

УДК 550.47:579.66

Оценка мобильности элементов из хвостов флотации отвальных медеплавильных шлаков в водный раствор под влиянием силикатных бактерий

А. Л. Котельникова, О. В. Воропаева, Е. С. Золотова*

*Институт геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия;
e-mail: zolotova@igg.uran.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5892-9205>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
24.02.2026;

принята
к публикации
03.04.2026

Ключевые слова:

миграция элементов,
медеплавильные шлаки,
утилизация отходов,
хвосты флотации,
биовыщелачивание,
тяжелые металлы,
силикатные бактерии

Утилизация и безопасное захоронение отходов цветной металлургии – важная и актуальная экологическая задача. Хвосты флотации отвальных литых медеплавильных шлаков представляют собой тонкодисперсный (менее 0,05 мм) механоактивированный материал, содержащий повышенную концентрацию меди, цинка и других халькофильных элементов. Бактериальное выщелачивание хвостов проводили с помощью силикатных бактерий, выделенных из разных источников (минеральные агрегаты горы Соколиный камень, лежалые хвосты флотации медеплавильных шлаков, мхи и лишайники) и растущих на среде Зака при температуре 25 ± 2 °C в течение месяца. Для анализа водного раствора использована масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (NexION 300S). Установлено, что на растворимость компонентов хвостов оказывают влияние интенсивность перемешивания, временной фактор, а также вид штамма. Максимальное повышение концентрации элементов в растворе наблюдалось для железа – на пятые сутки, для фосфора, калия, кальция, меди и свинца – на девятнадцатые сутки. Миграционная активность цинка и кадмия увеличивается со временем, что связано с дезинтеграцией стекла силикатными бактериями. Максимальная подвижность кремния, цинка, кадмия и фосфора в водных растворах наблюдалась в присутствии силикатных бактерий, выделенных из лишайников. Железо и свинец были более подвижны в присутствии бактерий, выделенных из мхов. Натрий, калий, кальций и магний интенсивнее выщелачивались в присутствии силикатных бактерий, выделенных из лежалых хвостов. Дополнительно проведен сравнительный анализ растворимости хвостов флотации в дистиллированной воде, в питательной среде Зака с силикатными бактериями и без них. Полученные результаты представляют интерес для разработки способов утилизации и безопасного захоронения минеральных хвостов цветной металлургии.

Для цитирования

Котельникова А. Л. и др. Оценка мобильности элементов из хвостов флотации отвальных медеплавильных шлаков в водный раствор под влиянием силикатных бактерий. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 2. С. 275–283. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-2-275-283>.

Evaluation of the element's mobility from copper smelting slags flotation tailings into an aqueous solution under the influence of silicate bacteria

Alla L. Kotelnikova, Olga V. Voropaeva, Ekaterina S. Zolotova*

*A. N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch RAS, Yekaterinburg, Russia;
e-mail: zolotova@igg.uran.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5892-9205>

Article info

Received
24.02.2026;

accepted
03.04.2026

Key words:

element migration,
copper smelter slags,
waste disposal,
flotation tailings,
bioleaching,
heavy metals,
silicate bacteria

Abstract

Recycling and safe disposal of non-ferrous metallurgy wastes is an important and pressing environmental issue. The flotation tailings of cast copper smelting slags are a finely dispersed (less than 0.05 mm), mechanically activated material containing an increased concentration of copper, zinc and other chalcophilic elements. Bacterial leaching of the tailings has been carried out using silicate bacteria isolated from various sources (mineral aggregates of Sokoliny Kamen mountain, stale flotation tailings of copper smelting slags, mosses and lichens) and grown on Zak's medium at a temperature of 25 ± 2 °C for a month. Inductively coupled plasma mass spectrometry (NexION 300S) is used to analyze the aqueous solution. It has been established that the solubility of the tailings components is influenced by the intensity of mixing, time factor, and type of strain. The maximum increase in the concentration of elements in the solution has been observed for iron on the fifth day, and for phosphorus, potassium, calcium, copper and lead on the nineteenth day. The migration activity of zinc and cadmium increases over time, which is associated with the disintegration of glass by silicate bacteria. The maximum mobility of silicon, zinc, cadmium, and phosphorus in aqueous solutions has been observed in the presence of silicate bacteria isolated from lichens. Iron and lead are more mobile in the presence of bacteria isolated from mosses. Sodium, potassium, calcium, and magnesium are more intensively leached in the presence of silicate bacteria isolated from stale tailings. Additionally, a comparative analysis of the solubility of flotation tailings in distilled water, in Zak's nutrient medium with and without silicate bacteria has been carried out. The obtained results are of interest for the development of methods for the disposal and safe burial of mineral tailings from non-ferrous metallurgy.

For citation

Kotelnikova, A. L. et al. 2026. Evaluation of the element's mobility from copper smelting slags flotation tailings into an aqueous solution under the influence of silicate bacteria. *Vestnik of MSTU*, 29(2), pp. 275–283. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-2-275-283>.

Введение

Отходы металлургической промышленности занимают огромные территории по всему миру и представляют существенную опасность для окружающей среды (Dzotova et al., 2025). Разработка наиболее эффективных методов утилизации и безопасного захоронения отходов является актуальной задачей для устойчивого развития промышленных регионов и улучшения их экологии (Qin et al., 2025).

