



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-12-1065>

УДК 622.7:502.174

**Потенциал использования белитовых шламов Ачинского глиноземного комбината для снижения углеродного следа алюминиевого производства**В.А. Макаров  , Л.Т. Кулему , В.Г. Михеев , Б.М. Лобастов  

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

 vmakarov58s@mail.ru**Аннотация**

Ряд отходов горно-металлургического производства обладает возможностью прямого поглощения углекислого газа CO_2 из атмосферы, поскольку некоторые из них содержат минералы, способные к карбонизации. В статье показано, что такой способностью обладают белитовые шламы Ачинского глиноземного комбината (АГК, АО «РУСАЛ Ачинск») – отходы переработки нефелиновых руд Кия-Шалтырского месторождения. Изучение изменчивости минерального состава шлама в зависимости от времени его хранения на шламовом поле в возрастных интервалах 0–5, 5–25, 25–50 лет показало устойчивое снижение содержания силикатов кальция (ларнит, волластонит, мервинит) и рост содержания карбонатов в ряду от свежих шламов к лежалым. Рассмотрены факторы, влияющие на скорость карбонизации шламов, в том числе проявляющиеся в условиях действующего шламохранилища. Электронно-микроскопическое изучение шламов (СЭМ-ЭДС) показало пористую структуру силикатных частиц шлама, а также характер замещения их кальцитом. Выполнена оценка потенциала данного хранилища для депонирования углекислого газа за счет карбонизации силикатных минералов шламов, химически неустойчивых в атмосферных условиях. По результатам проведенного анализа и литературным данным по поглощающей способности CO_2 силикатами кальция в атмосферных условиях сделан вывод, что максимальным потенциалом поглощения в белитовых шламах обладает ларнит. Применительно к условиям хранилища белитовых шламов АГК рассчитан предельный объем CO_2 , который может быть поглощен при полном взаимодействии ларнита с атмосферным воздухом. Поглощательная способность одной тонны шлама только за счет ларнита (при его содержании 32,6 %) составляет 83,3 кг CO_2 , а с учетом волластонита и мервинита общий потенциал достигает 262 кг/т. Показанные масштабы и динамика процесса преобразования силикатов в карбонаты в объеме шламохранилища позволят учитывать объем поглощенного углекислого газа в расчетах углеродного следа конечной продукции предприятия – алюминия, произведенного из нефелинового сырья.

Ключевые словапоглощение CO_2 , белитовые шламы, ларнит, волластонит, мервинит, карбонизация, углеродный след**Благодарности**

Авторы выражают благодарности сотрудникам АО «РУСАЛ» Локк Евгении Юрьевне и Мухиной Наталье Владимировне за активную поддержку и создание благоприятных условий для проведения исследований.

Для цитированияMakarov V.A., Koulemou L.T., Mikheev V.G., Lobastov B.M. Potential for using belite sludge from the Achinsk Alumina Refinery to reduce the carbon footprint of aluminum production *Mining Science and Technology (Russia)*. 2026;11(1):46–55. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-12-1065>

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

Potential for using belite sludge from the Achinsk Alumina Refinery to reduce the carbon footprint of aluminum productionV.A. Makarov  , L.T. Koulemou , V.G. Mikheev , B.M. Lobastov  

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

 vmakarov58s@mail.ru**Abstract**

Certain types of waste from mining and metallurgical industry have the potential to directly absorb carbon dioxide (CO_2) from the atmosphere, as some of them contain minerals capable of carbonation. The paper demonstrates that belite sludges from the Achinsk Alumina Refinery (AAR, RUSAL Achinsk JSC), a byproduct



of processing nepheline ores from the Kiya-Shaltyrskoye deposit, possess this property. An investigation of the variability in the mineral composition of the sludges as a function of storage duration in the sludge field (sludge storage facility), across the duration intervals of 0–5, 5–25, 25–50 years revealed a steady decrease in the content of calcium silicates (larnite, wollastonite, merwinite) and an increase in the content of carbonates as the sludge aged from fresh to old. This study examines the factors influencing the rate of sludge carbonation including those observed under conditions typical of an operational sludge storage facility. The electron microscopy (SEM-EDS) analysis of the sludge revealed the porous structure of the silicate particles in the sludge, as well as the extent to which they had been replaced by calcite. An assessment has been conducted of this storage facility's potential for carbon dioxide deposition through the carbonation of silicate minerals in sludge that are chemically unstable under atmospheric conditions. Based on the results of the analysis and literature data on the CO₂ absorption capacity of calcium silicates under atmospheric conditions, it was concluded that larnite has the maximum absorption potential in belite sludges. Based on the conditions at the ARR's belite sludge storage facility, the maximum volume of CO₂ that can be absorbed during complete interaction between larnite and atmospheric air has been calculated. The absorption capacity of one ton of the sludge solely due to larnite (with its content of 32.6%) is 83.3 kg of CO₂, and taking into account wollastonite and merwinite, the total potential reaches 262 kg/t. The scale and dynamics of the process of converting silicates into carbonates in the sludge storage facility will allow the volume of absorbed carbon dioxide to be taken into account in calculations of the carbon footprint of the enterprise's end-use product, aluminum produced from nepheline ore.

Keywords

CO₂ absorption, belite sludge, larnite, wollastonite, merwinite, carbonation, carbon footprint

Acknowledgments

The authors would like to thank Evgeniya Yu. Lokk and Natalia V. Mukhina of RUSAL JSC for their active support and for creating favorable conditions for conducting this research.

For citation

Makarov V. A., Koulemou L. T., Mikheev V. G., Lobastov B. M. Potential for using belite sludge from the Achinsk Alumina Refinery to reduce the carbon footprint of aluminum production *Mining Science and Technology (Russia)*. 2026;11(1):46–55. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-12-1065>

Введение

Сокращение углеродного следа крупных промышленных предприятий становится важным фактором их конкурентоспособности. В октябре 2021 г. Правительство РФ утвердило стратегию социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года, которая предусматривает снижение выбросов к 2030 г. до 70 % от уровня 1990 г.

