ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(2):101-111
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 550.424.4; 504.058 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_101

СОРБЦИЯ АЛЮМИНИЯ ИЗ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАСТВОРОВ НА КАРБОНАТЕ КАЛЬЦИЯ

А.М. Жижаев[1], А.Г. Михайлов[1], Д.И. Целюк[1]

[1] Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН» – Институт химии и химической технологии СО РАН, Красноярск, Россия, e-mail: mag@icct.ru

Аннотация: Иммобилизация алюминия протекает быстро с достижением остаточных концентраций металла в растворе менее 0,2 мг/л. Интенсивное осаждение начинается после повышения pH раствора до 4,6. Методами рентгеновской дифракции и электронной микроскопии исследовано взаимодействие сульфатных растворов алюминия с природными карбонатами кальция. Использование кальцита позволяет иммобилизировать основную массу алюминия из раствора. Для глубокой очистки растворов необходимо 5–10-кратное превышение расхода осадителя от стехиометрии. Большая часть серы фиксируется в виде сульфата кальция (гипса). Показано, что алюминий из сульфатных растворов осаждается на кальците не в виде гидроксида или карбоната, а в виде основного сульфата – басалюминита. Морфологически осадки представлены крупными игольчатыми кристаллами гипса (до 100 мкм), пронизывающими массу мелких сферических частиц басалюминита диаметром менее 5 мкм.

Ключевые слова: геохимический барьер, сорбция, очистка растворов, осаждение алюминия, pH раствора, сульфатные растворы, кальцит, басалюминит.

Благодарность: Работа выполнена при поддержке проекта № 125061006884-7 с использованием оборудования Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Для цитирования: *Жижаев А. М., Михайлов А. Г., Целюк Д. И.* Сорбция алюминия из фильтрационных растворов на карбонате кальция // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2. – С. 101–111. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_101.

Removal of aluminum from filtration solutions by adsorption at calcium carbonate

A.M. Zhizhaev[1], A.G. Mikhailov[1], D.I. Tselyuk[1]

[1] Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences» – Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: mag@icct.ru

Abstract: Immobilization of aluminum runs fast with achievement of residual metal concentrations less than 0.2 mg/l in solution. Intense precipitation starts after solution pH is increased to 4.6. X-ray diffraction and electron microscopy were used to investigate interaction of aluminum sulfate solutions with natural calcium carbonate. Calcite enables immobilizing major

amount of aluminum. Fine cleaning of the solutions requires 5–10 times higher consumption of the precipitation agent from stoichiometry. Much sulfur is fixated as calcium sulfate (gypsum). It is shown that aluminum is precipitated from sulfate solutions at calcium not as hydroxide or carbonate but as the main sulfate–basaluminite. Morphologically, precipitates represent large needlelike gypsum crystals (to 100 μm) piercing fine spherical particles with a diameter less than 5 μm.

Key words: geochemical barrier, adsorption, solution cleaning, aluminum precipitation, solution pH, sulfate solutions, calcite, basaluminite.

Acknowledgements: The study was carried out with the framework of Project No. 125061006884-7 and on equipment of the Krasnoyarsk Center for Shared Use at the Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Zhizhaev A. M., Mikhailov A. G., Tselyuk D. I., Removal of aluminum from filtration solutions by adsorption at calcium carbonate. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(2): 101-111. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_101.

Введение

Алюминий не относится к веществам с явно выраженным токсическим воздействием, но так как его соединения отличаются высокой стабильностью, при хроническом воздействии он способствует вымыванию кальция и фосфора из организма человека и животных. В последние десятилетия в связи с развитием крупнотоннажного производства резко возросло технологическое и бытовое использование этого металла и, соответственно, техногенное давление на окружающую среду [1]. Отмечается негативное влияние на здоровье человека даже малых доз алюминия в окружающей среде [2, 3]. Доказана также фитотоксичность избытка алюминия в почвах [4—7]. Загрязненными ионами алюминия являются сточные воды, образующиеся при его производстве, а также в процессах, где используются соединения на основе алюминия.

Алюминий также присутствует в виде макрокомпонента (наряду с железом и кальцием) в шахтных и дренажных водах, в стоках хвостохранилищ. И при очистке таких вод от токсичных ионов тяжелых металлов его влияние следует учитывать.

Интенсивность миграции алюминия в гидрогеологических системах в целом значительно ниже, чем у железа и марганца [5, 8, 9]. Тем не менее, даже слабые органические кислоты могут разрушать алюминийсодержащие минералы и образовывать с алюминием легкоподвижные комплексные соединения [10, 11]. Тем более это характерно для сильнокислых подземных вод и горных стоков, формирующихся при взаимодействии воды и кислорода (возможно, бактериальных сред) с сульфидными минералами (в основном пиритом) [5, 12—14]. Разложение алюминийсодержащих минералов (глины, слюды, плагиоклазы) и пород (гранит, туф, кристаллический сланец) в гипергенных и техногенных процессах при фильтрации кислых сточных вод через пористые или рыхлые массивы горных пород приводит к образованию кислых сульфатных растворов с относительно высоким содержанием металлов, в том числе алюминия [5, 8, 9, 11—15].

