

УСКОРЕННОЕ ВЫВЕТРИВАНИЕ ХВОСТОВ ПЕРЕРАБОТКИ РУДЫ ТРУБКИ "ИНТЕРНАЦИОНАЛЬНАЯ" КАК ОСНОВА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КЛИМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТА CDR-ТИПА НА МИРНИНСКО-НЮРБИНСКОМ ГОКЕ

¹А.Ю. Масанов, ²А.Ю. Бычков, ^{3,4}Г.П. Двойченкова, ³А.С. Тимофеев, ¹А.В. Габрашитова

¹АК "АЛРОСА" (ПАО), г. Мирный,

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

³Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва,

⁴Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного Федерального университета имени М.К. Аммосова, г. Мирный

Проведены экспериментальные и полевые исследования карбонизации отработанного кимберлита трубки "Интернациональная". Установлены причины отсутствия поглощения в хвостохранилище, при том что в лабораторных условиях руда показывает высокий уровень поглощения. Предложено и осуществлено раздельное складирование хвостов переработки руд и песков в хвостохранилище МНГОК. За счет этих мер в 2025/2026 гг. реализован Климатический проект CDR-типа мощностью поглощения из атмосферы до 25 тыс. т CO₂/год, первый такого типа в России.

Ключевые слова: климатический проект, кимберлит, хвосты, алмазы, руда

Статья поступила в редакцию 10.04.2026, доработана 23.04.2026, принята к публикации 14.05.2026

Enhanced Weathering of Processing Tailings from the "Internationalnaya" Kimberlite Pipe as a Basis for CDR Project at the Mirny-Nyurba Mining and Processing Division

¹A.Yu. Masanov, ²A.Yu. Bychkov, ^{3,4}G.P. Dvoichenkova, ³A.S. Timofeev, ¹A.V. Gabrashitova

¹ALROSA PJSC, 678175 Mirny, Russia,

²Lomonosov Moscow State University, 119991 Moscow, Russia,

³Academician N.V. Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, 111020 Moscow, Russia,

⁴Polytechnic Institute (Branch), M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 678170 Mirny, Russia

Experimental and field studies of the carbonation of processed kimberlite from the Internationalnaya kimberlite pipe were carried out. The reasons for the absence of carbon dioxide uptake in the tailings storage facility, despite the high sequestration capacity of the material under laboratory conditions, were identified. A separate deposition strategy for ore-processing tailings and sand fractions within the tailings storage facility of the Mirny-Nyurba Mining and Processing Division was proposed and implemented. As a result of these measures, a CDR (Carbon Dioxide Removal)-type climate project with an atmospheric carbon dioxide removal capacity of up to 25,000 t CO₂/year was implemented in 2025–2026, representing the first project of this type in Russia.

Keywords: climate project, kimberlite, tailings, diamonds, ore

Received 10.04.2026, revised 23.04.2026, accepted for publication 14.05.2026

DOI: 10.18412/1816-0395-2026-8-11-17

Климатический проект АЛРОСА* "Увеличение поглощений парниковых газов на Мирнинско-Нюрбинском ГОКе" — результат многолетних исследований способности кимберлита поглощать углекислый газ из воздуха при добыче, пере-

работке руды и дальнейшем пребывании в хвостохранилище, где происходят основные реакции преобразования минералов под воздействием воды и воздуха. Многочисленные исследования на Западе [1–4], посвященные способности ультраосновных по-

род поглощать углекислый газ из воздуха, сформировали устойчивые понятия CCS (Carbon capture and Storage) — технологии захвата и удержания углерода в неорганическом виде и CDR (Carbon dioxide removal). Одним из направлений таких проектов CCS-CDR стало усиленное выветривание минералов (Enhanced

*<https://carbonreg.ru/ru/projects/121/>.

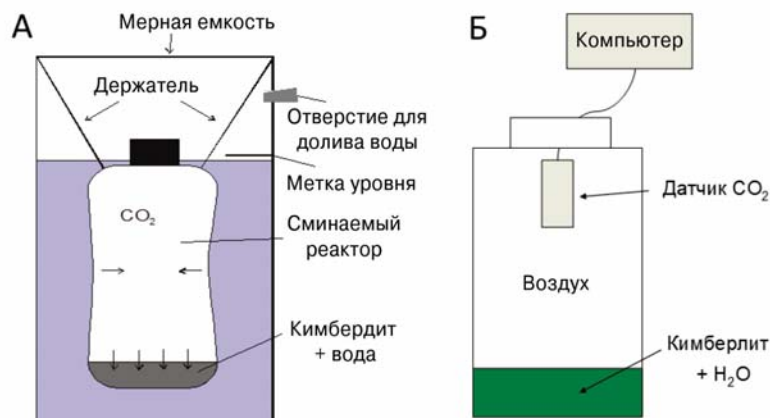


Рис. 1. Схема эксперимента по поглощению CO₂:

