

ИЗУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МЕДНОГО ШЛАКА ПО СТЕПЕНИ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ КАЛЬЦИЯ И МАГНИЯ В УСЛОВИЯХ МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

М.В. Шабанов¹, М.С. Маричев¹

¹ Санкт-Петербургский государственный аграрный университет,
Пушкин, Россия, e-mail: m.s.marichev@yandex.ru

Аннотация: Представлено исследование по изучению выщелачивания медного шлака моделированной дождевой водой для оценки потенциальных экологических рисков на экосистемы. Цель исследования – оценка возможности выщелачивания кальция и магния из гранулированного медного шлака имитированными кислыми осадками, встречающимися в условиях повышенной техногенной нагрузки. Материалом исследования является гранулированный медный шлак разной дисперсности. В лабораторных условиях по принципу перколяции проведены испытания шлака имитированными кислыми осадками, содержащими серную кислоту разной концентрации. В полученных элюатах проводилось измерение pH, а также определение кальция и магния. Испытания проб шлака проводились методами порошковой рентгеновской дифракции и электронного зондирования с энергодисперсионным микроанализом. В минералогическом отношении шлак состоит из минералов группы силикатов, стекловидной и шпинелеподобных фаз, а также второстепенных сульфидных минералов. Эксперимент по выщелачиванию при разных pH растворов показал, что шлак подвержен двум основным процессам: диффузии и растворению. На этапе диффузии не происходит заметных изменений pH элюатов, на этапе растворения наблюдается смещение реакции среды в среднем на 2,5 ед. pH до нейтральной реакции. С увеличением времени суммарная концентрация кальция в элюатах растет и к концу эксперимента возрастает от 871,9 до 2573,9 мг/л. Способность выщелачивания магния из шлака значительно меньше из-за его присутствия в массе шлака в шпинелеподобных фазах. Выявлено, что на первых этапах при увеличении pH кислых осадков способность к выщелачиванию магния возрастает в первые 70 суток эксперимента, к моменту завершения уменьшается в 3,5 раза. Во всех вариантах эксперимента по истечению 70 суток количество выщелачиваемого магния не увеличивается. Проведенные исследования свидетельствуют о высокой активности медных шлаков в отношении окружающей среды, особенно в регионах интенсивного техногенеза и частого выпадения кислых осадков. Практическая значимость полученных результатов может способствовать корректировке технологии получения техногенных минеральных образований, последующей их переработки и способов складирования на местности. Полученные знания и научные обоснования с выявлением экологических рисков на компоненты окружающей среды могут способствовать разработке новых концепций по обращению с промышленными отходами и землепользованию.

Ключевые слова: техногенез, шлак, потенциальные экологические риски, выщелачивание кальция и магния, объекты накопленного вреда, загрязнение почв, техногенные минеральные образования.

Благодарность: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-77-00021, <https://rscf.ru/project/25-77-00021/> в Санкт-Петербургском государственном аграрном университете.

Для цитирования: Шабанов М. В., Маричев М. С. Изучение устойчивости медного шлака по степени выщелачивания кальция и магния в условиях модельного эксперимента // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10. – С. 101–113. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_10_0_101.

Stability analysis of copper slag by degree of leaching of calcium and magnesium in model experiment

M.V. Shabanov¹, M.S. Marichev¹

¹ Saint-Petersburg State Agrarian University, Pushkin, Russia,
e-mail: m.s.marichev@yandex.ru

Abstract: Copper slag leaching by model rain water is analyzed with a view to assessing potential environmental risks. The aim of the research is to estimate leachability of calcium and magnesium from granulated copper slags by simulation of acid precipitation occurrent under conditions of high anthropogenic load. The subject of research is granulated copper slag of different degree of dispersion. The lab-scale testing of slag involved percolation of simulated acid precipitation containing sulfuric acid of various concentration. The eluates were used to measure pH, as well as calcium and magnesium contents. Samples of slag were subjected to powder X-ray diffraction, electronic probing and energy-dispersive microanalysis. Mineralogically, the test slag contains silicate minerals, vitreous and spinel-like phases, as well as secondary sulfide minerals. The leaching tests at different values of solution pH shows that slag experiences two main processes: diffusion and dissolution. At the stage of diffusion, no noticeable changes in pH are observed in the eluates; at the stage of dissolution, reaction shifts on the average by 2.5 pH units toward the neutral reaction. With increase in time, the total concentration of calcium grows in the eluates and elevates from 871.9 to 2573.9 mg/l by the end of the testing. Magnesium leachability from the slag is much weaker because of the presence of spinel-like phases in it. Initially, with increasing pH in acid precipitation, magnesium leachability increases in the first 70 days of the testing and drops by 3.5 times by the time of the test completion. After 70 days of the experimentation, the amount of leached magnesium increases in neither scenario. The implemented research proves high activity of copper slags towards the environment, especially in the regions of intense technogenesis and frequent acid precipitation. The practical relevance of the research findings consists in fostering of technological adjustment of production, processing and storage of manmade minerals. The obtained knowledge and obtained evaluations with the identification of the environmental risks can facilitate development of new concepts of industrial waste management and land utilization.

Key words: technogenesis, slag, potential environmental risks, calcium and magnesium leaching, accumulated damage objects, soil pollution, manmade mineral formations.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 25-77-00021, <https://rscf.ru/project/25-77-00021/>, and was carried out at the Saint-Petersburg State Agrarian University.

For citation: Shabanov M. V., Marichev M. S. Stability analysis of copper slag by degree of leaching of calcium and magnesium in model experiment. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(10):101–113. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_10_0_101.