Осаждение макрокомпонентов из таких стоков при выходе на поверхность (в основном за счет повышения pH) исследовалось подробно и многократно, но в основном за счет их разбавления

нейтральными (моделируя дождевую и речную воды) или, для ускорения процесса, щелочными (водные растворы $NaOH$, $Ca(OH)_2$) титрантами. Результаты применения для очистки кислых сульфатных сточных вод тонкодисперсных суспензий твердых щелочных материалов (лайм (CaO), портландит ($Ca(OH)_2$), периклаз (MgO)) интерпретируются также с позиций нейтрализации кислотности [8, 9, 16, 17] и сорбции тяжелых металлов на свежеобразованных гидроксидах алюминия, железа или марганца или введенных высокопористых сорбентах (бентонит, торф, цеолиты) [17, 18].

Минеральные фазы вторичного солидизированного алюминия также неоднозначны [5, 8, 11, 13, 17]. В описаниях чаще других встречается гиббсит — $Al(OH)_3$ (кристаллический или аморфный). Совместно с гиббситом или независимо от него встречаются бёмит — γ-$AlOOH$ [5, 19] и диаспор — α-$AlOOH$ (или $HAlO_2$) [20 — 23]. В кислых условиях образуется и накапливается квасцовый камень алунит — $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$ [5, 24]. Считается, что в растворе преобладают полимерные гидроксокомплексы алюминия [12, 13]. Косвенными методами показано, что содержание подвижного алюминия в кислых сульфатных почвах вероятнее всего регулируется растворением басалюминита — $Al(OH)SO_4 \cdot 5H_2O$, а не гиббсита или алунита [8, 12, 13, 16, 25]. Однако наличие таких серосодержащих минеральных фаз диагностируется с определенными трудностями ввиду малых количеств и предполагаемого нанокристаллического или аморфного строения. Геохимия и минеральные процессы, контролирующие поведение алюминия в природных гидросистемах, остаются не до конца понятными.

В процессе формирования и транспорта кислых сульфатных стоков в подземных условиях их разбавление большими объемами нейтральных вод маловероятно. Но контакт с минералами вмещающих пород, которые могут существенно изменить кислотность среды, вполне ожидаем. Широко распространены в природе осадочные и метаморфизованные породы, сложенные карбонатами кальция (известняк, мел, мрамор). Такие материалы широко применяются в пассивных геохимических барьерах для сброса кислотности. Показано, что осаждение тяжелых металлов в таких условиях часто идет в виде основных сульфатов [9, 15 — 17, 26]. Растворимость алюминия, согласно данным многих исследователей, регулируется именно его основными сульфатами [8, 12, 14]. Возможно, и в случае осаждения основных сульфатов алюминия определяющую роль играет присутствие кальцита, что дает возможность использовать задействованные природой механизмы для очистки природных и промышленных кислых стоков. Использование кальцита в качестве сорбента для растворенного алюминия позволит сократить объем сбросных вод (исключить разбавление) и удешевит сам процесс (использование природных (известняк), а не синтетических (известь, лайм) материалов).

Целью данной работы является экспериментальное подтверждение возможности осаждения алюминия из модельных кислых растворов с высокой концентрацией сульфатов на контакте с природными карбонатами кальция (кальцит), а также исследование условий образования и фазового состава осадков.

Экспериментальная часть

Осаждение проводили из модельных растворов заданной концентрации (C_{Al}, мг/л = 100, 200, 300, 500). Диапазон выбранных концентраций, известных по опубликованным литературным источникам (40 — 296 мг/л) [1, 4, 5, 17 — 23],

перекрывает область содержания алюминия в природных (высокогорных, мерзлотных, подпочвенных, дренажных) водах.

В качестве осадителя использовали природный карбонат кальция (мрамор), измельченный до крупности 100% класса −100 мкм. В перемешиваемый модельный раствор вводили навеску дисперсного осадителя (m_{CaCO3}, г = 1, 2, 3, 5). Кислотность среды контролировали портативным pH-метром Combo pH/TDS/EC (Hanna Instruments, США). Дополнительной регулировки pH растворов добавлением кислоты не требовалось, так как за счет гидролиза Al^{3+} кислотность исходного раствора увеличивалась при растворении сульфата алюминия до pH~ ~4,25.

После добавления навески кальцита (начало отсчета) через определенные промежутки времени дозатором отбирали аликвоту пульпы объемом 10 мл. Пробы отфильтровывали под вакуумом через бумажный фильтр «синяя лента» для контроля содержания алюминия и кальция в жидкой фазе методом атомно-абсорбционной спектроскопии с помощью атомно-абсорбционного спектрометра AAnalyst 400 (PerkinElmer, США) с использованием в качестве окислителя закиси азота.

Твердая фаза после высушивания на воздухе подвергалась рентгенофазовому анализу на рентгеновском дифрактометре PROTO AXRD (Proto Manufacturing, Канада) в диапазоне брэгговских углов 2θ 5 − 70°. Использовалось монохроматизированное (Ni) излучение $Cu_{K\alpha}$ (λ = = 1,5401 Å), шаг сканирования 0,02 град, накопление в точке 1 с. Расчет и расшифровку дифрактограмм проводили по стандартной методике с использованием базы данных эталонных порошковых спектров PDF-2.