Одним из методов переработки медеплавильных шлаков является метод флотации (Zhou et al., 2021). Хвосты обогащения представляют собой тонкодисперсный (размер частиц менее 0,05 мм) механоактивированный материал, который содержит повышенную концентрацию меди, цинка и других халькофильных элементов (Котельникова и др., 2018). Из-за содержания тяжелых металлов их применение крайне ограничено и большая часть отходов передается на захоронение. Однако хвосты флотации целесообразно рассматривать как потенциальное техногенное сырье (Gümüşsoy et al., 2023).

Биовыщелачивание металлов из минеральных объектов характеризуется простотой, невысокими капитальными затратами, низким энергопотреблением и экологической безопасностью по сравнению с традиционными пирометаллургическими способами и химическим выщелачиванием (Schueler et al., 2024). Этот метод эффективен для руд с низким содержанием металлов и техногенных отходов. Основные недостатки применения биотехнологий – большая продолжительность процесса, зависимость от условий окружающей среды (температура, pH, Eh), необходимость контроля за ростом микроорганизмов, а также риск попадания вредных веществ в окружающую среду, поскольку деятельность бактерий может увеличивать мобильность токсичных элементов.

Достаточно хорошо разрабатывается применение мезофильных бактерий для бактериального выщелачивания отходов медеплавильного производства. Больше всего внимания уделяется влиянию ацидофильных (Behera et al., 2022; Brar et al., 2024) и тионовых бактерий (Mikoda et al., 2019; Potysz et al., 2021) на медеплавильные шлаки.

Медеперерабатывающий завод АО "Алмалыкский ГМК" (Узбекистан) ведет работы по внедрению технологии кучного бактериального выщелачивания крупнопесочной фракции хвостов флотации медно-обогатительной фабрики с использованием ацидофильной ассоциации железо- и сероокисляющих бактерий с преобладанием *Acidithiobacillus ferrooxidans*¹. Сохранение высокой численности ацидофильной ассоциации бактерий позволяет вести выщелачивание и в зимний период. Тем не менее низкие среднегодовые температуры на территории России затрудняют применение биовыщелачивания для извлечения полезных компонентов из минерального сырья.

При извлечении цветных металлов из сложного медного концентрата применимы комбинированные методы бактериально-химического выщелачивания с использованием ассоциации умеренно термофильных микроорганизмов, включающей бактерии рода *Sulfobacillus* и архей *Ferroplasma acidiphilum* (Муравьев и др., 2011).

Ацидофильная ассоциация железо- и сероокисляющих бактерий используется для биоокисления Fe^{2+} и сульфидной серы. Для биодеструкции силикатов эффективны силикатные бактерии. Достаточно подробно рассмотрено применение силикатных бактерий для кварцсодержащих бедных руд (Пурэвдаш и др., 2011; Дарьин и др., 2015). В этих работах представлены существующие теории о жизнедеятельности и рекультивации микроорганизмов данного типа, возможные механизмы их воздействия на кварцсодержащие руды. Эксперименты по длительному выщелачиванию кварца и некоторых силикатов с помощью *Bacillus mucilaginosus* показали высокую интенсивность этого процесса, намного превышающую скорость и интенсивность абиогенного процесса (Васючков и др., 2011; Lin et al., 2018). В результате исследований установлено, что наиболее интенсивно выщелачивается кварц с примесными дефектами – тетраэдрическим алюминием, вызывающим ослабление Si-O-Al связей, т. е. интенсивность процесса зависит от степени кристалличности (низкая степень кристалличности образцов наиболее благоприятна, в отличие от аморфных разновидностей SiO_2). Процесс разрушения минералов силикатными бактериями интенсифицируется ферментативно и по аналогии с другими микроорганизмами (например, тионовыми бактериями) является жизнеобеспечивающим. Будучи гетеротрофами, силикатные микроорганизмы активно развиваются на органических (углеводных) соединениях – сахарозе, глюкозе, окисляя их до CO_2 и H_2O . При отсутствии органического "питания" силикатные бактерии способны существовать и размножаться на кристаллических силикатах (Цыренов и др., 2015). В этом случае метаболизм клетки протекает с участием транспорта электронов с более низкопотенциальной системы (силикаты) на более высокопотенциальную (органические структуры самого микроорганизма).

¹ Санакулов К. С., Хасанов А. С. Переработка шлаков медного производства. Ташкент : Фан, 2007. 238 с.

Проблема, связанная с выяснением роли микроорганизмов и продуктов их метаболизма в деструкции силикатов и образовании вторичных минералов, актуальна не только с точки зрения извлечения полезных компонентов из бедных руд и техногенных образований, но и с точки зрения встраивания продуктов техногенеза в природные биогеоценозы. Встраивание продуктов техногенеза в природные биогеоценозы сопряжено с перераспределением техногенного вещества в системе техногенный минеральный субстрат – водный раствор – почва – биота (микроорганизмы, грибы, растения, животные).

Ранее нами были выявлены особенности миграции элементов из хвостов флотации отвальных литых медеплавильных шлаков и продуктов их переработки (кеков) в почвенно-растительную систему (Золотова и др., 2020; Котельникова и др., 2022; Zolotova et al., 2025).

Цель данного исследования заключается в оценке мобильности элементов из хвостов флотации отвальных литых медеплавильных шлаков в водный раствор под влиянием силикатных бактерий. Новизна и значимость исследования обусловлена тем, что на настоящий момент крайне мало исследований взаимодействия отходов цветной металлургии с силикатными бактериями.