Введение

Добыча полезных ископаемых и связанная с ней переработка и обогащение руды могут оказывать заметное воздействие на окружающую среду. В зависимости от множества сопутствующих факторов на месте добычи и переработки, таких как климатические особенности, геоморфологические условия, развитость и индустриализация района [1], потенциальные экологические риски на данных территориях могут значительно усиливаться.

Современная горнодобывающая и перерабатывающая деятельность на данном этапе не лишена отходов, которые, как правило, размещаются в хранилищах и специализированных полигонах, вблизи индустриальных центров. Данные участки складирования должны в полной мере удовлетворять экологическим требованиям, связанным со строительством, эксплуатацией, надзором и управлением. Однако в ряде случаев из-за отсутствия полной изоляции с компонентами окружающей среды могут формироваться потоки рассеяния загрязняющих веществ в смежные экосистемы [2–4].

Часть отходов горнопромышленной деятельности, такие как шлаки, образованные в результате плавки руд цветных металлов, являются потенциальными системами, которые способны мобилизовать высокие концентрации металлов [5, 6]. Такие шлаки традиционно считаются относительно нереакционноспособными материалами, так как потенциальные загрязнители заключены в кристаллическую структуру силикатов, оксидов и стекловидные формы и характеризуются низкой растворимостью. В работах ряда ученых [7] для изучения потенциального поведения элементов в твердых отходах, образованных после плавки руды, была реализована методика селективного выщелачивания.

Результаты данных работ демонстрируют потенциальную инертность элементов при выщелачивании силикатных медных шлаков. Позднее Котельниковым [8] проводились аналогичные, но более долгосрочные исследования (в течение 15 сут), в результате которых было выявлено, что шлак является источником поступления в окружающую среду щелочноземельных элементов и ряда анионов. Исследования зарубежных авторов также подтвердили неустойчивость медных шлаков, являющихся источником металлов и металлоидов и создающих потенциальную угрозу для окружающей среды [9].

Существует множество различных тестов с целью определения мобилизации загрязняющих веществ путем выщелачивания медных силикатных шлаков [10–15]. Упрощенные схемы испытаний используют для экспресс-скрининга путем выщелачивания загрязняющих веществ [16] аммонийно-ацетатным буфером при коротком времени контакта твердой фазы шлака и раствора. Однако время является ключевым фактором, влияющим на выщелачивание загрязняющих веществ, краткосрочность исследования не дает исчерпывающей информации об опасности шлака, особенно при их складировании в интенсивных техногенных условиях в течение десятков лет. В результате в промышленных районах с периодичностью выпадения кислых осадков интенсивность выщелачивания силикатного медного шлака может нести циклический характер за счет формирования на поверхности твердой массы шлака различного рода барьеров, препятствующих процессам выщелачивания.

Минералогический состав тела шлака формируется в зависимости от условий и технологии плавки металла из руды и, как правило, сложный по химическому и минералогическому составу. В свою очередь, согласно исследовани-

ям ряда ученых [17 – 19], состав основной массы тела медных шлаков представлен стеклофазами разного химического состава: фаялитом, ферритом, алюмосиликатами и сульфидами, среди которых на долю кальция и магния может приходиться до 10%. В результате в процессе выщелачивания шлака, переходя в раствор, данные элементы могут ослаблять действие кислотных агентов. В связи с чем целью данного исследования является оценка степени выщелачивания кальция и магния из гранулированного медного шлака имитированными кислыми осадками в период длительного времени.

Материалы и методы

Для изучения выщелачивания тяжелых металлов из медного силикатного шлака были отобраны свежие образцы из шлакоотвала, складированного на северной окраине города Карабаш Челябинской области (рис. 1).

Данные шлаки образованы в процессе плавки руды с целью получения черновой меди. С поверхностной толщи шлакоотвала (0 – 15 см) был произведен отбор проб с разных мест. Для исследований пробу смешивали и усредняли.

До заложения опыта и по его окончании проводилось исследование усредненной пробы шлака с получением изображений микроструктуры: элементный микроанализ на растровом электронном микроскопе Tescan VEGA II LMU, интегрированном с системой энергодисперсионного микроанализа (EDX) INCA ENERGY 450/XT. Минералогический состав изучался с помощью порошкового рентгеновского анализа с излучением CuK_α с использованием дифрактометра, оснащенного медной трубкой, работающего при 40 кВ и 40 мА.

Кинетика выщелачивания образцов исследовалась методом перколяции, шлак массой 267 г помещали в делительные воронки, которые периодически прома-



Рис. 1. Схема отбора проб медного силикатного шлака, г. Карабаш

Fig. 1. Sampling scheme for copper silicate slag, Karabash

чивали имитированной дождевой водой (кислые осадки). Расчет объема моделированной дождевой воды проводили с учетом выпадения на территории складирования шлакоотвала среднегодового количества осадков в жидком эквиваленте. Вследствие того, что комбинат и шлакоотвал расположены в межгорной котловине, с частым застойно-вихревым воздушным режимом, на данной мест-

ности формируются кислые осадки в результате повышенных концентраций сернистого газа в атмосфере, который при взаимодействии с атмосферной влагой образует серную кислоту. В результате на отвал выпадает дождевая вода с исходной концентрацией серной кислоты в среднем $1 \cdot 10^{-4}$ моль-экв/л.