А – в реакторе переменного объема (метод 1); Б – в реакторе с датчиком углекислого газа (метод 2)

Fig. 1. Schematic diagram of the CO₂ absorption experiment:

А – in a variable-volume reactor (Method 1); Б – in a reactor equipped with a carbon dioxide sensor (Method 2)

weathering of minerals) [5]. Данные процессы весьма органичны для естественных циклов углерода, имеющих место в природе без участия человека. В результате эрозии горных пород происходит преобразование одних минералов в другие. Содержащийся в большом количестве горных пород в недрах оливин под воздействием воды, углекислого газа, окислителей преобразуется в магнетит, лизардит, серпентин и далее в глины — вермикулит, смектит, сапонит. Углерод в таких процессах берется из воздуха в виде CO₂ и в конце своего пути (условно) навечно запечатывается в виде камня — карбонатов кальция и магния. В природе эти процессы происходят крайне медленно, а накопленный углерод в виде осадочных известняковых пород представляет собой склад с захоронением последнего, который когда-то в предыдущие геологические эпохи содержался в воздухе планеты.

Динамика накопления выбросов углерода в результате деятельности человека сильно опережает темпы естественного захоронения углерода, что приводит к накоплению углекислого газа в атмосфере земли. Превышение уровня 400 ppm CO₂ в воздухе Земли сделало очевидным то, что рост глобальной температуры связан с деятельностью человека [5], а также дало импульс для сокращения выбросов парниковых газов, с одной стороны, и поиска технологических решений для захвата и необратимого удержания углерода — с другой стороны. Оба направ-

ления составляют основу для климатических проектов, направленных как на сокращение выбросов, так и на повышение поглощения.

С 2021 г. Центр инноваций и технологий совместно с Экологическим центром и геологическими службами АК "АЛРОСА" (ПАО) провели ряд исследований [6, 7], направленных на изучение образцов хвостов переработки кимберлитовых руд различного возраста (1–10 лет). Результаты показали следы накопления углерода из воздуха в виде прироста карбонатов, что свидетельствовало о самопроизвольном поглощении углекислого газа из воздуха, к которому приводила производственная деятельность компании. Дальнейшие полноценные исследования совместно с геологическим факультетом МГУ им. М.В. Ломоносова [8] включали термодинамические моделирования реакций с теоретическим обоснованием условий для протекания реакций, посредством которых происходит поглощение углекислого газа из атмосферы, стендовые и полевые исследования, изучающие карбонизацию хвостов при пребывании измельченной и переработанной руды на воздухе в условиях климатических особенностей местности и количественные замеры накопления карбонатов в течении 20 лет. В результате была разработана Методика количественного определения поглощения углекислого газа (СТО АЛРОСА 1-2.007.2024).

Особая ситуация наблюдалась в хвостохранилище Мирнинско-Нюрбинского ГОКа (МНГОК),

где, с одной стороны, руда трубок "Мир", "Интернациональная", "Бутобинская", "Нюрбинская" показывала хорошую способность поглощать углекислый газ в экспериментальном изучении в лаборатории, но, с другой стороны, полевые исследования не подтверждали следов накопления карбонатов, что свидетельствовало об отсутствии поглощения углекислого газа в этих условиях. Руда этих трубок не вошла в Методику.

Превышение уровня поглощения углекислого газа над эмиссией позволило Компании заявить о достигнутой углеродной нейтральности алмазно-бриллиантового комплекса в 2025 г., а также впервые был получен отрицательный углеродный след на алмазы производства АЛРОСА, он составил -0,71 кг CO₂ экв/карат (отрицательное значение).

Экспериментальное исследование карбонизации руды трубки "Интернациональная"

В предыдущих работах с участием авторов настоящей статьи [8] было экспериментально показано поглощение углекислого газа исходной кимберлитовой рудой из ядерных различных трубок ("Удачная", "Зарница", "Юбилейная", "Айхал", "Заполярная", "Магнитная", "Новинка", "Комсомольская", "Архангельская", "им. Карпинского-1,2"). Общим выводом стало то, что все образцы поглощают CO₂ в присутствии воды схожим образом. Реакцию характеризует лог-фаза продолжительностью до нескольких суток, когда поглощение не наблюдается. Все функции становятся линейными, это означает, что лимитирующей стадией реакции служит стадия образования новой фазы. По углу наклона были рассчитаны кинетические коэффициенты.