По мнению экспертов, ключевую роль в сокращении выбросов парниковых газов и решении проблемы изменения климата сыграют CCUS-технологии (Carbon Capture, Utilization, and Storage), которые представляют собой комплекс методов улавливания, использования и хранения углекислого газа CO₂ [1–3]. Основными элементами CCUS являются: **улавливание** (Capture) – отделение CO₂ от промышленных выбросов (например, ТЭС, цементные заводы) или прямо из воздуха; **использование** (Utilization) – применение CO₂ в промышленности; **хранение** (Storage) – закачка CO₂ в подземные геологические формации (бывшие нефтегазовые месторождения, солёные водоносные горизонты) или минерализация (связывание CO₂ в твёрдые карбонаты). Последнее направление связано с развитием технологий прямого захвата CO₂ из воздуха (технологии DAC – Direct Air Capture).

Возможностью прямого поглощения CO₂ из атмосферы обладают отходы горно-металлургического производства, поскольку многие из этих образований (хвосты обогащения, вскрышные породы, шлаки, шламы и др.) могут содержать минералы, способные к карбонизации. В частности, некоторые горнопро-

мышленные отходы (особенно ультраосновные и основные породы) содержат силикаты кальция, магния и железа (оливин, серпентин, волластонит и др.), которые химически неравновесны в поверхностных условиях и при взаимодействии с газами атмосферы способны связывать CO₂ в устойчивые карбонаты (кальцит, магнезит и др.) [4–6].

Цель настоящего исследования – показать потенциал и возможность поглощения углекислого газа из атмосферы белитовыми шламами – отходами производства Ачинского глинозёмного комбината.

В задачи исследования входили изучение изменчивости минерального состава шлама в зависимости от времени его хранения на шламовом поле и оценка потенциала данного хранилища для депонирования углекислого газа за счет карбонизации силикатных минералов шламов, химически неустойчивых в атмосферных условиях.

Объект и методы исследования

Ачинский глинозёмный комбинат (АГК, АО «РУСАЛ Ачинск») был введен в эксплуатацию в 1973 г. Получение глинозема на комбинате осуществляется переработкой нефелиновой руды Кия-Шалтырского месторождения. Важным экологическим аспектом производства глинозема на данном предприятии является образование большого количества отходов – белитового шлама, который складывается на шламохранилище, расположенном в пойме р. Чулым (рис. 1).

Площадь шламохранилища составляет 90 га, а высота отвала более 100 м. Накопленный объем белитового шлама – более 300 млн т.

Изучение свойств шлама и возможностей его использования в народном хозяйстве началось практически с момента запуска комбината. С тех пор были установлены различные области его применения: производство белитового цемента, содопродуктов, использование в качестве мелиорантов (раскислителей почв), сорбентов, пищевых добавок в корма для птиц, пигментов для производства красок и др.

Несмотря на широкий спектр потребительских свойств белитового шлама объем его повторного использования незначителен (не более 20% от поступления на карту намыва) и несопоставим с масштабом и скоростью накопления. Вместе с тем, учитывая значительный объем данного материала, представляется целесообразным рассмотреть его в качестве перспективного объекта для секвестрации углерода, поскольку силикаты магния и кальция, содержащиеся в данных отвалах, являются потенциальными материалами для связывания атмосферного CO_2 в стабильные карбонаты. Это технологическое направление актуально для борьбы с парниковым эффектом и может быть одной из составляющих снижения углеродного следа производимого на комбинате глинозема и, в конечном итоге, произведенного алюминия.

Основанием для постановки работ послужил количественный рентгенофазовый анализ трех случай-

но отобранных проб шлама из карт намыва различного времени хранения, который показал тенденцию резкого снижения в отвалах содержания силикатов кальция при продолжительном воздействии атмосферы (рис. 2). Отбираемые с разных хранилищ шламы условно названы как «старые», «средние» и «свежие».

Методика дальнейших исследований включала отбор 76 проб шлама различного возраста хранения с поверхности карт намыва, а также сравнительное изучение минерального (рентгенофазовый анализ, оптическая и электронная микроскопия) и химического состава (ICP-AES, ICP-MS).

Результаты исследований

Литологически шламы представляют рыхлую массу с преобладанием частиц песчаной и алевритовой размерности, т.е. шлам соответствует алевритистому песку. До глубин 2,5–4 м шлам, как правило, рыхлый, а глубже наблюдается его цементация, вызванная взаимодействием шламовых вод и кальциевых силикатов (ларнит, волластонит, мервинит). В отдельных случаях отмечается цементация шлама с поверхности. С глубиной происходит возрастание содержания крупнозернистого шлама (до размеров крупного песка) и сокращение содержания алевритовых (пылевидных) фракций.