Для моделирования процесса ускоренного гидролиза отвалной массы во

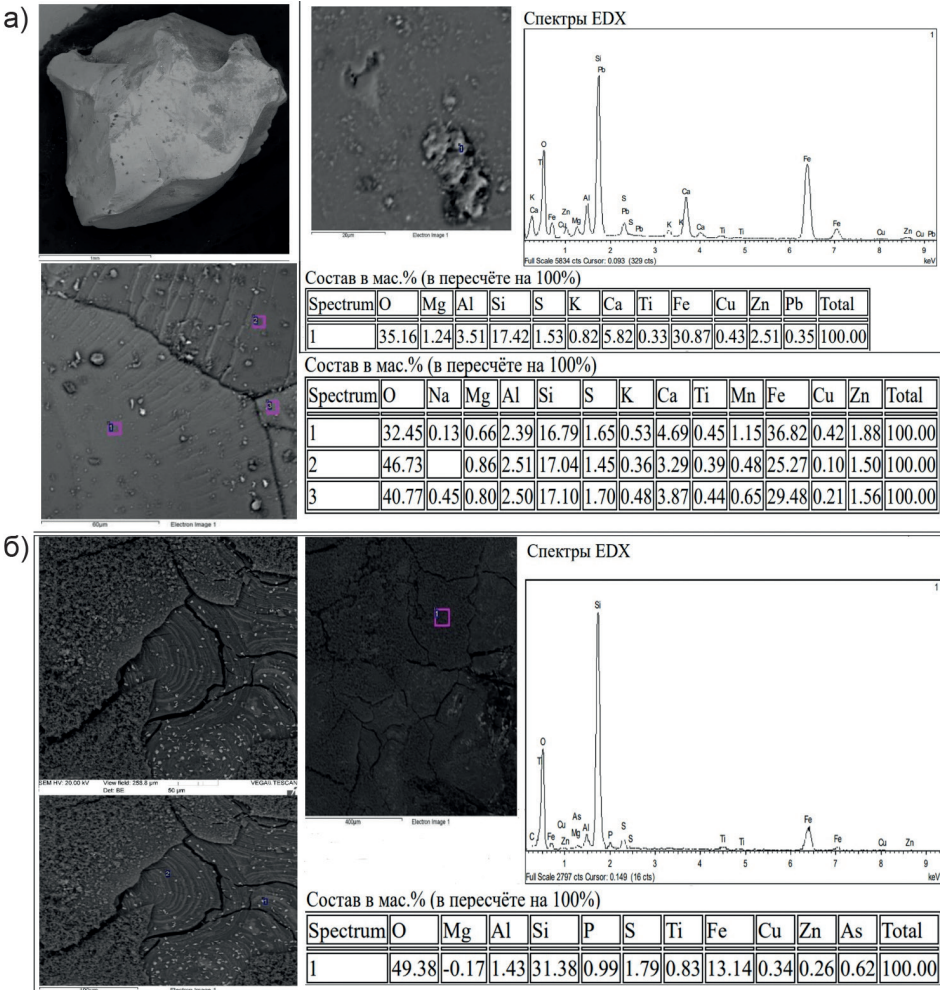


Рис. 2. Микроснимки поверхности исследуемого шлака и его химический состав: до промывания имитированными кислыми осадками (а); после 294 дней промывания имитированными кислыми осадками с концентрацией $H_2SO_4 = 1 \cdot 10^{-2}$ моль-экв/л (б)

Fig. 2. Micrographs of the surface of the studied slag and its chemical composition: before washing with simulated acidic precipitation (a); after 294 days of washing with simulated acidic precipitation at a concentration of $H_2SO_4 = 1 \cdot 10^{-2}$ mol-eq/L (b)

времени использовались имитированные кислые осадки, приготовленные на основе дистиллированной воды с добавлением серной кислоты до концентраций $1 \cdot 10^{-4}$; $1 \cdot 10^{-3}$; $1 \cdot 10^{-2}$ моль-экв/л — рН 4,04; 2,96 и 2,09 ед. соответственно. Время взаимодействия раствора осадков со шлаком составляло 14 сут, после чего элюат отделялся от твердой фазы шлака и затем вновь заливался свежей порцией кислых осадков.

Время контакта кислых осадков и шлака в 14 сут было определено с учетом среднего значения коэффициента фильтрации шлака 3,3 м/сут, определенного в полевых условиях по скорости фильтрации водного столба. Исходя из расчетов, что средняя высота шлакоотвала составляет 32 м, в течение 10 сут дождевая вода с поверхности отвала может достигнуть основания, но, учитывая наличие в отвальной массе различных литологических и геохимических барьеров, теоретическое время было увеличено до 14 сут. Эксперимент проводили в лабораторных условиях при постоянной температуре окружающей среды +25 °С. Для каждого из четырех исследуемых вариантов было выполнено по 21 последовательному циклу промывки, в трехкратном повторении. Один из вариантов включал в себя промывку дистиллированной водой рН 7,0 ед.

Определение кальция и магния в элюатах осуществляли методом комплексонометрии, измерение кислотности растворов — на иономере рН-150МИ.

Результаты и обсуждение

Морфологически шлак представляет собой неоднородный по гранулометрическому составу материал. Агрегаты характеризуются широким диапазоном размеров: от пылевидной фракции <0,1 мм до щебня 10 мм. Минеральный скелет обладает развитой пористой структурой, трещиноватостью, наличием каверн и

поверхностных выцветов. По данным рентгенофазового анализа основными компонентами шлака являются Fe (24—36%), Si (16—17%), Ca (3,2—5,8%), концентрации Mg и K не превышают менее 1% (рис. 2). В минералогическом составе присутствуют фаялит, шпинелеподобные фазы и анортит, силикаты цинка (виллемит), а также сульфидные соединения, такие как халькопирит, халькозин и гринокит, которые находятся в незначительных количествах [20].

Наличие в минеральной части шлака орторомбической кристаллической фазы определяет его физико-химические свойства, формирует определенные свойства шлака, которые могут изменяться при контакте с растворами определенной активности ионов водорода. Так, при рН в диапазоне 4—7 ед. формируется один активный компонент — кальций, который переходит в раствор. При увеличении рН до 10 ед. увеличивается количество депротонизированных форм и скорость перехода кальция в раствор замедляется, о чем в своих работах упоминают отечественные и зарубежные исследователи [21, 22].