Морфологию осадков, образование новых фаз и локальные концентрации элементов в твердой матрице исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на сканирующем электронном микроскопе HitachiTM-3000 (в обратно-отраженных электронах, ускоряющее напряжение 15 кэВ) с системой микроанализа Quantax 70 (Bruker, Германия).

Результаты и обсуждение

По данным рентгенофазового анализа, образец сорбента представлен в основном кальцитом ($CaCO_3$) с небольшой примесью кварца (SiO_2). Возможно присутствие следов алюмосиликатов магния и кальция (слюда).

Из слабоконцентрированных растворов (до 100 мг/л) алюминий осаждается нацело в течение первых 1 − 5 мин при любой использованной дозировке осадителя (см. рис. 1, *а*). Но при увеличении концентрации растворов возникают проблемы. На начальной стадии процесса (до 10 мин.) идет интенсивное отложение гипса (а следовательно — растворение кальцита) практически без изменения содержания алюминия в жидкой фазе. Отклонение расхода карбоната кальция от стехиометрии в большую сторону достигает 10 − 15-кратного избытка. На рис. 1, *б* представлены результаты осаждения алюминия из модельного раствора с концентрацией 200 мг/л на сорбенте массой 1 г (близко к стехиометрии). Глубокого осаждения алюминия в течение 1,5 ч не происходит. Концентрация практически линейно снижается до примерно 100 мг/л. При этом pH системы увеличивается до 4,45.

При увеличении массы сорбента в два раза полнота осаждения алюминия в течение 90 мин достигает 98% (см. рис. 1, *в*). При этом pH раствора немонотонно повышается до 5,2. При увеличении дозы осадителя до 5 г (пятикратное превышение стехиометрии) осаждение алюминия происходит бы-

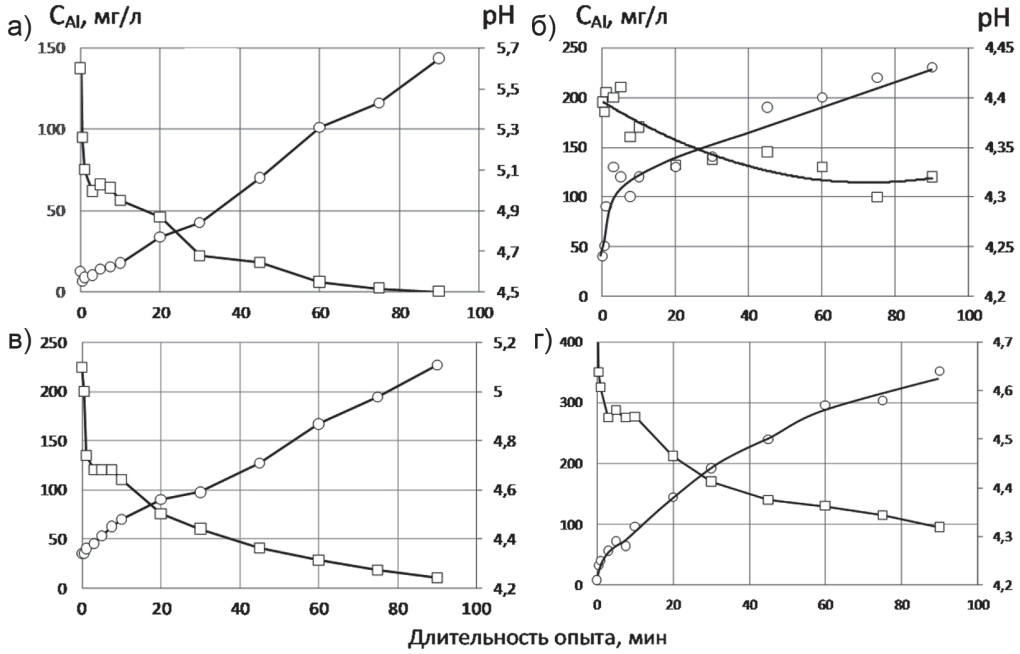


Рис. 1. Кинетика осаждения алюминия на кальците и защелачивания системы при комнатной температуре: C_{Al} = 100 мг/л, m_{CaCO3} = 1 г (а); C_{Al} = 200 мг/л, m_{CaCO3} = 1 г (б); C_{Al} = 200 мг/л, m_{CaCO3} = 2 г (в); C_{Al} = = 500 мг/л, m_{CaCO3} = 5 г (г)

Fig. 1. Kinetics of aluminum precipitation on calcite and alkalization of the system at room temperature: C_{Al} = = 100 mg/l, m_{CaCO3} = 1 g (a); C_{Al} = 200 mg/l, m_{CaCO3} = 1 g (b); C_{Al} = 200 mg/l, m_{CaCO3} = 2 g (v); C_{Al} = 500 mg/l, m_{CaCO3} = 5 g (g)