Материалы и методы

Объектами исследования выступали хвосты флотации отвальных шлаков Среднеуральского медеплавильного завода ("технические пески"). Их вещественный состав был подробно изучен ранее (Котельникова и др., 2018). Химический состав представлен на рис. 1. Тяжелые металлы в основном сосредоточены в штейне и шпейзе в виде сульфидов и интерметаллидов (Котельникова и др., 2018).

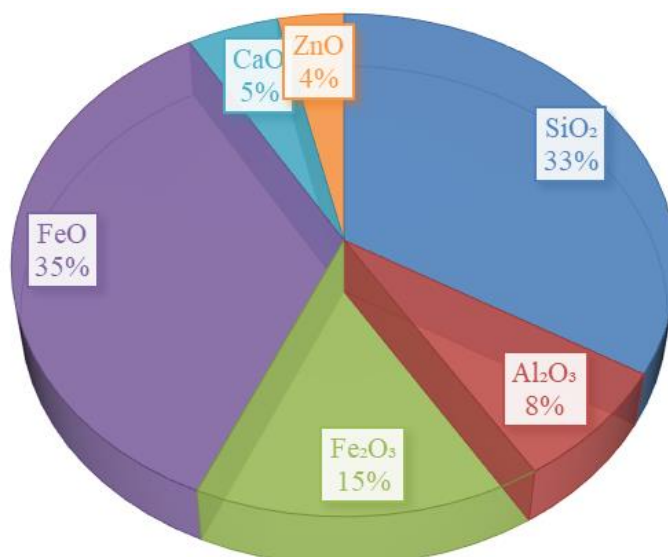


Рис. 1. Химический состав хвостов флотации отвальных шлаков Среднеуральского медеплавильного завода, мас.%

Fig. 1. The chemical composition of flotation tailings of the Sredneuralsk copper smelter slags, wt.%

Бактериальное выщелачивание "технических песков" проводилось на базе Института естественных наук и математики Уральского федерального университета (кафедра экспериментальной биологии и биотехнологий, лаборатория микробиологии). Для оценки воздействия различных силикатных бактерий на хвосты флотации медеплавильных шлаков и условий биовыщелачивания было проведено два лабораторных эксперимента: в 2011 г. совместно с профессором, кандидатом биологических наук Н. Н. Фирсовым; в 2024 г. – совместно со старшим преподавателем кафедры О. В. Воропаевой (табл. 1).

Для выделения и культивирования бактерий, а также для дальнейшего проведения биовыщелачивания, бактерии выращивали на селективной среде Зака следующего состава (г/л): сахара – 20; MgSO₄*7H₂O – 0,15; NaCl – 0,15; MnSO₄ – 0,05; FeSO₄ – 0,05; CaCO₃ – 2,0; калийалюмосиликат – 2,0; Ca₃(PO₄)₂ – 15. Для плотной среды добавляли 1,5 % бактериологического агара. Чистую культуру силикатных бактерий выделяли путем многократных пересевов изолированных колоний, выросших на плотной питательной среде Зака, чередуя их с посевом на жидкую среду с предварительным прогревом клеток и спор до 100 °С в течение 15 мин.

Биовыщелачивание проводили в круглых плоскодонных колбах объемом 250 мл, куда помещали "технические пески" и бактериальную культуру. Условия эксперимента отмечены в табл. 1. Дополнительно

при тех же условиях проводили эксперименты по миграции элементов из хвостов флотации в дистиллированную воду.

Таблица 1. Условия лабораторных экспериментов по биовыщелачиванию хвостов флотации медеплавильных шлаков силикатными бактериями
Table 1. Conditions of laboratory experiments on bioleaching of copper smelting slag flotation tailings with silicate bacteria

Условия	Эксперимент 2011 г.	Эксперимент 2024 г.
Штаммы силикатных бактерий	с поверхности образцов лежалых "технических песков", мхов и лишайников	с поверхности минеральных агрегатов (гора Соколиный камень, Средний Урал)
Питательная среда	селективная среда Зака	селективная среда Зака
Температура	25±2 °С	25±2 °С
Перемешивание	нет	постоянное перемешивание 180 об/мин
Соотношение Т : Ж ("технические пески" : бактериальная культура)	1 : 9	1 : 5
Длительность	30 суток	33 суток

Химический анализ водного раствора (надосадочной культуральной жидкости) проводили в Центре коллективного пользования "Геоаналитик" Института геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого УрО РАН с использованием метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на квадрупольном масс-спектрометре NexION-300S.

Результаты и обсуждение

В условиях лабораторного эксперимента по биовыщелачиванию хвостов флотации медеплавильных шлаков в присутствии силикатных бактерий, выделенных с поверхности минеральных агрегатов горы Соколиный камень, установлено увеличение подвижности элементов в водном растворе в зависимости от временного фактора (рис. 2).