Многолетними исследованиями европейских ученых [23] выявлены закономерности в изменении степени и скорости выщелачивания минералов с изменением рН среды. В ходе проведенных работ установлено, что уровень рН полученных элюатов в целом имеет прямую зависимость от концентрации имитированных кислых осадков; чем больше активность кислоты в растворе, тем меньше значения рН в элюатах после обработки (рис. 3).

В первые 50 сут периодического промывания имитированными кислыми осадками кислотность элюатов снижается, затем в последующие 90 сут вновь наблюдается заметный рост (см. рис. 3). По истечении 180 сут цикличность повторяется со средней периодичностью

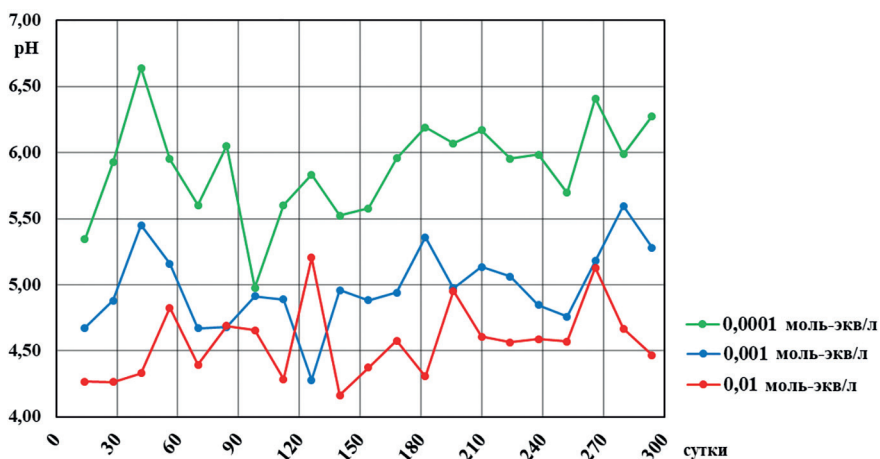


Рис. 3. Кинетические кривые изменения pH среды в элюатах

Fig. 3. Kinetic curves of pH changes in eluates

увеличения и уменьшения pH элюатов через каждые 30 сут. Данная цикличность, вероятно, связана с неоднородностью кристаллической структуры шлака и, как следствие, постепенного выщелачивания кальция и магния в раствор.

В растворах с концентрацией $H_2SO_4 = 1 \cdot 10^{-4}$ моль-экв/л в течение всего эксперимента pH изменяется в пределах от 4,74 до 7,10, среднее значение составляет 5,88 ед. В элюате с концентрацией $H_2SO_4 = 1 \cdot 10^{-3}$ моль-экв/л средний уровень pH равен 4,99 ед., изменения в диапазоне от 4,5 до 5,63 ед. В элюатах с $H_2SO_4 = 1 \cdot 10^{-2}$ моль-экв/л средние значения pH составляют 4,57 ед., при достижении минимальных и максимальных значений в ходе эксперимента от 3,96 до 5,48 ед.

При контакте шлака с имитированными атмосферными осадками кислые растворы проникают в поровое пространство и микротрещины шлака посредством диффузии, где и происходит их взаимодействие с поверхностью материала. Согласно полученным данным кинетики изменения pH, в первые сутки кислотность раствора уменьшается до 6,5–4,2 ед., что указывает на растворение кристаллической структуры и

высвобождение ионов, способных к нейтрализации кислоты. В дальнейшем в результате диффузии кислый раствор доходит до центра массы шлака и реагирует с новыми поверхностями тела шлака. По истечении 50 сут диффузионные процессы почти полностью замедляются, что приводит к снижению pH до 5,5–3,9 ед., а в течение последующих 90 дней средние значения pH сохраняются на данном уровне (см. рис. 3).

В момент, когда из поровой жидкости вымыт весь нейтрализующий материал, кислотность раствора усиливается. В последующие 90 дней идет растворение минеральной матрицы шлака, до тех пор, пока в раствор не перейдет новая порция компонентов, позволяющая нейтрализовать ионы водорода, присутствующие в растворе.

В отдельных случаях снижение кислотности раствора связано с относительно более высоким переходом в раствор концентраций щелочноземельных металлов, в частности катионов кальция и магния. Посредством процессов солюбилизации, в зависимости от количества кислоты и ее активности в растворе, распад материала может в значительной степени усиливаться, что приве-

дет к увеличению перехода в раствор катионов металлов.

В процессе исследований максимальный переход кальция и магния в раствор наблюдался в варианте с использованием кислых осадков с концентрацией серной кислоты $1 \cdot 10^{-2}$ моль-экв/л и составлял для кальция — 148,3 мг/л, магния — 319,1 мг/л (см. рис. 3; рис. 4).

Согласно данным рентгенфазового анализа, в состав шлака входит силикат кальция [24]. При взаимодействии с водным раствором кислых атмосферных осадков на поверхности шлака могут формироваться гидратные оболочки, способствующие постепенному вытеснению ионов Ca^{2+} в раствор. По мере удаления кальция из структуры кристаллической решетки происходит разрушение минералов и, как следствие, вытеснение сопутствующих элементов, входящих в его состав. В результате в гетерогенных растворах, в присутствии серной кислоты, могут формироваться комплексные соединения.

Как видно из рис. 4, динамика выщелачивания кальция из шлака при взаимодействии с имитированной дождевой водой имеет цикличность. Происходит постепенное усиление степени выщелачивания с периодичностью 90–100 сут

во всех вариантах. Затем, по истечении 120–150 сут эксперимента, происходит значительный спад скорости перехода кальция в раствор, с последующим ростом на протяжении 50–60 сут. В последующий временной интервал с 210 сут до окончания эксперимента происходит снижение интенсивности выщелачивания кальция в раствор.