стро в течение 0,5 — 1 мин. Значение pH уже в течение первых минут достигают величины 4,6, после чего плавно увеличивается до pH 6,5. Глубина осаждения алюминия после 3 мин. сорбции ниже пределов обнаружения атомно-абсорбционного метода (0,2 мг/л). Однако при более высоких концентрациях даже та-

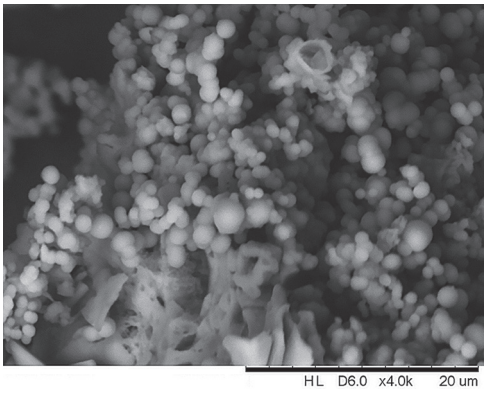


Рис. 2. СЭМ-изображение частиц осадка алюминия на кальците. Сферические глобулы басалюминита (1 — 3 мкм)

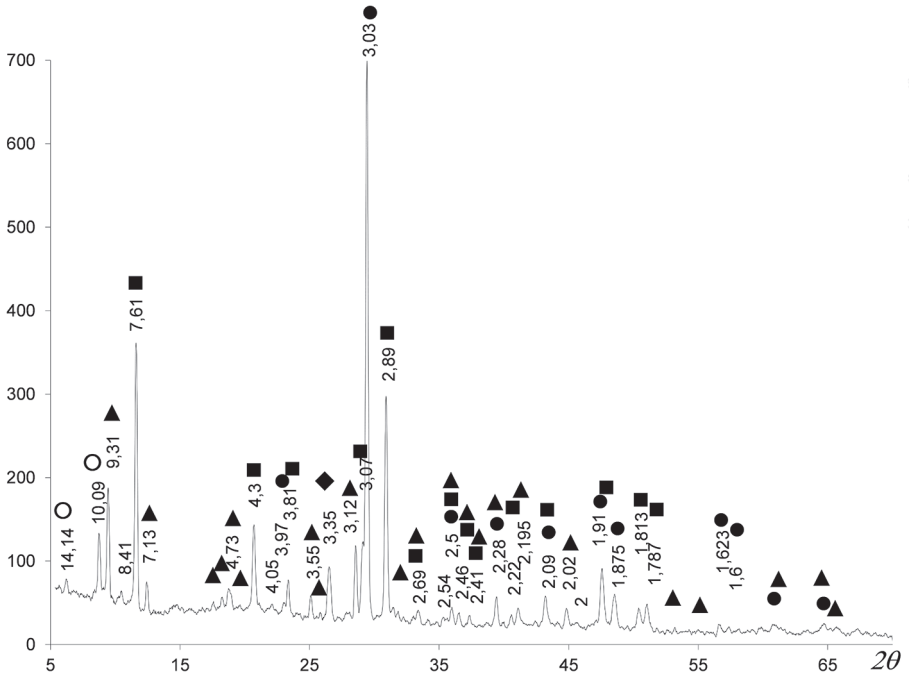
Fig. 2. SEM image of aluminum precipitate particles on calcite. Spherical basalmite globules (1–3 μm)

кого количества осадителя недостаточно (рис. 1, *г*). Глубокая очистка растворов достигается при 5—10-кратном расходе кальцита.

Полученные осадки были исследованы методом СЭМ. Морфологически осадки представлены крупными игольчатыми кристаллами, пронизывающими массу мелких сферических частиц (см. рис. 2). По данным микрорентгеноспектрального анализа, игольчатые кристаллы представлены сульфатом кальция, то есть гипсом. Основная масса осадка представлена микросферами диаметром менее 5 мкм. Проведенный спектральный анализ показал, что сферические частицы представлены сульфоалюминатной фазой практически без следов кальция. Сера всегда присутствует в осадках в значительных количествах. Частиц, содержащих только алюминий и кислород (возможные частицы гиббсита), не обнаружено.

По данным рентгенофазового анализа, на дифрактограмме осадка, образовавшегося из растворов с C_{Al} = 200 мг/л при добавлении 2 г сорбента (см. рис. 3) присутствуют линии непрореагировавшего (остаточного) кальцита ($CaCO_3$, d = = 3,03; 3,28; 1,875 Å, JCPDS, 47-1743) и интенсивные пики гипса, сформировавшегося при взаимодействии Ca^{2+} с сульфат-ионом ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$, d = 7,61; 4,3; 2,89 Å, JCPDS, 33-311).