Максимальное повышение концентрации элементов в растворе наблюдалось на пятые сутки – для железа (с 0,05 до 0,19 мг/л), на девятнадцатые сутки – для фосфора (с 2,79 до 4,49 мг/л), калия (с 0,1 до 11,88 мг/л), кальция (с 514,9 до 615,8 мг/л), меди (с 0,68 до 1,64 мг/л) и свинца (с 0,003 до 0,021 мг/л). Содержание в растворе остальных элементов изменялось в течение месяца постепенно, но с разной направленностью. Увеличение концентраций с первого по 33 день наблюдалось для натрия (с 105,5 до 127 мг/л), магния (с 70,28 до 84,29 мг/л), кадмия (с 0,01 до 0,05 мг/л), а уменьшение – для кремния (с 34,4 до 12,98 мг/л) и алюминия (с 0,47 до 0,01 мг/л). Изменение содержания цинка в растворе носило экспоненциальный характер, с максимальным содержанием в конце эксперимента (рис. 2).

Ранее польскими исследователями проведено сравнение бактериального выветривания таких элементов как кремний, железо, медь, цинк и свинец из двух типов медных шлаков (кристаллический литой шлак и гранулированный аморфный шлак) в биотических растворах, содержащих *Pseudomonas aeruginosa*, и в абиотических (стерильная питательная среда и сверхчистая вода). Эксперимент показал более высокие концентрации элементов (от 20 до 99 %) в присутствии бактерий (Potysz et al., 2016). Мы также решили провести сравнительный анализ растворимости хвостов флотации в дистиллированной воде, в питательной среде Зака с силикатными бактериями и без них (табл. 2). Установлено как существенное влияние культурального раствора с бактериями, так и питательной среды на подвижность всех исследованных элементов (табл. 2). Присутствие силикатных бактерий в растворе в третьей декаде месяца существенно замедлило подвижность меди и цинка по сравнению со стерильной питательной средой. Мобильность железа в растворе с бактериями оказалась более низкой не только в сравнении с питательной средой, но и с водой (табл. 2).

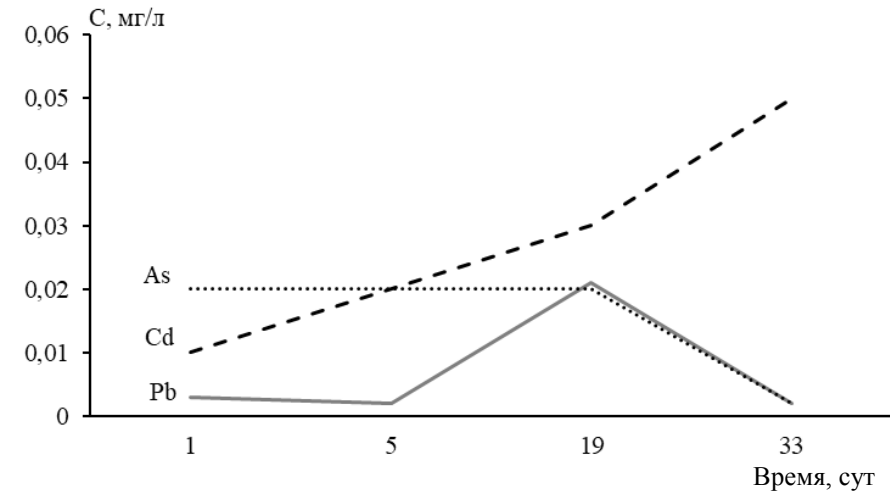
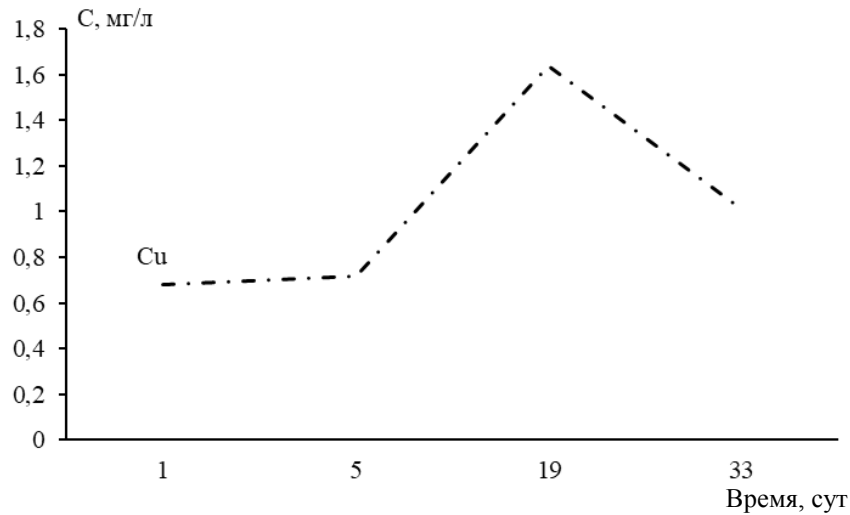
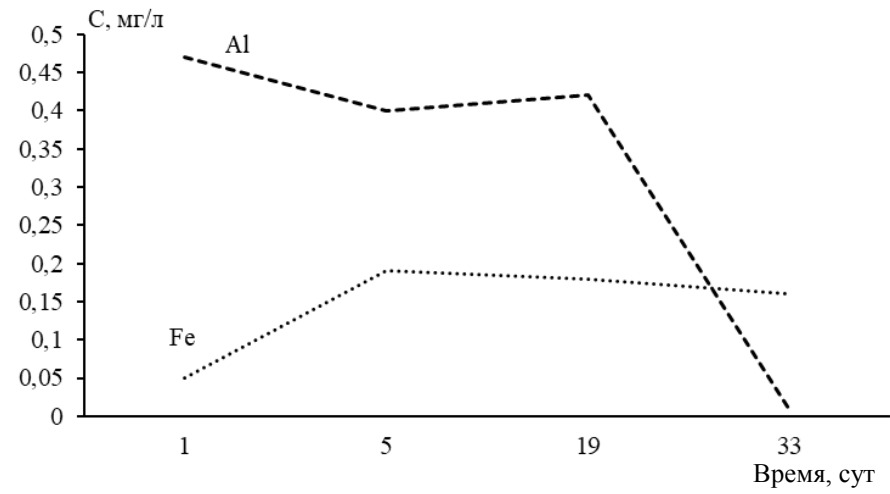
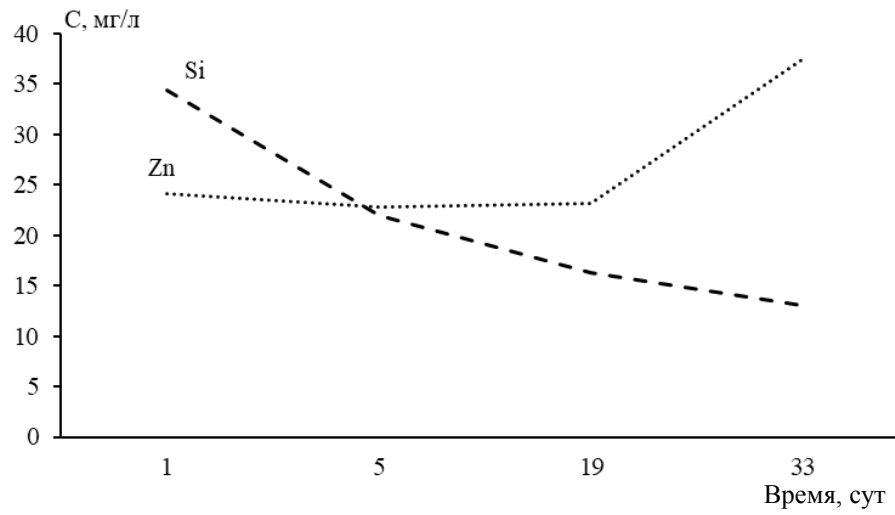