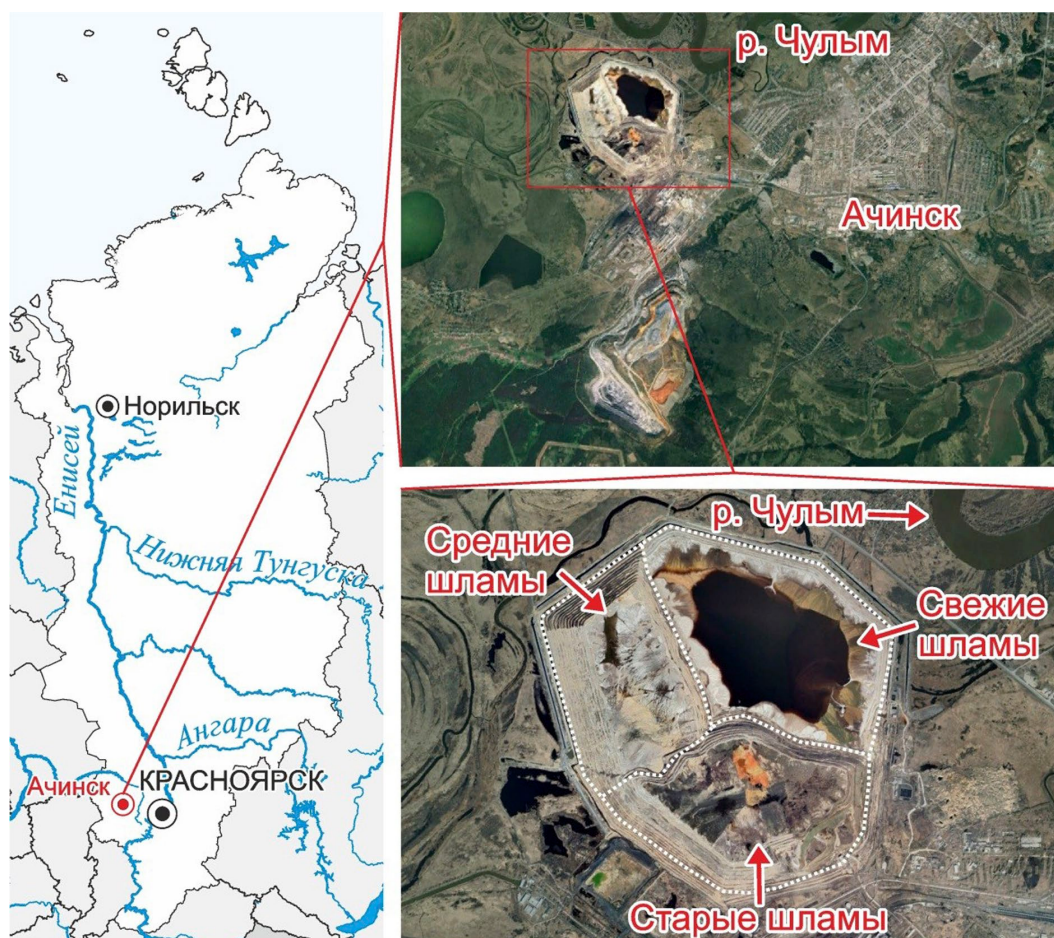


Рис. 1. Расположение шламохранилища АГК и его общий вид с отмеченными картами намыва различного срока заложения: свежие шламы (0–5 лет хранения); средние шламы (5–25 лет хранения); старые шламы (25–50 лет хранения)

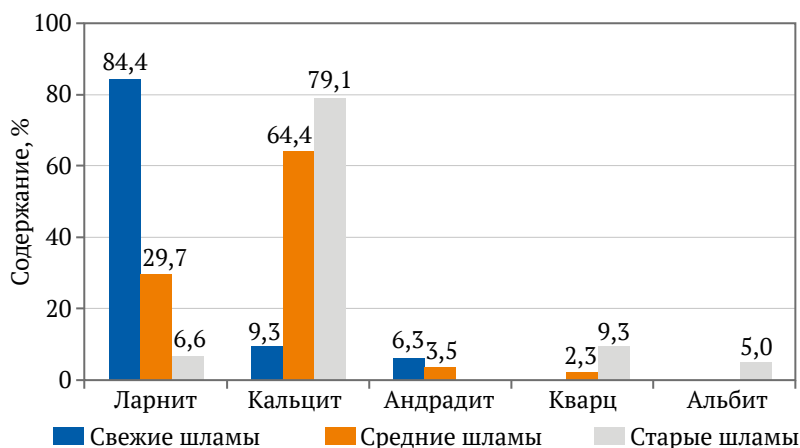


Рис. 2. Динамика изменчивости содержания ларнита и кальцита в шлаках различного времени хранения (случайно отобранные пробы с поверхности карт): свежие шламы (0–5 лет хранения); средние шламы (5–25 лет хранения); старые шламы (25–50 лет хранения)

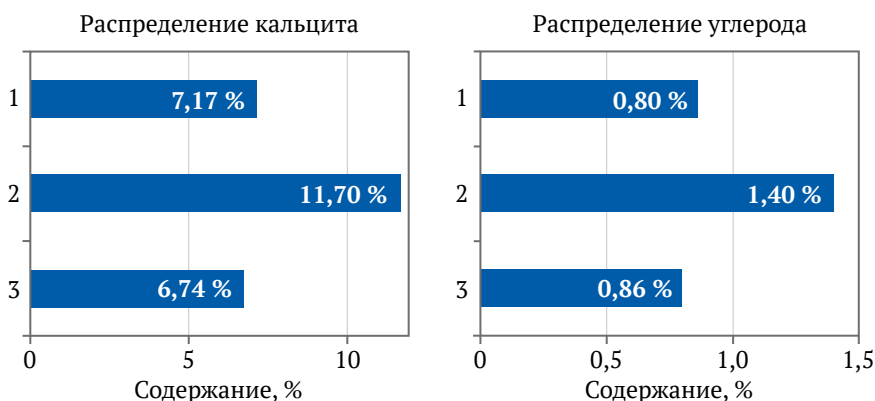


Рис. 3. Развитие белой корки, сложенной вторичными минералами (соли К и Na + карбонаты) в шлаках (слева). Пробы (борозды длиной 15 см) отобраны в борту потока пульпы у точки слива из слоя двухмесячной давности. Справа графики распределения в пробах кальцита и углерода по данным рентгенофазового и рентгенофлуоресцентного анализов соответственно

Формирование шламохранилища осуществляется путем намыва гидравлическим способом по системе пульпопроводов с оборотной системой движения воды. Это определяет слоистую текстуру шламов, свойственную осадочным породам. Слои залегают под углами 1–5° к центру хранилища. Состав шлама и структурно-текстурные особенности обуславливают его повышенную пористость и хороший дренаж поверхностной воды. Технологическая вода, поступающая на карту намыва по пульповоду, имеет температуру около 60 °С, что наряду с повышенной влажностью, хорошей аэрацией материала хвостов приводит к интенсивному формированию вторичных минералов, в том числе в холодное время года (рис. 3).