В результате проведения эксперимента суммарный вынос кальция из шлака в вариантах с использованием имитированных кислых осадков с концентрацией серной кислоты $1 \cdot 10^{-2}$, $1 \cdot 10^{-3}$ и $1 \cdot 10^{-4}$ моль-экв/л соответственно равен 2573,9 мг; 1731,1 мг и 871,9 мг из массы шлака 267 г.

Содержание магния в кристаллической структуре шлака находится в пределах 1% (см. рис. 2). Скорость его выщелачивания, аналогично кальцию, будет регламентироваться теми же процессами. Однако концентрация магния в структуре кристаллической решетки меньше, и он менее прочно закреплен в шпинелеподобных структурах. Как видно из данных кинетики выщелачивания (см. рис. 3; рис. 5), переход магния в раствор элюата лимитируется значениями pH. Как следует из графика на рис. 5, в первые 28 дней в варианте с наименьшей

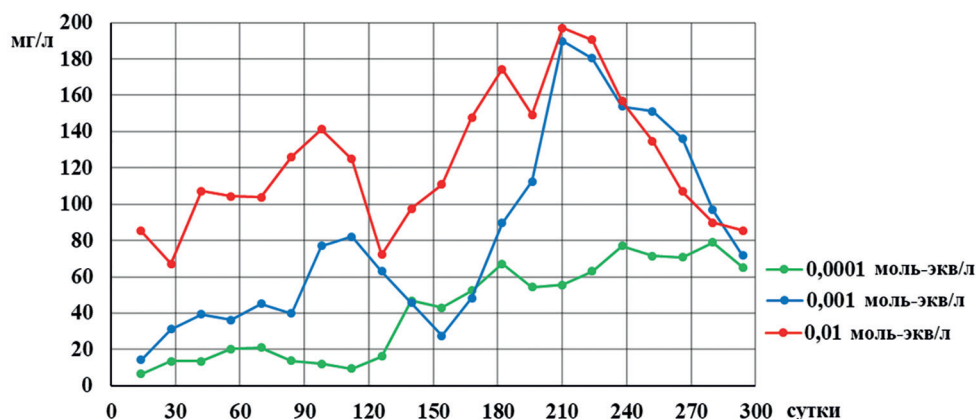


Рис. 4. Кинетические кривые выщелачивания кальция из шлака

Fig. 4. Kinetic curves of calcium leaching from slag

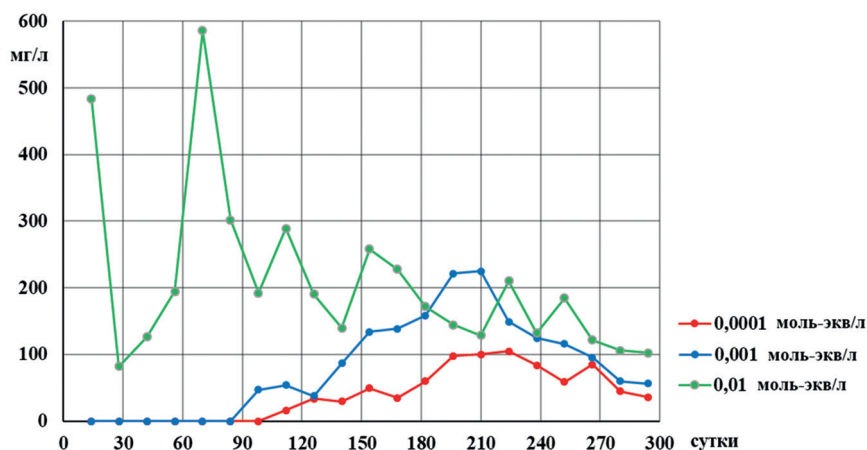


Рис. 5. Кинетические кривые выщелачивания магния из шлака

Fig. 5. Kinetic curves of magnesium leaching from slag

концентрацией серной кислоты отсутствовал вынос магния в раствор элюата. При pH 6,0–6,5 ед. видно, что происходит усиление выщелачивания магния из шлака, при снижении pH до 5,5 ед. — уменьшение. Однако при увеличении концентрации серной кислоты до 10^{-3} – 10^{-2} моль-экв/л. зависимость выноса магния от концентрации имеет осциллирующий тип. Максимум выноса магния приходится при достижении pH раствора до 6,0–6,5 ед.

В ходе проведения эксперимента общие показатели выщелачивания магния из шлака с 10^{-2} , 10^{-3} и 10^{-4} моль-экв/л серной кислотой соответственно равны 4374,39 мг; 1703,46 мг и 834,52 мг из массы шлака 267 г.

В результате проведения модельного эксперимента по выщелачиванию кальция и магния из шлака наблюдается циклический переход в раствор элюата данных элементов на протяжении всей продолжительности промывок. На переход кальция в раствор в большей степени влияет реакционная способность силиката кальция взаимодействовать с водой [25], она связана с величиной радиуса двухвалентного катиона. В результате протекания реакций происхо-

дит изменение pH среды до близкой к нейтральной реакции и, как следствие, замедление процессов выщелачивания. Аналогично кальцию, переход магния в раствор элюата зависит от величины pH и периодичности воздействия на шлак кислых продуктов. За счет присутствия в более низких количествах выщелачивание магния из шлака происходит в меньшей степени, в том числе из-за разной степени гидратации соединений магния в сравнении с кальцием. Тем не менее, по истечении порядка 294 сут воздействия кислыми осадками на шлак в основной его массе концентрации кальция и магния в значительной степени уменьшаются, о чем свидетельствуют полученные спектры EDX с поверхности шлака (рис. 2, б). В результате в анализируемой пробе на поверхности шлака после 294 дней промывания имитированными кислыми осадками с концентрацией $H_2SO_4 = 1 \cdot 10^{-2}$ моль-экв/л практически не идентифицируются пики кальция и магния, в сравнении с пробой до проведения эксперимента (рис. 2, а). Кроме того, на микроструктуре поверхности идентифицируется появление новых фаз и увеличение значительного количества микротрещин.