Рис. 2. Изменение концентрации элементов в надосадочной культуральной жидкости от времени при выщелачивании хвостов флотации медеплавильных шлаков силикатными бактериями, полученными из горной породы, мг/л
 Fig. 2. Change in the concentration of elements in the supernatant culture liquid over time during leaching of copper smelting slag flotation tailings by silicate bacteria obtained from rock, mg/L

Таблица 2. Миграция элементов из хвостов флотации медеплавильных шлаков в воду и водный раствор с силикатными бактериями на девятнадцатые сутки
 Table 2. Migration of elements from copper smelting slag flotation tailings into water and an aqueous solution with silicate bacteria on the nineteenth day

Состав жидкой фазы	Концентрация элементов, мг/л					
	Si	Al	Fe	Cu	Zn	Cd
Вода	1,52	0,22	0,72	0,16	1,94	0,00
Питательная среда	19,51	2,65	3,80	3,38	50,06	0,02
Культуральная жидкость с силикатными бактериями	16,26	2,53	0,18	1,64	23,21	0,03

Примечание. Соотношение Т : Ж ("технические пески" : раствор) составило 1 : 5.

Лабораторный эксперимент по биовыщелачиванию, проведенный в 2011 г., позволил изучить подвижность элементов из хвостов флотации медеплавильных шлаков в водный раствор (надосадочную культуральную жидкость) в присутствии разных штаммов силикатных бактерий, выделенных из лишайников, мхов и лежалых "технических песков". Максимальная подвижность кремния, цинка, кадмия и фосфора в водных растворах наблюдалась в присутствии силикатных бактерий, выделенных из лишайников (рис. 3). Железо и свинец были более подвижны в присутствии силикатных бактерий, выделенных из мхов. Натрий, калий, кальций и магний интенсивнее выщелачивались в присутствии силикатных бактерий, выделенных из лежалых хвостов. Мобильность серы незначительно зависела от изученных штаммов силикатных бактерий. Содержание мышьяка оставалось постоянным в опытах с силикатными бактериями, выделенными из хвостов флотации и мхов, и было минимальным при воздействии бактерий из лишайников (рис. 3).