Показательно, что максимальное количество кальцита, как и углерода, концентрируется в интервале 15–30 см от поверхности, что, вероятно, связано с особыми условиями влажности и поглощением углекислого газа из воздуха.

Химический состав шламов и характер его изменчивости в зависимости от времени хранения отражены в табл. 1.

Из таблицы видно, что по большинству элементов серьезных изменений содержаний в шлаках различного времени хранения не наблюдается. Активный вынос элементов с поверхности шламовых отвалов наблюдается только для магния и натрия.

Рентгенофазовые исследования шламов (изучены по две пробы, случайно отобранные с поверхности каждой карты намыва) показали, что из силикатов кальция кроме ларнита в пробах присутствуют волластонит и мервинит (табл. 2).

Из табл. 3 следует, что сумма силикатов кальция и магния в ряду свежий шлам–средний шлам–старый шлам последовательно уменьшается: 79,44–76,96–68,9 (%), а суммарное содержание карбонатов возрастает: 18,98–27,47–27,09 (%). Вместе с тем установленное в одной из проб свежих шламов (табл. 2, проба СВ1) высокое содержание карбонатов отражает быструю и неравномерную карбонизацию содержащихся в них силикатных минералов. Пример такой высокой скорости карбонизации при благоприятных условиях показан на рис. 3.



Таблица 1

**Химический состав белитовых шламов
по данным ICP-AES*
(средние содержания в выборках из 10 проб)**

Элементы, г/т	Категория шлама по времени хранения**		
	Свежий (СВ)	Средний (СР)	Старый (СТ)
As	10,6	9,3	11,2
B	22,0	22,8	20,8
Ba	290,8	298,2	208,6
Ca	297294,0	285448,4	296804,6
Co	8,2	7,6	7,3
Cr	29,3	22,5	25,5
Cu	16,9	30,0	20,5
Li	12,2	10,1	11,8
Mg	10724,1	9314,8	7530,5
Na	11587,7	7140,7	5346,8
Ni	16,6	15,1	14,8
P	1242,6	1119,9	1197,7
Pb	16,4	22,7	17,2
S	1338,3	787,3	889,4
Sb	2,9	2,4	3,1
Sn	1,3	1,2	1,2
Sr	986,4	982,9	907,7
Ti	2032,4	1833,0	1790,5
Zn	46,4	48,3	52,4

* Анализы выполнены в лаборатории ООО ЦГИ «Прогноз».

** СВ – 0–5 лет; СР – 5–25 лет; СТ – 25–50 лет.

С целью оценки характера процессов замещения силикатов кальция карбонатом выполнены электронно-микроскопические исследования трех проб разновозрастных шламов. С использованием метода СЭМ-ЭДС изучены свежие, средние и старые шламы. Для микроскопических исследований из материала проб, цементированного эпоксидной смолой, изготовлены полированные препараты.

Анализы СЭМ-ЭДС выполнены в R&D Центре Норникель – СФУ на установке Tescan Vega III SBH с интегрированной системой Oxford X-Act при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда 2,0 нА (на чаше Фарадея); накопление спектров производилось из точки до шкалы в 300 тыс. импульсов. При анализе использованы образцы химически чистых элементов и соединений стандартов MAC (Micro-Analysis Consultants Ltd, Великобритания; рег. № 11192): O – SiO₂, Al – Al₂O₃, Si – SiO₂, Ca – волластонит, CaSiO₃. Определение кислорода проводилось как прямым методом, так и по стехиометрии, что позволяло косвенно оценить наличие в минералах гидроксильной группы и/или воды. Измерение тока зонда производилось на стандарте металлического кобальта MAC (рег. № 9941) через каждые 60 мин исследования.

Образцы напылялись углеродом при помощи автоматической системы напыления токопроводящим слоем с контролем толщины напыляемого слоя Quorum 150 RES, толщина напыления составляет 20 нм.

Результаты исследований показали, что «свежие» шламы сложены преимущественно силикатами кальция (рис. 4). Размер частиц колеблется в диапазоне от первых десятков микрометров до 0,5 мм. Форма их неправильная, кляксовидная, амёбовидная, также отмечаются угловатые полигональные частицы.

Таблица 2

**Минеральный состав проб белитовых шламов различного времени хранения*
по данным количественного рентгенофазового анализа, %****

Материал	Минерал					
	Ларнит Ca ₂ SiO ₄	Волластонит CaSiO ₃	Мервинит Ca ₃ Mg[SiO ₄] ₂	Кальцит CaCO ₃	Ватерит CaCO ₃	Арагонит CaCO ₃
Свежий шлам (СВ1)	20,8	49,3	2,22	20,9	2,8	3,44
Свежий шлам (СВ2)	44,4	34,8	7,36	7,94	2,18	1,15
Средний шлам (СР1)	3,8	57,0	12,0	31,5	2,82	3,05
Средний шлам (СР2)	16,5	62,5	3,13	12,2	2,35	2,91
Старый шлам (СТ1)	9,54	58,4	1,7	18,8	5,1	1,89
Старый шлам (СТ2)	8,97	58,4	0,85	23,50	3,28	1,58

* СВ – 0–5 лет; СР – 5–25 лет; СТ – 25–50 лет.

** Анализы выполнены в ЦКП Института цветных металлов СФУ.

Таблица 3

Средние содержания минералов в шламах различного времени хранения

Материал	Минерал					
	Ларнит Ca ₂ SiO ₄	Волластонит CaSiO ₃	Мервинит Ca ₃ Mg[SiO ₄] ₂	Кальцит CaCO ₃	Ватерит CaCO ₃	Арагонит CaCO ₃
Свежий шлам (СВ)	32,6	42,05	4,79	14,2	2,49	2,29
Средний шлам (СР)	10,15	59,25	7,56	21,85	2,64	2,98
Старый шлам (СТ)	9,25	58,4	1,25	21,15	4,19	1,75

При детальном рассмотрении отмечаются:

- плотные частицы, сложенные агрегатом силиката кальция и некоторых примесных компонентов;
- частицы, сложенные тончайшим глобулярным агрегатом силиката кальция, размер глобул составляет первые микрометры;
- частицы, сложенные преимущественно глобулами силиката кальция размером 10–20 мкм.