По мере разложения кальцита проявляются линии с d = 10,09; 3,35; 2,61 Å, принадлежащие, скорее всего, биотиту ($K(Mg,Fe^{2+})_3(AlFe^{3+})Si_3O_{10}(OH,F)_2$),



● – кальцит ($CaCO_3$), ■ – гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), ▲ – басалюминит ($Al_4SO_4(OH)_{10} \cdot 2H_2O$), ◆ – кварц ($SiO_2$), O – биотит ($K(Mg,Fe^{2+})3(Al,Fe^{3+})Si_3O_{10}(OH,F)_2$)

Рис. 3. Фрагмент дифрактограммы осадка сорбции алюминия на кальците (C_{Al} = 200 мг/л, m_{CaCO3} = 2 г)
Fig. 3. Fragment of the diffraction pattern of the precipitate of aluminum sorption on calcite (C_{Al} = 200 mg/l, m_{CaCO3} = 2 g)

присутствовавшему в виде примеси в исходном мраморе. Наиболее интересно появление линий, принадлежащих основному сульфату алюминия — басалюминиту ($Al_4SO_4(OH)_{10} \cdot 2H_2O$, d = = 9,31; 7,13; 4,73 Å, JCPDS, 42-556), свидетельствующее об осаждении алюминия в виде основных сульфатов. Существенных количеств гиббсита, алунита или карбонатов алюминия в продуктах сорбции не обнаружено.

Химизм процесса можно описать следующим образом. За счет медленного растворения карбоната кальция (регулируемого его произведением растворимости) и последующего гидролиза карбонат-иона pH системаы постепенно увеличивается. Концентрация раствора по алюминию при этом остается практически неизменной. По достижении определенного уровня кислотности начинается осаждение основного сульфата алюминия.

При высоких концентрациях алюминия возможно прямое взаимодействие кальцита с кислыми растворами (при низких pH). Две встречные реакции — генерации гидроксил-иона (зависит от содержания кальцита) и его связывания в осадке (зависит от содержания мобильного алюминия) — стабилизируют кислотность системы на определенном уровне до исчезновения одного из компонентов.

Интенсивное осаждение алюминия начинается после защелачивания раствора до 4,6, этот показатель практически не меняется доосаждения 95—98% алюминия. Уровень, характерный для гидролитической очистки (выше pH 5), на этой ступени не достигается, и, соответственно, гидроксиды алюминия в осадке отсутствуют. При высоких исходных концентрациях алюминия на начальной стадии происходит прямое взаимодействие кальцита с кислым сульфатным раствором (кислотность регулируется гидролизом алюминия) с выпадением гипса.

Переосаждение алюминия в виде основных сульфатов, связанное с кальцитом, следует учитывать при рассмотрении его природной миграции в пористых и рыхлых матрицах. Выявленный механизм может быть использован при очистке природных и сточных вод на полигонах хранения горно-геологических отходов путем фильтрации через искусственные карбонатные геохимические барьеры. Осаждение алюминия из многоэлементных растворов нуждается в дальнейшем изучении.

Заключение

Таким образом, очистка водных сульфатных растворов от алюминия до остаточных концентраций ниже ПДК сорбцией на кальците возможна и протекает быстро (90% в течение 1—5 мин) при избытке осадителя в 10—15 раз от стехиометрии. Интенсивное осаждение алюминия начинается после защелачивания раствора до pH 4,6 с формированием основного сульфата алюминия. Этот показатель может служить критерием глубины очистки раствора. Большая часть серы фиксируется в виде сульфата кальция (гипса). Алюминий из сульфатных растворов осаждается на кальците не в виде гидроксида или карбоната, а в виде основного сульфата — басалюминита, также частично связывая серу в твердой фазе. Формирование басалюминита в природных условиях, возможно, связано с присутствием кальцита в дренажных системах.

Можно сделать вывод о целесообразности и эффективности использования природных карбонатов кальция для экологической реабилитации кислых токсичных стоков (шахтных вод и дренажных вод хвостохранилищ, промывных вод полигонов промышленных отходов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Paraskevas D., Kellens K., Voorde A., Dewulf W., Duflou J.* Environmental impact analysis of primary aluminium production at country level // Procedia CIRP. 2016, vol. 40, pp. 209—213. DOI: 10.1016/j.procir.2016.01.104.

2. *Rondeau V., Jacqmin-Gadda H., Commenges D.* Aluminum and silica in drinking water and the risk of Alzheimer's disease or cognitive decline: findings from 15-year follow-up of the PAQUID cohort // American Journal of Epidemiology. 2009, vol. 169, no. 4, pp. 489—496. DOI: 10.1093/aje/kwn348.

3. *Bondy S. C.* The neurotoxicity of environmental aluminum is still an issue // NeuroToxicology. 2010, vol. 31, no. 5, pp. 75—81. DOI: 10.1016/j.neuro.2010.05.009.

4. *Md. Atikur Rahman, Sang-Hoon Lee, Hee Chung Ji, Ahmad Humayan Kabir, Chris Stephen Jones, Ki-Won Lee* Importance of mineral nutrition for mitigating aluminum toxicity in plants on acidic soils: Current status and opportunities // International Journal of Molecular Sciences. 2018, vol. 19, no. 10, pp. 3073—3139. DOI: 10.3390/ijms19103073.

5. *Иванов В. В.* Экологическая геохимия элементов. Книга 2: главные р-элементы. — М.: Недра, 1995. — 303 с.