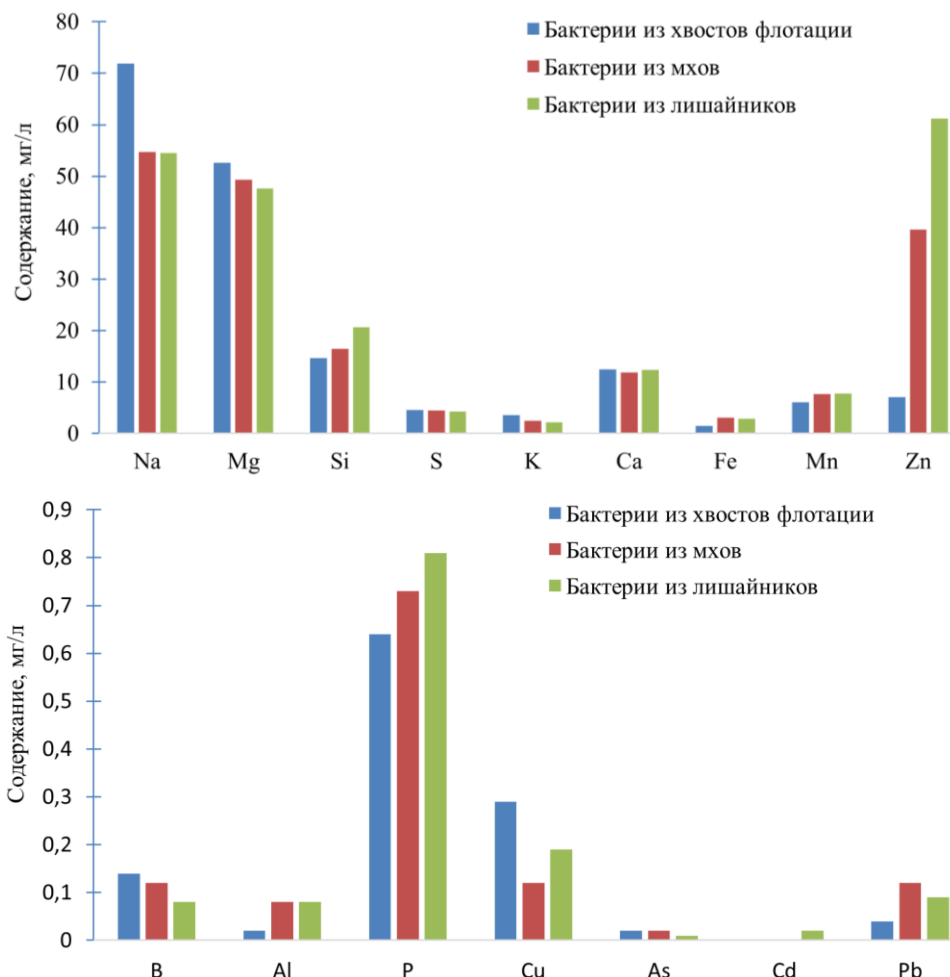


Рис. 3. Изменение концентрации элементов в водном растворе (надосадочной культуральной жидкости) при выщелачивании хвостов флотации медеплавильных шлаков разными штаммами силикатных бактерий за 30 суток без перемешивания, мг/л

Fig. 3. Change in the concentration of elements in an aqueous solution (supernatant culture liquid) during leaching of copper smelting slag flotation tailings by different strains of silicate bacteria for 30 days without stirring, mg/L

Заключение

В лабораторном эксперименте получены новые данные о подвижности элементов из хвостов флотации отвалных литых шлаков Среднеуральского медеплавильного завода под воздействием силикатных бактерий. Проведен сравнительный анализ растворимости хвостов флотации в дистиллированной воде, в питательной среде Зака с силикатными бактериями и без них. Установлено, что на растворимость компонентов хвостов оказывают влияние интенсивность перемешивания, временной фактор, а также вид штамма. Миграционная активность цинка и кадмия увеличивается со временем, что связано с дезинтеграцией стекла силикатными бактериями. Максимальная подвижность кремния, цинка, кадмия и фосфора в водных растворах наблюдалась в присутствии силикатных бактерий, выделенных из лишайников. Железо и свинец были более подвижны в присутствии бактерий, выделенных из мхов. Натрий, калий, кальций и магний интенсивнее выщелачивались в присутствии силикатных бактерий, выделенных из лежалых хвостов.

Полученные результаты представляют интерес для разработки способов утилизации и безопасного захоронения минеральных хвостов цветной металлургии. Требуются дальнейшие комплексные исследования для разработки эффективной технологии биовыщелачивания отходов флотации медеплавильных шлаков.

Благодарности

Авторы глубоко признательны Н. Н. Фирсову, известному уральскому микробиологу, за помощь в проведении экспериментов, Д. В. Киселевой (Институт геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого (ИГГ УрО РАН)) – за определение элементного состава образцов.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН, тема № 123011800011-2.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Васючков Ю. Ф., Стулишенко А. Ю. Анализ бактериальных культур для дезинтеграции угольного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 11. С. 190–197. EDN: ONMMVH.
- Дарьин А. А., Максимова А. В., Теляков А. Н., Фукс А. М. Изучение механизма деструктивного воздействия силикатных бактерий на кварцсодержащие руды // Обогащение руд. 2015. № 4(358). С. 8–12. DOI: <https://doi.org/10.17580/or.2015.04.02>. EDN: ULVDNB.
- Золотова Е. С., Рябинин В. Ф., Котельникова А. Л., Иванова Н. С. Оценка мобильности элементов из отходов переработки медеплавильных шлаков в лесные почвы // Литосфера. 2020. Т. 20, № 5. С. 717–726. DOI: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-5-717-726>. EDN: ZSABLA.
- Котельникова А. Л., Золотова Е. С., Рябинин В. Ф. Миграция элементов из отходов переработки медеплавильных шлаков в систему торф – растения // Литосфера. 2022. Т. 22, № 1. С. 135–147. DOI: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-1-135-147>. EDN: RSQPUL.
- Котельникова А. Л., Рябинин В. Ф. Особенности вещественного состава и перспективы использования отходов вторичной переработки отвалных медеплавильных шлаков // Литосфера. 2018. Т. 18, № 1. С. 133–139. DOI: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-1-133-139>. EDN: VZPVKX.
- Муравьев М. И., Фомченко Н. В., Кондратьева Т. Ф. Биогидрометаллургическая технология получения меди из сложного медного концентрата // Прикладная биохимия и микробиология. 2011. Т. 47, № 6. С. 663–671. EDN: ONGBOL.
- Пурэвдаш М., Салтыкова С. Н., Афанашенко Е. С., Теляков Н. М. Воздействие силикатных бактерий на минеральные составляющие промышленных руд // Обогащение руд. 2011. № 1. С. 15–18. EDN: NCSXET.
- Цыренов В. Ж., Гомбоева С. В., Мункуева Б. Д. Морфолого-физиологические характеристики выделенных силикатных и фосфатмобилизирующих бактерий // Вестник ВСГУТУ. 2015. № 5(56). С. 56–62. EDN: UUXORZ.
- Behera S. K., Panda S. K., Mulaba-Bafubandi A.-F. Valorization of copper smelter slag through the recovery of metal values by a synergistic bioprocess system of bio-flotation and bio-leaching // Environmental Quality Management. 2022. Vol. 32, Iss. 1. P. 233–241. DOI: <https://doi.org/10.1002/tqem.21885>.
- Brar K. K., Magdouli S., Perreault N. N., Tanabene R. [et al.]. Reviving riches: Unleashing critical minerals from copper smelter slag through hybrid bioleaching approach // Minerals. 2024. Vol. 14, Iss. 11. Article number: 1094. DOI: <https://doi.org/10.3390/min14111094>.
- Dzotova S., Atajanov G. The impact of fine-dispersed metallurgical waste on environmental pollution // American Journal of Applied Science and Technology. 2025. Vol. 5, Iss. 4. P. 28–32. DOI: <https://doi.org/10.37547/ajast/Volume05Issue04-07>.