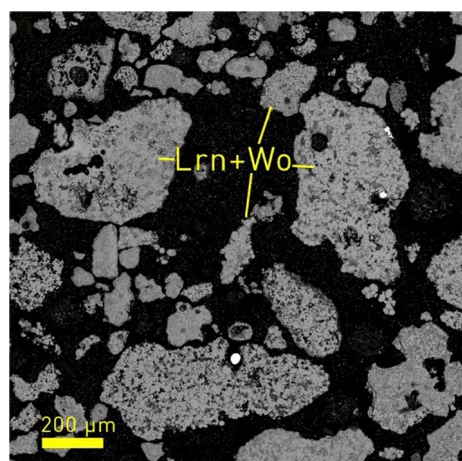
В очень небольшом количестве в составе частиц присутствует карбонат кальция, изредка отмечаются округлые и неправильной формы частицы железа (яркие точки на рис. 4).

В «средних» и «старых» шламах наблюдается замещение силиката кальция карбонатом. На рис. 5 представлен общий вид распределения и характер изменений частиц в «средних» и «старых» шламах. Хорошо видно, что светлые области в ядрах частиц имеют незначительные размеры. Это характерно в большей степени для «средних» шламов, где они могут отсут-

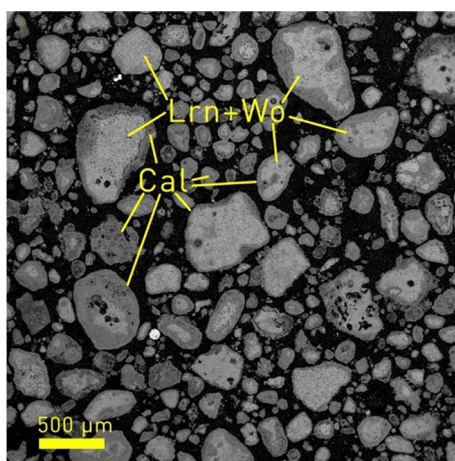
ствовать вовсе. Чаще полное замещение силикатов наблюдается в «старых» шламах, что свидетельствует о значительно большей степени изменения исходного материала. Также на рис. 5 представлены мультиэлементные карты отдельных частиц, в различной степени подвергшихся изменению: их ядра сложены мелкими глобулами силиката кальция, а по периферии развивается плотная корка карбоната кальция, более темная в обратно-отражённых электронах в сравнении с ядром.

Обсуждение результатов

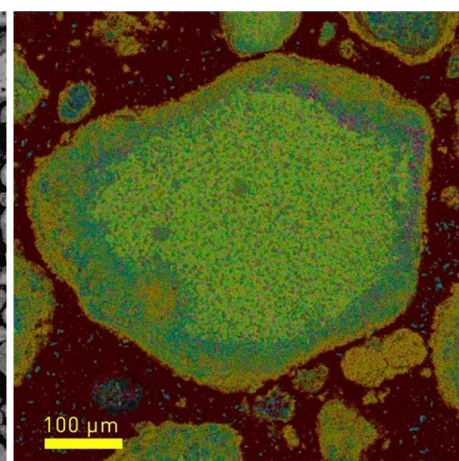
Полученные данные по минеральному составу белитовых шламов АГК и динамике его изменчивости показывают, что в хранилище в современных условиях идут процессы карбонизации силикатов. В атмосферных условиях все силикаты (ларнит, волластонит, мервинит), слагающие основную массу шламов, в различной степени способны поглощать CO_2 .



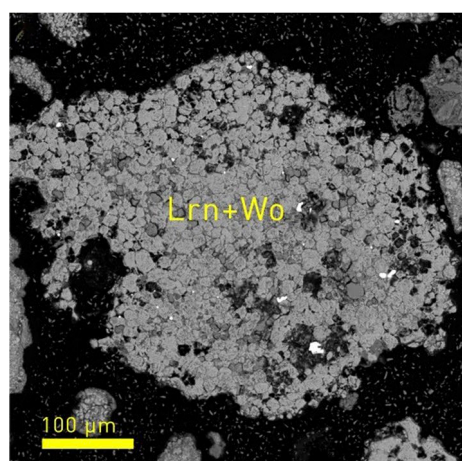
а



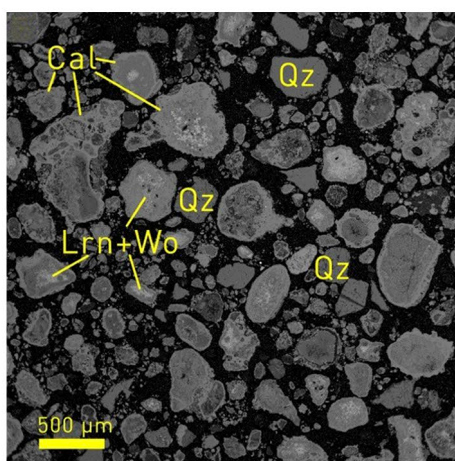
а



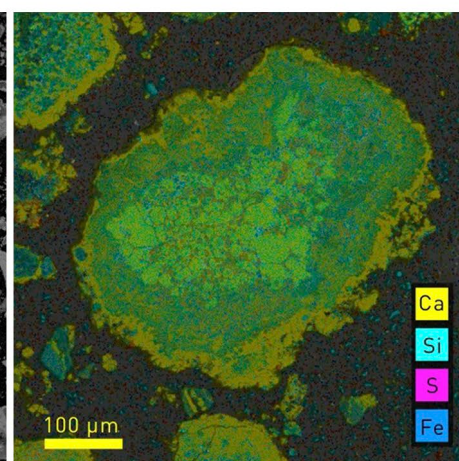
б



б



б



з

Рис. 4. «Свежие» шламы; хорошо видны глобулярные агрегаты силикатов кальция: ларнита Lrn и волластонита Wo светло-серого цвета, немногочисленные яркие точки – частицы железа. Фото в обратно-отражённых электронах

Рис. 5. «Средние» (а, б) и «старые» (в, з) шламы; хорошо видно зональное строение частиц – в центральной части светло-серый материал – силикаты кальция: ларнит Lrn и волластонит Wo, на периферии развивается тёмно-серый кальцит Cal, отмечаются немногочисленные частицы кварца Qz; изображения б и з – мультиэлементные карты в псевдоцветах, условные обозначения представлены на изображении.