6. *Антропова Г. Е., Хотулев О. Г.* Агрохимические свойства почвы // Состояние и охрана окружающей среды Архангельской области за 2018 год. — Архангельск: Центр природопользования и охраны окружающей среды, 2019. — С. 126—132.

7. *Васенев И. И., Александров Н. А., Андреева И. В.* Наилучшие доступные почво- и углерод-сберегающие технологии природопользования, экологического мониторинга и контроля. — М.: Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева, 2023. — 240 с.

8. *Caraballo M. A., Wanty R. B., Verplanck P. L., Navarro-Valdivia L., Ayora C., Hochella M. F. Jr.* Aluminium mobility in mildly acidic mine drainage: Interactions between hydrobasaluminite, silica and trace metals from the nano to the meso-scale // Chemical Geology. 2019, vol. 519, pp. 1—10. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2019.04.013.

9. *Ilyashuk B., Ilyashuk E.* Water-rock interaction and freeze-thaw cycles as drivers of acid rock drainage generation by a rock glacier in the european alps // ACS EST Water. 2024, no. 4, pp. 5264—5274. DOI: 10.1021/acsestwater.4c00263.

10. *Morev D., Potapova V., Yaroslavtsev A.* Agroecological assessment of spatial variability of carbon content in the conditions of disturbed sod-podzolic soils // BIO Web of Conferences. 2024, vol. 85, no. 1, article 01063. DOI: 10.1051/bioconf/20248501063.

11. *Савенко А. В., Савенко В. С.* Кислотная мобилизация алюминия из минералов и горных пород // Вестник московского университета. Серия 4. Геология. — 2018. — № 5. — С. 79—83. DOI: 10.33623/0579-9406-2018-5-79-83.

12. *Jones A. M., Collins R. N., Waite T. D.* Mineral species control of aluminium solubility in sulfate-rich acidic waters // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2011, vol. 75, no. 4, pp. 965—977. DOI: 10.1016/j.gca.2010.12.001.

13. *Kirk D.* Nordstrom geochemical modeling of iron and aluminium precipitation during mixing and neutralization of acid mine drainage // Minerals. 2020, vol. 10, no. 6, article 547. DOI: 10.3390/min10060547.

14. *Carrero S., Pérez-López R., Fernández-Martínez A., Cruz-Hernández P., Ayora C., Poulain A.* The potential role of aluminium hydroxysulphates in the removal of contaminants in acid mine drainage // Chemical Geology. 2015, vol. 417, article 414. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2015.10.020.

15. *Blowes D. W., Ptacek C. J., Jambor J. L., Weisener C. G., Paktunc D., Gould W. D., Johnson D. B.* The geochemistry of acid mine drainage / Environmental Geochemistry, 2nd ed., Treatise on Geochemistry Series, Elsevier: New York, NY, USA, 2014, vol. 11, pp. 149—204. DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00905-0.

16. *Changxun Y., Högfors-Rönnholm E., Stén P., Engblom S., Åström M. E.* Iron-sulfur geochemistry and acidity retention in hydrologically active macropores of boreal acid sulfate soils: Effects of mitigation suspensions of fine-grained calcite and peat // Science of The Total Environment. 2023, vol. 856, part 2, article 159142. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159142.

17. *Савенко А. В., Савенко В. С.* Иммобилизация алюминия на карбонатном геохимическом барьере // Наукоемкие технологии. — 2018. — Т. 19. — № 1. — С. 44—47.

18. *Козлов А. В., Куликова А. Х., Уромова И. П.* Физико-химические свойства бентонита и его влияние на кислотно-основные показатели и эффективное плодородие дерново-подзолистой

легкосуглинистой почвы // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. — 2019. — № 96. — С. 86—112. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-96-86-112.

19. *Павлова-Веревкина О. Б.*, *Политова Е. Д.*, *Назаров В. В.* Синтез высокодисперсного золя бемита гидролизом метилцеллозольвата алюминия // Коллоидный журнал. — 2000. — Т. 62. — № 4. — С. 515—518.

20. *Чукин Г. Д.* Строение оксида алюминия и катализаторов гидрообессеривания. Механизмы реакций. — М.: Типография Паладин, ООО «Принта», 2010. — 288 с.

21. *Дудкин Б. Н.*, *Макаров С. А.*, *Мельничук Д. Г.*, *Истомина Е. И.* Коллоидно-химические характеристики золей оксида алюминия. Влияние природы прекурсора и условий синтеза // Исследовано в России. — 2003. — Т. 206. — С. 2419. http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/206.pdf.

22. *Фатхутдинов Р. Х.*, *Карасева И. П.*, *Пухачева Э. Н.* Нанодисперсные гидрозоли оксидов кремния и алюминия // Республика Татарстан. — 2009. — Т. 54. — № 2. — С. 48—50.

23. *Репейкова Л. Ю.*, *Стась И. Е.* Исследование влияния электромагнитного поля на оптические свойства и устойчивость золя гидроксида алюминия // Известия Алтайского государственного университета. — 2011. — № 3. — С. 137—141.