Выводы

1. Проведены лабораторные испытания по выщелачиванию кальция и магния из гранулированного медного шлака имитированными кислыми атмосферными осадками на протяжении 294 сут. В результате фиксируется цикличность интенсивности выщелачивания элементов с увеличением концентраций в элюатах со следующей периодичностью: для кальция каждые 84–98 сут, для магния в среднем 56 сут для варианта с максимальной концентрацией серной кислоты. При использовании растворов с концентрацией $H_2SO_4 = 1 \cdot 10^{-3}$ и $1 \cdot 10^{-4}$ моль-экв/л выщелачивание магния в первые 90 сут отсутствует, затем приобретает волновой характер с максимумом выхода на 210-е сутки. Неоднородность и интенсивность перехода в раствор данных элементов регла-

ментируется в первую очередь изменением кислотности и возможным формированием гидросиликатов кальция и магния, обладающих низкой степенью растворимости.

2. Результаты сравнения химического анализа и микроструктуры поверхности шлака до и после выщелачивания свидетельствуют о значительном уменьшении кальция и магния в его химическом составе, а также появлении на поверхности значительного количества микротрещин, образовании новых минеральных фаз. Однако, учитывая значительную толщину при складировании шлака на местности, возможную степень его уплотнения и формирования барьеров на пути просачивания кислых агентов, потенциал времени и интенсивности выщелачивания значительно увеличивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bell F. G., Donnelly L. J. Mining and its Impact on the Environment. Taylor & Francis, London. 2006, 547 p. DOI: 10.1201/9781482288230.
2. Blowes D. W., Ptacek C. J., Benner S. G., McRae C. W. T., Bennet T. A., Puls R. W. Treatment of inorganic contaminants using permeable reactive barriers // Journal of Contaminant Hydrology. 2000, vol. 45, pp. 123–137. DOI: 10.1016/S0169-7722(00)00122-4.
3. Моргоева А. Д., Соколов А. А., Шепелев И. И., Фоменко В. А. Исследование распределения загрязняющих веществ, содержащихся в отходах обогащения, выведенных из эксплуатации хвостохранилища // Устойчивое развитие горных территорий. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 1354–1364. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1354-1364.
4. Айбуш А. В., Фоменко В. А., Соколов А. А., Васин А. А. Результаты анализа содержания химических элементов в тонких прослойках хвостовых отложений экспресс-методами // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 4. — С. 1491–1500. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1491-1500.
5. 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 123293. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123293.
6. Шабанов М. В., Маричев М. С., Минкина Т. М., Манджиева С. С., Невидомская Д. Г. Поступление тяжелых металлов в депонирующие среды Карабашской геотехногенной системы // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 5. — С. 117–132. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_117.
7. Удачин В. Н., Вильямсон Б., Китагава Руджи, Лонцакова Г. Ф., Аминов П. Г., Удачина Л. Г. Химический состав и механизмы формирования кислых рудничных вод Южного Урала // Вода: химия и экология. — 2011. — № 10(40). — С. 3–8.
8. Котельникова А. Л., Рябинин В. Ф. Экспериментальное изучение растворимости шлаков медеплавильных комбинатов в воде // Вестник отделения геологии, геофизики, геохимии и горных наук Российской академии наук. — 2004. — № 1. — С. 4–5.
9. Piatak N. M., Seal R. R., Hammarstrom J. M. Mineralogical and geochemical controls on the release of trace elements from slags produced by base- and precious-metal smelting at abandoned mine sites // Applied Geochemistry. 2004, vol. 19, pp. 1039–1064. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2004.01.005.