- Gümüşsoy A., Başyığıt M., Kart E. U. Economic potential and environmental impact of metal recovery from copper slag flotation tailings // *Resources Policy*. 2023. Vol. 80. Article number: 103232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103232>.
- Lin M., Lei S., Pei Z., Liu Y. [et al.]. Application of hydrometallurgy techniques in quartz processing and purification: A review // *Metallurgical Research & Technology*. 2018. Vol. 115, Iss. 3. P. 303. DOI: <https://doi.org/10.1051/metal/2017105>.
- Mikoda B., Potysz A., Kmiecik E. Bacterial leaching of critical metal values from Polish copper metallurgical slags using *Acidithiobacillus thiooxidans* // *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 236. P. 436–445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.032>.
- Potysz A., Grybos M., Kierczak J., Guibaud G. [et al.]. Bacterially-mediated weathering of crystalline and amorphous Cu-slugs // *Applied Geochemistry*. 2016. Vol. 64. P. 92–106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.07.011>.
- Potysz A., Mikoda B., Napieraj M. (Bio)dissolution of glassy and diopside-bearing metallurgical slags: Experimental and economic aspects // *Minerals*. 2021. Vol. 11, Iss. 3. Article number: 262. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11030262>.
- Qin Z., Xiao J., Zhang J., Zou K. Practical experience to theoretical innovation: A model for recovering metal resources from industrial solid waste – A case study of copper smelting slag // *Separation and Purification Technology*. 2025. Vol. 354, Part 7. Article number: 129395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129395>.
- Schueler T. A., Schippers A., Goldmann D. Bioleaching for metals removal from mine tailings flotation fractions // *Hydrometallurgy*. 2024. Vol. 225. Article number: 106286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106286>.
- Zhou H., Liu G., Zhang L., Zhou C. Mineralogical and morphological factors affecting the separation of copper and arsenic in flash copper smelting slag flotation beneficiation process // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 401. Article number: 123293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.1232>.
- Zolotova E., Kotelnikova A. Elements migration from the flotation tailings of copper smelter slags after leaching to the soil and plant // *Pollution*. 2025. Vol. 11, Iss. 1. P. 161–174. DOI: <https://doi.org/10.22059/poll.2024.377322.2400>.

