et al.]. Removal of heavy metals from water sources in the developing world using low-cost materials: A review // Chemosphere. 2019. Vol. 229. P. 142–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.198>.
- Nizhegorodov A. I. Theory and practical use of modular-pouring electric furnaces for firing vermiculite // Refractories and Industrial Ceramics. 2015. Vol. 56. P. 361–365. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11148-015-9848-7>.
- Slukovskaya M. V., Vasenev V. I., Ivashchenko K. V., Morev D. V. [et al.]. Technosols on mining wastes in the subarctic: Efficiency of remediation under Cu-Ni atmospheric pollution // International Soil and Water Conservation Research. 2019. Vol. 7. P. 297–307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.04.002>.

References

- Ananeva, S. I., Belova, E. A., Bulychev, A. G., Bulycheva, I. A. et al. 2012. Kola mining and metallurgical company ("Nickel" and "Zapolyarny" industrial sites): The impact on the land ecosystems. Ryazan. (In Russ.)
- Kashulina, G. M. 2002. Aerotechnogenic soil transformation of the European Subarctic region. Ph.D. Thesis. Apatity. (In Russ.)
- Koptsik, G. N. 2014. Modern approaches to remediation of heavy metal polluted soils: A review. *Eurasian Soil Science*, 7, pp. 851–868. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0032180x14070077>. (In Russ.)
- Kremenetskaya, I. P., Alekseeva, S. A., Rukhlenko, E. D., Lashchuk, V. V. et al. 2015. Materials of the nature-conservative indentation from the phlogopite mining waste. *Ecology and Industry of Russia*, 19(2), pp. 18–23. (In Russ.)

- Kremenetskaya, I. P., Laschuk, V. V., Volochkovskaya, E. Yu., Drogobuzhskaya, S. V. et al. 2012. Magnesia-silicate reagent for treating natural water from heavy metals emitted from the Kola mining and metallurgical company (Monchegorsk area). *Non-ferrous Metals Journal*, 7, pp. 35–40. (In Russ.)
- Krivitskiy, S. V. 2009. Methods of bioengineering geoecology during environmental rehabilitation of natural objects. *Vestnik MGSU*, 4, pp. 285–291. (In Russ.)
- Nizhegorodov, A. I. 2014. Concept development of energy technology units for firing vermiculite based on electric modular-pouring furnaces. *Refractories and technical ceramics*, 1/2, pp. 36–44. (In Russ.)
- Joseph, L., Jun, B.-M., Flora, J. R. V., Park, C. M. et al. 2019. Removal of heavy metals from water sources in the developing world using low-cost materials: A review. *Chemosphere*, 229, pp. 142–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.198>.
- Nizhegorodov, A. I. 2015. Theory and practical use of modular-pouring electric furnaces for firing vermiculite. *Refractories and Industrial Ceramics*, 56, pp. 361–365. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11148-015-9848-7>.
- Slukovskaya, M. V., Vasenev, V. I., Ivashchenko, K. V., Morev, D. V. et al. 2019. Technosols on mining wastes in the subarctic: Efficiency of remediation under Cu-Ni atmospheric pollution. *International Soil and Water Conservation Research*, 7, pp. 297–307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.04.002>.

Сведения об авторах

Мосендз Ирина Александровна – ул. Ферсмана, 14, Мурманская обл., г. Апатиты, 184209; Кольский научный центр РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: ia.mosendz@ksc.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3129-7305>

Irina A. Mosendz – 14, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Kola Science Centre RAS, Junior Researcher; e-mail: ia.mosendz@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3129-7305>

Кременецкая Ирина Петровна – ул. Академгородок, 26а, Мурманская обл., г. Апатиты, 184209; Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: i.kremenetskaia@ksc.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3531-8273>

Irina P. Kremenetskaya – 26а, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials KSC RAS, Cand. Sci., (Engineering), Senior Researcher; e-mail: i.kremenetskaia@ksc.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3531-8273>

Дрогобужская Светлана Витальевна – ул. Академгородок, 26а, Мурманская обл., г. Апатиты, 184209; Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН, канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: s.drogobuzhskaia@ksc.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1699-7584>

Svetlana V. Drogobuzhskaya – 26а, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, 184209; Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials KSC RAS, Cand. Sci. (Chemistry), Senior Researcher; e-mail: s.drogobuzhskaia@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1699-7584>

Алексеева Светлана Александровна – ул. Ферсмана, 24, Мурманская обл., г. Апатиты, 184209; Горный институт КНЦ РАН, науч. сотрудник; e-mail: alekseeva@goi.kolasc.net.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0183-9345>

Svetlana A. Alekseeva – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, 184209; Mining Institute KSC RAS, Research Associate; e-mail: alekseeva@goi.kolasc.net.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0183-9345>