10. Ettler V., Vitkova M. Slag leaching properties and release of contaminants / Metallurgical Slags: Environmental Geochemistry and Resource Potential, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK. 2021, pp. 151 – 173. DOI: 10.1039/9781839164576-00151.
11. Ettler V., Mihaljevic M., Culka A. Contaminant release from massive copper metallurgical slags: Insights from long-term monolithic leaching tests // Chemosphere. 2023, vol. 335, article 139079. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.139079.
12. Krol A., Mizerna K., Bozym M. An assessment of pH-dependent release and mobility of heavy metals from metallurgical slag // Journal of Hazardous Materials. 2020, vol. 384, article 121502. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121502.
13. Jarosikova A., Ettler V., Mihaljevic M., Kribek B., Mapani B. The pH-dependent leaching behavior of slags from various stages of a copper smelting process: environmental implications // Journal of Environmental Monitoring. 2017, vol. 187, pp. 178 – 186. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.11.037.
14. Mikula K., Skrzypczak D., Izydorczyk G., Basladyńska S., Szustakiewicz K., Gorazda K., Moustakas K., Chojnacka K., Witek-Krowiak A. From hazardous waste to fertilizer: recovery of high-value metals from smelter slags // Chemosphere. 2022, vol. 297, article 134226. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134226.
15. Garrabrants A. C., Kosson D. S., De Lapp R., Van der Sloot H. A. Effect of coal combustion fly ash use in concrete on the mass transport release of constituents of potential concern // Chemosphere. 2014, vol. 103, pp. 131 – 139. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.11.048.
16. Удачин В. И., Китагава Р., Вильямсон Б., Сугахара Т. Руды и металлургические шлаки месторождений Карабаш (Южный Урал) и Ашио (Япония): состав и потенциальное воздействие на окружающую среду / Металлогения древних и современных океанов — 2002. Формирование и освоение месторождений в офиолитовых зонах: материалы Восьмой научной студенческой школы. — Миасс, 2002. — С. 267 – 275.
17. Сабанова М. Н., Орехова Н. Н. Перспективы применения флотации для переработки экологически опасных лежалых шлаков медной плавки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 2. — С. 336 – 343.
18. Hanjing Y., Chenchen L., Jin Y., Yaoqiang M., Xinyu Z., Wanquan Y., Huiying K., Qi M., Ruosong X., Peng D. Mineralogical analysis: The light-induced oxidation driving mechanism of heavy metals in lead-zinc smelting slag // Journal of Geochemical Exploration. 2026, vol. 280, article 107912. DOI: 10.1016/j.gexplo.2025.107912.
19. Шадрюнова И. В., Горлова О. Е., Колодежная Е. В. Технология получения высококачественных концентратов из отвальных металлургических шлаков // Обогащение руд. — 2019. — № 4. — С. 54 – 60. DOI: 10.17580/or.2019.04.10.
20. Шабанов М. В., Маричев М. С., Минкина Т. М., Соколов А. А. Окисление техногенных минеральных образований кислыми сточными водами на сульфидсодержащих отвалах: на примере Карабашской агломерации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 4. — С. 69 – 85. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_69.
21. Ярусова С. Б., Гордиенко П. С., Шичалин О. О., Папынов Е. К., Нехлюдова Е. А., Перфильев А. В., Зарубина Н. В., Пароткина Ю. А., Драньков А. Н., Буланова С. Б. Исследование сорбции стронция аморфным силикатом кальция // Журнал неорганической химии. — 2022. — Т. 67. — № 9. — С. 1251 – 1257. DOI: 10.31857/s0044457x22090197.
22. Kwon S. Y., Seo M. S. Comparative evaluation of volumetric changes of three different retrograde calcium silicate materials placed under different pH conditions // BMC Oral Health. 2020, vol. 20, no. 1, article 330. DOI: 10.1186/s12903-020-01325-x.
23. Kinnunen P., Mäkinen J., Salo M., Soth R., Komnitsas K. Efficiency of chemical and biological leaching of copper slag for the recovery of metals and valorisation of the leach residue as raw material in cement production // Minerals. 2020, vol. 10, article 654. DOI: 10.3390/min10080654.
24. Шабанов М. В., Маричев М. С., Стрекулев Г. Б., Попов Ю. В., Соколова С. А. Исследование кинетики и механизма выщелачивания тяжелых металлов из медных шлаков в условиях кислых атмосферных осадков // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2026. — № 6. — С. 83 – 97. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_6_0_83.
25. Саркисов Ю. С., Афанасьев Д. А. Кинетические особенности взаимодействия трехкальцевого силиката с водой // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2019. — Т. 21. — № 1. — С. 140 – 149. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-1-140-149. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Bell F. G., Donnelly L. J. *Mining and its Impact on the Environment*. Taylor & Francis, London. 2006, 547 p. DOI: 10.1201/9781482288230.
2. Blowes D. W., Ptacek C. J., Benner S. G., McRae C. W. T., Bennet T. A., Puls R. W. Treatment of inorganic contaminants using permeable reactive barriers. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2000, vol. 45, pp. 123 – 137. DOI: 10.1016/S0169-7722(00)00122-4.
3. Morgoeva A. D., Sokolov A. A., Shepelev I. I., Fomenko V. A. Research of the pollutants distribution contained in the waste from the enrichment of a decommissioned tailings pool. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025, vol. 17, no. 3, pp. 1354 – 1364. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1354-1364.
4. Aybush A. V., Fomenko V. A., Sokolov A. A., Vasin A. A. Results of chemical elements content analysis in interlayers of tailing deposits using rapid methods. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 4, pp. 1491 – 1500. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1491-1500.
5. 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 123293. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123293.
6. Shabanov M. V., Marichev M. S., Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Nevidomskaya D. G. Inflow of heavy metals to depositional environments at Karabash geotechnical system. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 5, pp. 117 – 132. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_117.
7. Udachin V. N., Williamson B., Kitagawa Ruji, Lonschakova G. F., Aminov P. G., Udachina L. G. Chemical Composition and Formation Mechanisms of Acid Mine Waters in the Southern Urals. *Water: Chemistry and Ecology*. 2011, no. 10(40), pp. 3 – 8. [In Russ].
8. Kotelnikova A. L., Ryabinin V. F. Experimental Study of the Solubility of Slags from Copper Smelting Plants in Water. *Bulletin of the Department of Geology, Geophysics, Geochemistry, and Mining Sciences of the Russian Academy of Sciences*. 2004, no. 1, pp. 4 – 5. [In Russ].
9. Piatak N. M., Seal R. R., Hammarstrom J. M. Mineralogical and geochemical controls on the release of trace elements from slags produced by base- and precious-metal smelting at abandoned mine sites. *Applied Geochemistry*. 2004, vol. 19, pp. 1039 – 1064. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2004.01.005.
10. Ettler V., Vitkova M. Slag leaching properties and release of contaminants. *Metallurgical Slags: Environmental Geochemistry and Resource Potential*, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK. 2021, pp. 151 – 173. DOI: 10.1039/9781839164576-00151.
11. Ettler V., Mihaljevic M., Culka A. Contaminant release from massive copper metallurgical slags: Insights from long-term monolithic leaching tests. *Chemosphere*. 2023, vol. 335, article 139079. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.139079.
12. Krol A., Mizerna K., Bozym M. An assessment of pH-dependent release and mobility of heavy metals from metallurgical slag. *Journal of Hazardous Materials*. 2020, vol. 384, article 121502. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121502.
13. Jarosikova A., Ettler V., Mihaljevic M., Kribek B., Mapani B. The pH-dependent leaching behavior of slags from various stages of a copper smelting process: environmental implications. *Journal of Environmental Monitoring*. 2017, vol. 187, pp. 178 – 186. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.11.037.
14. Mikula K., Skrzypczak D., Izydorczyk G., Basladyńska S., Szustakiewicz K., Gorazda K., Moustakas K., Chojnacka K., Witek-Krowiak A. From hazardous waste to fertilizer: recovery of high-value metals from smelter slags. *Chemosphere*. 2022, vol. 297, article 134226. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134226.
15. Garrabrants A. C., Kosson D. S., De Lapp R., Van der Sloot H. A. Effect of coal combustion fly ash use in concrete on the mass transport release of constituents of potential concern. *Chemosphere*. 2014, vol. 103, pp. 131 – 139. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.11.048.
16. Udachin V. N., Kitagawa R., Williamson B., Sugahara T. Ores and metallurgical slags from the Karabash (Southern Urals) and Ashio (Japan) deposits: composition and potential environmental impact. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov – 2002. Formirovanie i osvoenie mestorozhdeniy v ofiolitovykh zonakh: materialy Vos'moy nauchnoy studencheskoy shkoly* [Metallogeny of ancient and modern oceans–2002. Formation and development of deposits in ophiolite zones: materials of the Eighth Scientific Student School], Miass, 2002, pp. 267 – 275. [In Russ].
17. Sabanova M. N., Orekhova N. N. Prospects for flotation in processing of environmentally fragile old copper smelting slag. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 2, pp. 336 – 343. [In Russ].