24. *Ehlmann B. L.*, *Swayze G. A.*, *Milliken R. E.*, *Mustard J. F.*, *Clark R. N.*, *Murchie S. C.*, *Breit G. N.*, *Wray J. J.*, *Gondet B., Poulet F., Carter J.*, *Calvin W. M.*, *Benzel W. M.*, *Seelos K. D.* Discovery of alunite in Cross crater, Terra Sirenum, Mars: Evidence for acidic, sulfurous waters // American Mineralogist. 2016, vol. 101, pp. 1527—1542.

25. *Wanner C., Pöthig R., Carrero S., Fernandez-Martinez A., Jäger C., Furrer G.* Natural occurrence of nanocrystalline Al-hydroxysulfates: Insights on formation. Al solubility control and As retention // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2018, vol. 238, pp. 252—269. DOI: 10.1016/j.gca.2018.06.031.

26. *Меркулова Е. Н.*, *Жижаев А. М.*, *Чугуевская М. А.* Эффективность использования природных карбонатов кальция в качестве коллектора тяжелых цветных металлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2009. — № 12. — С. 486—492. ГИАБ

REFERENCES

1. Paraskevas D., Kellens K., Voorde A., Dewulf W., Duflou J. Environmental impact analysis of primary aluminium production at country level. *Procedia CIRP*. 2016, vol. 40, pp. 209—213. DOI: 10.1016/j.procir.2016.01.104.

2. Rondeau V., Jacqmin-Gadda H., Commenges D. Aluminum and silica in drinking water and the risk of Alzheimer's disease or cognitive decline: findings from 15-year follow-up of the PAQUID cohort. *American Journal of Epidemiology*. 2009, vol. 169, no. 4, pp. 489—496. DOI: 10.1093/aje/kwn348.

3. Bondy S. C. The neurotoxicity of environmental aluminum is still an issue. *NeuroToxicology*. 2010, vol. 31, no. 5, pp. 75—81. DOI: 10.1016/j.neuro.2010.05.009.

4. Md. Atikur Rahman, Sang-Hoon Lee, Hee Chung Ji, Ahmad Humayan Kabir, Chris Stephen Jones, Ki-Won Lee Importance of mineral nutrition for mitigating aluminum toxicity in plants on acidic soils: Current status and opportunities. *International Journal of Molecular Sciences*. 2018, vol. 19, no. 10, pp. 3073—3139. DOI: 10.3390/ijms19103073.

5. Ivanov V. V. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov. Kniga 2: glavnye p-elementy* [Ecological geochemistry of elements. Book 2: Main p-elements], Moscow, Nedra, 1995, 303 p.

6. Antropova G. E., Khotulev O. G. *Agrokhimicheskie svoystva pochvy. Sostoyanie i okhrana okruzhayushchey sredy Arkhangel'skoy oblasti za 2018 god* [Agrochemical properties of soil. The state and protection of the environment of the Arkhangelsk region for 2018], Arkhangel'sk, 2019, pp. 126—132. [In Russ].

7. Vasenev I. I., Aleksandrov N. A., Andreeva I. V. *Nailuchshie dostupnye pochvo- i uglerodsberegayushchie tekhnologii prirodopol'zovaniya, ekologicheskogo monitoringa i kontrolya* [The best available soil- and carbon-saving technologies for nature management, environmental monitoring and control], Moscow, 2023, 240 p.

8. Caraballo M. A., Wanty R. B., Verplanck P. L., Navarro-Valdivia L., Ayora C., Hochella M. F. Jr. Aluminium mobility in mildly acidic mine drainage: Interactions between hydrobasaluminite, silica and trace metals from the nano to the meso-scale. *Chemical Geology*. 2019, vol. 519, pp. 1—10. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2019.04.013.

9. Ilyashuk B., Ilyashuk E. Water-rock interaction and freeze-thaw cycles as drivers of acid rock drainage generation by a rock glacier in the european alps. *ACS EST Water*. 2024, no. 4, pp. 5264—5274. DOI: 10.1021/acsestwater.4c00263.

10. Morev D., Potapova V., Yaroslavtsev A. Agroecological assessment of spatial variability of carbon content in the conditions of disturbed sod-podzolic soils. *BIO Web of Conferences*. 2024, vol. 85, no. 1, article 01063. DOI: 10.1051/bioconf/20248501063.

11. Savenko A. V., Savenko V. S. Acid mobilization of aluminum from minerals and rocks. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2018, no. 5, pp. 79—83. [In Russ]. DOI: 10.33623/0579-9406-2018-5-79-83.

12. Jones A. M., Collins R. N., Waite T. D. Mineral species control of aluminium solubility in sulfate-rich acidic waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2011, vol. 75, no. 4, pp. 965—977. DOI: 10.1016/j.gca.2010.12.001.

13. Kirk D. Nordstrom geochemical modeling of iron and aluminium precipitation during mixing and neutralization of acid mine drainage. *Minerals*. 2020, vol. 10, no. 6, article 547. DOI: 10.3390/min10060547.

14. Carrero S., Pérez-López R., Fernández-Martínez A., Cruz-Hernández P., Ayora C., Poulain A. The potential role of aluminium hydroxysulphates in the removal of contaminants in acid mine drainage. *Chemical Geology*. 2015, vol. 417, article 414. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2015.10.020.