Фото в обратно-отражённых электронах



Устойчивость данных силикатов в атмосферных условиях и скорость поглощения углекислого газа различны и зависят от целого ряда факторов, а именно: факторов окружающей среды, факторов, связанных с характером материала и продуктами, формирующимися в результате реакции [7, 8].

В первой группе факторов определяющим является концентрация CO_2 в атмосфере (чем выше концентрация диоксида углерода в воздухе, тем быстрее идет реакция). Также критически важным фактором является влажность. При слишком низкой влажности (< ~25%) недостаточно воды для протекания реакции гидратации и собственно карбонизации (CO_2 должен раствориться в воде). При слишком высокой влажности (> ~90%) поры материала заполняются водой, что замедляет диффузию газа. Оптимальной считается влажность в диапазоне 50–70 % [9, 10]. Влияние температуры на скорость карбонизации двояко.

С повышением температуры скорость химической реакции увеличивается (правило Вант-Гоффа). Однако повышенная температура также может снизить относительную влажность и растворимость CO_2 , что в данных реакциях может привести к противоположному результату. Отраженная на рис. 3 динамика формирования вторичных минералов на поверхности хранилища свидетельствует о высокой скорости процессов формирования вторичных карбонатов и появления аномальных содержаний углерода под тонким поверхностным слоем. Очевидно, это связано с растворением углекислого газа воздуха в поровой воде, где минимально испарение и оптимальные для замещения силикатов кальция температурные условия.

В общем случае в умеренных диапазонах рост температуры ускоряет карбонизацию. Говоря о факторах окружающей среды применительно к условиям хранения белитовых шламов АГК, можно констатировать благоприятное их сочетание для карбонизации. Это относительно высокое содержание CO_2 – хранилище находится в промышленной зоне города, повышенная влажность как за счет осадков (наблюдается вынос подвижных элементов, см. табл. 1), так и парения технологических вод в местах слива на картах намыва, температура которых может изменяться в диапазоне от 60 до 80 °С. Горячие технологические воды также являются благоприятным температурным фактором карбонизации в зимний период. В месте их слива круглый год существует локальная термальная аномалия.

Ключевыми факторами, связанными с материалом, являются минеральный состав, а также пористость и проницаемость. Два последних фактора определяют доступ CO_2 внутрь материала. Чем больше открытых пор и капилляров, тем легче CO_2 проникает вглубь и тем выше скорость карбонизации. Для белитовых шламов АГК алевритовая и песчаная размерность зерен силикатов кальция, а также высокая пористость каждой отдельной частицы шлама (см. рис. 4), являются весьма благоприятными факторами. Это позволяет полагать, что хранилище белитовых шламов как минимум в верхней его части проницаемо для углекислого газа атмосферного воздуха.

Минеральный состав шламов существенно влияет на скорость карбонизации. Преобладающими силикатами в составе шламов АГК, которые будут определять его скорость карбонизации, являются ларнит и волластонит. Реакции и условия поглощения углекислого газа этими минералами различны. Для ларнита карбонизация происходит ступенчато через его гидратацию с образованием портландита и гидросиликата кальция ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot a\text{H}_2\text{O}$), далее карбонизация портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$) и затем карбонизация гидросиликата кальция ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot a\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \cdot b\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$) [11–13].

Литературные данные показывают, что скорость карбонизации ларнита в атмосферных условиях весьма велика. Однако она является переменной величиной и зависит от формирования на поверхности пассивирующей карбонатной пленки. На начальном этапе на свежесформированной поверхности реакция начинается относительно быстро, так как концентрация CO_2 и доступность ионов кальция максимальны. По мере образования слоя карбоната кальция CaCO_3 на поверхности частиц ларнита этот слой начинает играть роль барьера. Для продолжения реакции молекулам CO_2 и воде необходимо диффундировать через этот слой, а ионам кальция и кремниевой кислоте – выходить из него наружу. Этот процесс диффузии значительно замедляет общую скорость реакции [7, 11]. Описанные явления отчетливо фиксируются в белитовых шламах различного срока хранения на АГК. На рис. 5 видно, что крупные частицы силикатов кальция окружены каймой карбоната кальция, мелкие частицы зачастую полностью замещены карбонатом.

В мировой литературе известны работы по оценке динамики и масштаба поглощения ларнитом углекислого газа в атмосферных условиях [14, 15]. Описанные там наблюдения и эксперименты на сталеплавильных отходах (шлаках), основным минерал которых ларнит (50 % исходного шлака), показали, что объем поглощения CO_2 при комнатной температуре составляет 243 кг на тонну свежего стального шлака.

Скорость карбонизации волластонита в атмосферных условиях (0,04 % CO_2 , 25 °С) достаточно низкая и практически незаметна. Однако в оптимизированных условиях (высокие концентрации CO_2 , повышенная температура, тонкий помол, наличие воды) реакция может протекать достаточно быстро. Главное отличие от ларнита заключается в том, что волластонит не требует стадии гидратации и карбонизируется напрямую [16,17].

Оценки устойчивости волластонита к атмосферным воздействиям и его способность поглощать CO_2 путем карбонизации в атмосферных условиях выполнены в работе канадских исследователей. Сравнительный анализ скорости поглощения CO_2 хвостами обогащения кимберлитовых рудников на северо-западных территориях Канады и добываемой волластонитовой рудой, богатой CaSiO_3 , из месторождения в Онтарио, показал, что волластонитовая руда более склонна к выветриванию и карбонизации, чем кимберлитовые хвосты (содержащие медленно вы-



ветривающиеся гидратированные силикаты магния и алюмосиликаты). Однако в атмосферных условиях процесс идет медленно [8, 18, 19].