18. Hanjing Y., Chenchen L., Jin Y., Yaoqiang M., Xinyu Z., Wanquan Y., Huiying K., Qi M., Ruosong X., Peng D. Mineralogical analysis: The light-induced oxidation driving mechanism of heavy metals in lead-zinc smelting slag. *Journal of Geochemical Exploration*. 2026, vol. 280, article 107912. DOI: 10.1016/j.gexplo.2025.107912.
19. Shadrunkova I. V., Gorlova O. E., and Kolodezhnaya E. V. Technology for Producing High-Quality Concentrates from Metallurgical Slag Piles. *Obogashchenie Rud.* 2019, no. 4, pp. 54–60. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2019.04.10.
20. Shabanov M. V., Marichev M. S., Minkina T. M., Sokolov A. A. Oxidation of man-made mineral formations with acid waste water at sulphide-containing waste dumps: A case-study of Karabash agglomeration. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 4, pp. 69–85. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_69.
21. Yarusova S. B., Gordienko P. S., Shichalin O. O., Papynov E. K., Nekhlyudova E. A., Perfiliev A. V., Zarubina N. V., Parotkina Yu. A., Drankov A. N., Bulanova S. B. Study of strontium sorption by amorphous calcium silicate. *Journal of Inorganic Chemistry*. 2022, vol. 67, no. 9, pp. 1251–1257. [In Russ]. DOI: 10.31857/s0044457x22090197.
22. Kwon S. Y., Seo M. S. Comparative evaluation of volumetric changes of three different retro-grade calcium silicate materials placed under different pH conditions. *BMC Oral Health*. 2020, vol. 20, no. 1, article 330. DOI: 10.1186/s12903-020-01325-x.
23. Kinnunen P., Mäkinen J., Salo M., Soth R., Komnitsas K. Efficiency of chemical and biological leaching of copper slag for the recovery of metals and valorisation of the leach residue as raw material in cement production. *Minerals*. 2020, vol. 10, article 654. DOI: 10.3390/min10080654.
24. Shabanov M. V., Marichev M. S., Strekelev G. B., Popov Yu. V., Sokolova S. A. Kinetics and mechanism of heavy metal leaching from copper slag under conditions of acid fallout. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026, no. 6, pp. 83–97. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_6_0_83.
25. Sarkisov Yu. S., Afanasyev D. A. Kinetic Features of the Interaction of Tri-Calcium Silicate with Water. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2019, vol. 21, no. 1, pp. 140–149. [In Russ]. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-1-140-149.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шабанов Михаил Викторович¹ — канд. с.-х. наук, доцент, доцент,
e-mail: geohim.spb@gmail.com, Scopus 35171489500,
ORCID ID: 0000-0003-4725-3673,

Маричев Максим Сергеевич¹ — канд. биол. наук, зав. лабораторией,
e-mail: m.s.marichev@yandex.ru, Scopus 57216298057,
ORCID ID: 0000-0003-0429-2234,

¹ Санкт-Петербургский государственный аграрный университет.

Для контактов: Маричев М.С., e-mail: m.s.marichev@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.V. Shabanov¹, Cand. Sci. (Agr.), Assistant Professor, Assistant Professor,
e-mail: geohim.spb@gmail.com, Scopus 35171489500,
ORCID ID: 0000-0003-4725-3673,

M.S. Marichev¹, Cand. Sci. (Biol.), Head of Laboratory,
e-mail: m.s.marichev@yandex.ru, Scopus 57216298057,
ORCID ID: 0000-0003-0429-2234,

¹ Saint-Petersburg State Agrarian University, Pushkin, Russia.

Corresponding author: M.S. Marichev, e-mail: m.s.marichev@yandex.ru.

Получена редакцией 20.05.2026; получена после рецензии 03.07.2026; принята к печати 10.09.2026.

Received by the editors 20.05.2026; received after the review 03.07.2026; accepted for printing 10.09.2026.