15. Blowes D. W., Ptacek C. J., Jambor J. L., Weisener C. G., Paktunc D., Gould W. D., Johnson D. B. The geochemistry of acid mine drainage. *Environmental Geochemistry*, 2nd ed., Treatise on Geochemistry Series, Elsevier: New York, NY, USA, 2014, vol. 11, pp. 149—204. DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00905-0.

16. Changxun Y., Högfors-Rönnholm E., Stén P., Engblom S., Åström M. E. Iron-sulfur geochemistry and acidity retention in hydrologically active macropores of boreal acid sulfate soils: Effects of mitigation suspensions of fine-grained calcite and peat. *Science of The Total Environment*. 2023, vol. 856, part 2, article 159142. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159142.

17. Savenko A. V., Savenko V. S. Immobilization of aluminum on the carbonate geochemical barrier. *Science Intensive Technologies*. 2018, vol. 19, no. 1, pp. 44—47. [In Russ].

18. Kozlov A. V., Kulikova A. Kh., Uromova I. P. Physicochemical properties of bentonite and its effect on acid-base parameters and effective fertility of sod-podzolic light loamy soil. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2019, no. 96, pp. 86—112. [In Russ]. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-96-86-112.

19. Pavlova-Verevkina O. B., Politova E. D., Nazarov V. V. Synthesis of highly dispersed boehmite sol by hydrolysis of aluminum methylcellulose solvate. *Colloid Journal*. 2000, vol. 62, no. 4, pp. 515—518. [In Russ].

20. Chukin G. D. *Stroenie oksida alyuminiya i katalizatorov gidroobesserivaniya. Mekhanizmy reaktsiy* [Structure of aluminum oxide and hydrodesulfurization catalysts. Reaction mechanisms], Moscow, 2010, 288 p.

21. Dudkin B. N., Makarov S. A., Melnichuk D. G., Istomina E. I. Colloidal and chemical characteristics of aluminum oxide sols. Effect of the precursor nature and synthesis conditions. *Issledovano v Rossii*. 2003, vol. 206, pp. 2419. [In Russ]. http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/206.pdf.

22. Fatkhutdinov R. Kh., Karaseva I. P., Pukhacheva E. N. Nanodispersed hydrosols of silicon and aluminum oxides. *Republic of Tatarstan*. 2009, vol. 54, no. 2, pp. 48—50. [In Russ].

23. Repeykova L. Yu., Stas I. E. Study of the influence of electromagnetic field on the optical properties and stability of aluminum hydroxide sol. *Izvestiya of Altai state university*. 2011, no. 3, pp. 137—141. [In Russ].

24. Ehlmann B. L., Swayze G. A., Milliken R. E., Mustard J. F., Clark R. N., Murchie S. C., Breit G. N., Wray J. J., Gondet B., Poulet F., Carter J., Calvin W. M., Benzel W. M., Seelos K. D. Discovery of alunite in Cross crater, Terra Sirenum, Mars: Evidence for acidic, sulfurous waters. *American Mineralogist*. 2016, vol. 101, pp. 1527—1542.

25. Wanner C., Pöthig R., Carrero S., Fernandez-Martinez A., Jäger C., Furrer G. Natural occurrence of nanocrystalline Al-hydroxysulfates: Insights on formation. Al solubility control and As retention. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2018, vol. 238, pp. 252—269. DOI: 10.1016/j.gca.2018.06.031.

26. Merkulova E. N., Zhizhaev A. M., Chuguevskaya M. A. Efficiency of using natural calcium carbonates as a collector of heavy non-ferrous metals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2009, no. 12, pp. 486—492. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жижаев Анатолий Михайлович[1] — канд. техн. наук,
ведущий научный сотрудник, e-mail: zhyzhaev@icct.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1447-4050,
Михайлов Александр Геннадьевич[1] — д-р техн. наук,
главный научный сотрудник, e-mail: mag@icct.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5537-7479,
Целюк Денис Игоревич[1] — д-р геол.-минерал. наук,
ведущий научный сотрудник, e-mail: tselukdi@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1447-4050,
[1] Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр СО РАН» —
Институт химии и химической технологии СО РАН.
Для контактов: Михайлов А.Г., e-mail: mag@icct.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.M. Zhizhaev[1], Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher, e-mail: zhyzhaev@icct.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1447-4050,
A.G. Mikhailov[1], Dr. Sci. (Eng.),
Chief Researcher, e-mail: mag@icct.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5537-7479,
D.I. Tselyuk[1], Dr. Sci. (Geol. Mineral.),
Leading Researcher, e-mail: tselukdi@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1447-4050,
[1] Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences» —
Institute of Chemistry and Chemical Technology
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia.
Corresponding author: A.G. Mikhailov, e-mail: mag@icct.ru.

Получена редакцией 19.06.2025; получена после рецензии 26.08.2025; принята к печати 10.01.2026.
Received by the editors 19.06.2025; received after the review 26.08.2025; accepted for printing 10.01.2026.