Исходя из проведенного анализа и литературных данных по поглощающей способности CO_2 силикатами кальция в атмосферных условиях [12, 14, 20] можно сделать вывод, что максимальным потенциалом поглощения обладает ларнит. Применительно к условиям хранилища белитовых шламов АГК можно рассчитать предельный объем поглощенного газа, если минералы прореагируют с атмосферным воздухом полностью (табл. 4).

Таблица 4

Потенциал поглощения углекислого газа одной тонной белитового шлама АГК

Массы (минерала и поглощенного CO_2) из 1 т шлама		Свежий шлам (СВ), навески, кг
Ларнит, CO_2 , кг	Ларнит Ca_2SiO_4	326,00
	CO_2	83,30
Волластонит, CO_2 , кг	Волластонит CaSiO_3	420,50
	CO_2	159,31
Мервинит, CO_2 , кг	Мервинит $\text{Ca}_3\text{Mg}[\text{SiO}_4]_2$	47,90
	CO_2	19,24
Сумма, кг	CO_2	261,85
	Минералы	794,40

Основные выводы

1. Главными минералами белитовых шламов АГК являются силикаты кальция – ларнит, волластонит, мервинит, которые в различной степени склонны к карбонизации (поглощению углерода из атмосферного воздуха).

2. Изменение минерального состава шлама в зависимости от времени его хранения на шламовом поле в возрастных интервалах 0–5, 5–25, 25–50 лет

показывает устойчивое снижение содержания силикатов кальция (ларнит, волластонит, мервинит) и рост содержания карбонатов в ряду от свежих шламов к старым (лежалым).

3. Из факторов, влияющих на скорость карбонизации шламов в атмосферных условиях, на действующем шламохранилище основными являются: минеральный состав, пористая структура силикатных частиц шлама и характер замещения их кальцитом. Благоприятными условиями, влияющими на скорость поглощения углекислого газа, являются повышенная влажность на поверхности и относительно высокая температура (60–80 °С) оборотной воды, поступающей на карту намыва. Последнее является благоприятным фактором для протекания реакций поглощения CO_2 в холодные периоды.

4. По результатам проведенного анализа сделан вывод, что по поглощающей способности CO_2 в атмосферных условиях и скорости карбонизации максимальным потенциалом обладает ларнит. Применительно к условиям хранилища белитовых шламов АГК рассчитан предельный объем поглощенного CO_2 , который может быть поглощен при полном взаимодействии ларнита с атмосферным воздухом. При содержании ларнита 32,6 % одна тонна шлама будет поглощать 83,3 кг CO_2 .

5. Белитовые шламы АГК, помимо разнообразных направлений использования в народном хозяйстве, необходимо рассматривать как образование, потенциально пригодное для прямого поглощения углекислого газа из атмосферного воздуха. Исходя из накопленных объемов отходов, более 300 млн т, потенциал по поглощению углекислого газа, при условии что все силикаты кальция будут замещены кальцитом, достаточно велик – 80 млн т CO_2 . Понимание динамики процесса преобразования силикатов в объеме шламохранилища позволит учитывать объем поглощенного углекислого газа в расчетах углеродного следа конечной продукции предприятия – алюминия, произведенного из нефелинового сырья.

Список литературы / References

1. Рябов Г.А., Петелин С.А., Вивчар А.Н. и др. Технологии улавливания диоксида углерода на ТЭС, его транспортировка, полезное использование и захоронение. В: Клименко А.В. (ред.) *Экология, энергетика, энергосбережение*. Вып. 3. М.: ПАО «Мосэнерго»; 2022. 32 с.
Ryabov G.A., Petelin S.A., Vivchar A.N. et al. Technologies for capturing carbon dioxide at thermal power plants, its transportation, useful use and storage. In: Klimentko A.V. (Ed.) *Ecology, Energy, Energy Saving*. Iss. 3. Moscow: PJSC Mosenergo; 2022. 32 p. (In Russ.)
2. Осипцов А.А., Гайда И.В., Грушевенко Е.А., Капитонов С.А. *Технологии по улавливанию, хранению и использованию углерода (CCUS) – технологическая основа декарбонизации тяжелой промышленности в РФ*. М.: Проектный центр по энергопереходу и ESG; 2022. 79 с.
Osipstov A.A., Gayda I.V., Grushevenko E.A., Kapitonov S.A. *Carbon capture, utilization and storage (CCUS) technologies – the technological basis for decarbonizing heavy industry in the Russian Federation*. Moscow: Project Center for Energy Transition and ESG; 2022. 79 p. (In Russ.)
3. Zevenhoven R., Back J., Fagerlund J., Sorjonen-Ward P. *Mineral carbonation using mine tailings – A strategic overview of potential and opportunities*. Cheltenham, UK: IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG); 2022 Jul. 123 p. Report No.: 2022-10.
4. Sanna A., Uibu M., Caramanna G. et al. A review of mineral carbonation technologies to sequester CO_2 . *Chemical Society Reviews*. 2014;43(23):8049–8080. <https://doi.org/10.1039/c4cs00035h>