References

- Vasyuchkov, Yu. F., Stulishenko, A. Yu. 2011. The analysis of bacterial cultures for coal massif disintegration. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 11, pp. 190–197. EDN: ONMMVH. (In Russ.)
- Daryin, A. A., Maksimova, A. V., Telyakov, N. M., Fuks, A. M. 2015. Study of silicate bacterial destructive effect on quartziferous ores. *Obogashchenie Rud*, 4(358), pp. 8–12. DOI: <https://doi.org/10.17580/or.2015.04.02>. EDN: ULVDNB. (In Russ.)
- Zolotova, E. S., Ryabinin, V. F., Kotelnikova, A. L., Ivanova, N. S. 2020. Assessment of element mobility from copper smelting waste slag into forest soils. *Lithosphere (Russia)*, 20(5), pp. 717–726. DOI: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-5-717-726>. EDN: ZSABLA. (In Russ.)
- Kotelnikova, A. L., Zolotova, E. S., Ryabinin, V. F. 2022. The migration of elements from the processing waste of copper smelting slags into the ombrotrophic peat and plants. *Lithosphere (Russia)*, 22(1), pp. 135–147. DOI: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-1-135-147>. EDN RSQPUL. (In Russ.)
- Kotelnikova, A. L., Ryabinin, V. F. 2018. The composition features and perspective of use for the copper slag recycling waste. *Lithosphere (Russia)*, 18(1), pp. 133–139. DOI: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-1-133-139>. EDN: VZPVKX. (In Russ.)
- Muravyov, M. I., Fomchenko, N. V., Kondratieva, T. F. 2011. Biohydrometallurgical technology of copper recovery from a complex copper concentrate. *Prikladnaya Biokhimiya i Mikrobiologiya*, 47(6), pp. 663–671. EDN: ONGBOL. (In Russ.)
- Purevdash, M., Saltykova, S. N., Afanaschenko, E. S., Telyakov, N. M. 2011. Effect of silicate bacteria on mineral constituents of commercial ores. *Obogashchenie Rud*, 1, pp. 15–18. EDN: NCSXET. (In Russ.)
- Tsyrenov, V. Zh., Gomboeva, S. V., Munkueva, B. D. 2015. Morphological and physiological characteristics of selected silicate and phosphate bacteria. *ESSUTM Bulletin*, 5(56), pp. 56–62. EDN: UUXORZ. (In Russ.)
- Behera, S. K., Panda, S. K., Mulaba-Bafubandi, A.-F. 2022. Valorization of copper smelter slag through the recovery of metal values by a synergistic bioprocess system of bio-flotation and bio-leaching. *Environmental Quality Management*, 32(1), pp. 233–241. DOI: <https://doi.org/10.1002/tqem.21885>.
- Brar, K. K., Magdoul, S., Perreault, N. N., Tanabene, R. et al. 2024. Reviving riches: Unleashing critical minerals from copper smelter slag through hybrid bioleaching approach. *Minerals*, 14(11). Article number: 1094. DOI: <https://doi.org/10.3390/min14111094>.
- Dzotova, S., Atajanov, G. 2025. The impact of fine-dispersed metallurgical waste on environmental pollution. *American Journal of Applied Science and Technology*, 5(4), pp. 28–32. DOI: <https://doi.org/10.37547/ajast/Volume05Issue04-07>.

- Gümüşsoy, A., Başıyigit, M., Kart, E. U. 2023. Economic potential and environmental impact of metal recovery from copper slag flotation tailings. *Resources Policy*, 80. Article number: 103232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103232>.
- Lin, M., Lei, S., Pei, Z., Liu, Y. et al. 2018. Application of hydrometallurgy techniques in quartz processing and purification: A review. *Metallurgical Research & Technology*, 115(3), pp. 303. DOI: <https://doi.org/10.1051/metal/2017105>.
- Mikoda, B., Potysz, A., Kmiecik, E. 2019. Bacterial leaching of critical metal values from Polish copper metallurgical slags using *Acidithiobacillus thiooxidans*. *Journal of Environmental Management*, 236, pp. 436–445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.032>.
- Potysz, A., Grybos, M., Kierczak, J., Guibaud, G. et al. 2016. Bacterially-mediated weathering of crystalline and amorphous Cu-slugs. *Applied Geochemistry*, 64, pp. 92–106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.07.011>.
- Potysz, A., Mikoda, B., Napieraj, M. 2021. (Bio)dissolution of glassy and diopside-bearing metallurgical slags: Experimental and economic aspects. *Minerals*, 11(3). Article number: 262. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11030262>.
- Qin, Z., Xiao, J., Zhang, J., Zou, K. 2025. Practical experience to theoretical innovation: A model for recovering metal resources from industrial solid waste – A case study of copper smelting slag. *Separation and Purification Technology*, 354(7). Article number: 129395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129395>.
- Schueler, T. A., Schippers, A., Goldmann, D. 2024. Bioleaching for metals removal from mine tailings flotation fractions. *Hydrometallurgy*, 225. Article number: 106286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106286>.
- Zhou, H., Liu, G., Zhang, L., Zhou, C. 2021. Mineralogical and morphological factors affecting the separation of copper and arsenic in flash copper smelting slag flotation beneficiation process. *Journal of Hazardous Materials*, 401. Article number: 123293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.1232>.
- Zolotova, E., Kotelnikova, A. 2025. Elements migration from the flotation tailings of copper smelter slags after leaching to the soil and plant. *Pollution*, 11(1), pp. 161–174. DOI: <https://doi.org/10.22059/poll.2024.377322.2400>.

Сведения об авторах

Котельникова Алла Леонидовна – ул. Акад. Вонсовского, 15, г. Екатеринбург, Россия, 620016;
Институт геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого УрО РАН,
канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: kotelnikova@prm.uran.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4968-1938>

Alla L. Kotelnikova – 15 Acad. Vonsovsky Str., Yekaterinburg, Russia, 620016;
A. N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch RAS,
Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Senior Researcher;
e-mail: kotelnikova@prm.uran.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4968-1938>

Воропаева Ольга Викторовна – ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, Россия, 620062;
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
Институт естественных наук и математики, старший преподаватель;
e-mail: olga.voropaeva@urfu.ru

Olga V. Voropaeva – 19 Mira Str., Yekaterinburg, Russia, 620062;
Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,
Institute of Natural Sciences and Mathematics of, Senior Lecturer;
e-mail: olga.voropaeva@urfu.ru

Золотова Екатерина Сергеевна – ул. Акад. Вонсовского, 15, г. Екатеринбург, Россия, 620016;
Институт геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого УрО РАН,
канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: zolotova@igg.uran.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5892-9205>

Ekaterina S. Zolotova – 15 Acad. Vonsovsky Str., Yekaterinburg, Russia, 620016;
A. N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch RAS,
Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher;
e-mail: zolotova@igg.uran.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5892-9205>