5. Kusin F.M., Hasan S.N.M.S., Molahid V.L.M. et al. Carbon dioxide sequestration of iron ore mining waste under low-reaction condition of a direct mineral carbonation process. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023;30(9):22188–22210. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23677-3>
6. Ibrahim M.H., El-Naas M.H., Benamor A. et al. Carbon mineralization by reaction with steel-making waste: a review. *Processes*. 2019;7(2):115. <https://doi.org/10.3390/pr7020115>
7. Santos A., Ajbaryb M., Morales-Florezb V. et al. Larnite powders and larnite/silica aerogel composites as effective agents for CO₂ sequestration by carbonation. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;168(2–3):1397–1403. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.026>
8. Chai Y.E., Chalouati S., Fantucci H., Santos R.M. Accelerated weathering and carbonation (mild to intensified) of natural Canadian silicates (kimberlite and wollastonite) for CO₂ sequestration. *Crystals*. 2021;11(12):1584. <https://doi.org/10.3390/cryst11121584>
9. Allah P., Nguyen H., Illikainen M. et al. Wet carbonation of wollastonite with pH-modified solutions at ambient conditions: Insights from a geochemical model. *Journal of CO₂ Utilization*. 2025;101:103194. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2025.103194>
10. Gineika A., Siauciunas R., Baltakys K. Synthesis of wollastonite from AlF₃-rich silica gel and its hardening in the CO₂ atmosphere. *Scientific Reports*. 2019;9(1):18063. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54219-6>
11. Huijgen W.J.J., Comans R.N.J. *Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation: literature review*. Petten: Energy Research Centre of the Netherlands (ECN); 2003 Feb. Report No.: ECN-C--03-016. 52 p.
12. Johnson D.C., MacLeod C.L., Carey P.J., Hills C.D. Solidification of stainless-steel slag by accelerated carbonation. *Environmental Technology*. 2003;24(6):671–678. <https://doi.org/10.1080/09593330309385602>
13. Montes-Hernandez G., Renard F. Time-resolved in situ Raman spectroscopy of the nucleation and growth of siderite, magnesite, and calcite and their precursors. *Crystal Growth & Design*. 2016;16(12):7218–7230. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.6b01406>
14. Crouzet C., Brunet F., Montes-Hernandez G. et al. Hydrothermal valorization of steel slags – Part I: coupled H₂ production and CO₂ mineral sequestration. *Frontiers in Energy Research*. 2017;5:29. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2017.00029>
15. Fritz B., Clement A., Montes-Hernandez G., Noguera C. Calcite formation by hydrothermal carbonation of portlandite: complementary insights from experiment and simulation. *CrystEngComm*. 2013;15(17):3392–3401. <https://doi.org/10.1039/c3ce26969h>
16. Wang T., Tang W., Zhang W. et al. Effect of surface water on wollastonite carbonation: activated dissolution and mass transfer. *Chemical Engineering Journal*. 2024;485:149324. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149324>
17. Coppola A., Scala F., Azadi M. Direct dry carbonation of mining and industrial wastes in a fluidized bed for offsetting carbon emissions. *Processes*. 2022;10(3):582. <https://doi.org/10.3390/pr10030582>
18. Sipilä J., Teir S., Zevenhoven R. *Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation: literature review update 2005–2007*. Turku: Åbo Akademi University, Heat Engineering Laboratory; 2008. Report No.: VT 2008-1. 59 p. URL: <https://www.remineralize.org/wp-content/uploads/2015/10/LITR1.pdf>
19. Saran R.K., Arora V., Yadav S. CO₂ sequestration by mineral carbonation: a review. *Global NEST Journal*. 2018;20(3):497–503. <https://doi.org/10.30955/gnj.002597>
20. Bourgeois F., Julcour C. *Rapport bibliographique. Programme “Carboscories”*. Nouméa: CNRT “Nickel & son Environnement”; 2015. 43 p. (In French)

Информация об авторах

Владимир Александрович Макаров – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии месторождений и методики разведки, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация; ORCID [0009-0005-5971-8070](https://orcid.org/0009-0005-5971-8070), Scopus ID [57188966055](https://orcid.org/57188966055), SPIN-код [8941-0236](https://orcid.org/8941-0236); e-mail vmakarov58s@mail.ru

Лоран Тьебо Кулему – аспирант кафедры геологии месторождений и методики разведки, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация; ORCID [0009-0001-1191-5834](https://orcid.org/0009-0001-1191-5834); e-mail laurentthiebokoulemou1999@gmail.com

Владимир Георгиевич Михеев – кандидат геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии месторождений и методики разведки, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация; ORCID [0009-0003-2503-6448](https://orcid.org/0009-0003-2503-6448), SPIN-код [2100-3262](https://orcid.org/2100-3262); e-mail vmikheev1938@mail.ru

Борис Михайлович Лобастов – старший преподаватель кафедры геологии, минералогии и петрографии, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-6075-968X](https://orcid.org/0000-0002-6075-968X), Scopus ID [57211486240](https://orcid.org/57211486240), SPIN-код [4368-7330](https://orcid.org/4368-7330); e-mail lbm02@ya.ru



Information about the authors

Vladimir A. Makarov – Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Professor, Head of the Department of Geology of Mineral Deposits and Exploration Methods, Institute of Non-Ferrous Metals and Materials Science, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation; ORCID 0009-0005-5971-8070, Scopus ID 57188966055, SPIN 8941-0236; e-mail vmakarov58s@mail.ru

Laurent Thiebo Koulemou – PhD Student, Department of Geology of Mineral Deposits and Exploration Methods, Institute of Non-Ferrous Metals and Materials Science, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation; ORCID 0009-0001-1191-5834; e-mail laurentthiebokoulemou1999@gmail.com

Vladimir G. Mikheev – Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Professor, Department of Geology of Mineral Deposits and Exploration Methods, Institute of Non-Ferrous Metals and Materials Science, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation; ORCID 0009-0003-2503-6448, SPIN 2100-3262; e-mail vmikheev1938@mail.ru

Boris M. Lobastov – Senior Lecturer, Department of Geology, Mineralogy and Petrography, Institute of Non-Ferrous Metals and Materials Science, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation; ORCID 0000-0002-6075-968X, Scopus ID 57211486240, SPIN 4368-7330; e-mail lbm02@ya.ru

Поступила в редакцию 15.12.2025
Поступила после рецензирования 08.02.2026
Принята к публикации 10.02.2026

Received 15.12.2025
Revised 08.02.2026
Accepted 10.02.2026