Объекты и методы. Определение скоростей протекания реакций, сопровождающихся поглощением углекислоты из воздуха, проводилось с использованием двух параллельных методик измерения (рис. 1). В качестве объектов исследования использовались:

- образцы кимберлита — три штучные пробы из ядра скважин трубки "Интернациональная" (образцы К-16 (Скв. 9/10 70. 0 ПК), К-17 (Скв. 690/18 Р 45.1

ПК+АБК), К-18 (690/15 Р 36,5 ПК));

- *сборный образец кимберлита трубки "Интернациональная"* — искусственная смесь равных масс (по 100 г) дробленых образцов К-16, К-17 и К-18 (ИНТ);

- *смеси кимберлита с песком* — экспериментальные образцы, приготовленные путем смешивания сборного образца ИНТ с песком в пропорциях 5, 10, 20 и 50 % песка по массе.

При приготовлении экспериментальных образцов использовался аллювиальный песок из русла р. Москвы, просеянный через сито 1 мм. Данный материал применялся в качестве модельного аналога песков из россыпных месторождений, поступающих в хвостохранилище МНГОК, для приготовления смесей с кимберлитом.

Все образцы исследовались по единой методике: для каждого из них проводились эксперименты по методу 1 (измерения в реакторе переменного объема, продолжительность τ до 30 сут, регулярные измерения объема реактора); для ключевых составов выполнялись эксперименты по методу 2 (непрерывная регистрация концентрации CO_2 в замкнутом объеме).

Результаты и обсуждение. Эксперименты показали, что все исследованные образцы кимберлита способны поглощать CO_2 . На рис. 2, 3 представлены кинетические кривые для индивидуальных образцов К-16, К-17, К-18. При обработке экспериментальных данных установлено, что в координатах "поглощение CO_2 — $\sqrt{\tau}$ " все функции становятся линейными. С точки зрения химической кинетики гетерогенных реакций такой случай означает, что лимитирующим процессом является образование на поверхности новой фазы. Диффузия углекислоты через растущий слой новой фазы лимитирует скорость реакции и приводит к наблюдаемой зависимости. Из полученных линейных зависимостей могут быть определены два ключевых кинетических параметра:

- кинетический коэффициент — тангенс угла наклона прямой, равный скорости поглощения CO_2 , отнесенной к $\sqrt{\tau}$ ($\text{г CO}_2/100 \text{ г породы}/\text{сут}^{0.5}$). Данный параметр характеризует интенсивность про-

цесса карбонизации и может быть использован для прогнозного моделирования;

- лаг-фаза — начальный период подготовки системы, когда заметного поглощения CO_2 еще не происходит. В это время на поверхности кимберлита только формируется реакционный слой, необходимый для запуска активной карбонизации.

Все исследованные образцы кимберлита демонстрируют близкие значения углов наклона в указанных координатах, что свидетельствует о сопоставимости их кинетических характеристик. Чтобы оценить, как смешение кимберлита с песком повлияет на эффективность карбонизации, была проведена серия экспериментов с искусственными смесями сборного образца ИНТ и песка (метод 1). Контрольные опыты с чистым песком подтвердили его инертность — поглощения CO_2 не зафиксировано. Смесь с 50 % песка также не проявила активности. Для других смесей и чистого кимберлита было зафиксировано уменьшение объема.

Как видно из рис. 4, добавление песка резко уменьшает поглощение, что сказывается на кинетическом коэффициенте (0,2 $\text{г CO}_2/100 \text{ г}/\text{сут}^{0.5}$ для 5 % и 0,09 $\text{г CO}_2/100 \text{ г}/\text{сут}^{0.5}$ для 10 %) и на времени начала реакции. Так, начало изменения объема для 10 % примеси песка было отмечено только на 6-е сутки, а для 20 % — на 25-е сутки.

Все описанные выше эксперименты (метод 1) проводились в атмосфере чистого CO_2 , что необходимо для ускорения процессов и получения кинетических параметров в лабораторное время. Однако в реальных условиях хвостохранилища кимберлит контактирует с воздухом, где содержание углекислого газа существенно ниже. Чтобы проверить, сохраняются ли выявленные закономерности при концентрациях CO_2 , близких к природным, была проведена серия экспериментов по методу 2 (непрерывная регистрация снижения концентрации CO_2 в замкнутом объеме воздуха). Данный метод является более экспрессным и позволяет наблюдать кинетику поглощения в условиях, максимально приближенных к реальной атмосфере.

На рис. 5 показано снижение относительной концентрации CO_2 при взаимодействии с чистым кимберлитом ИНТ и его смесями с песком. Полученные результаты полностью подтверждают выводы, сделанные ранее по результатам метода 1. Чистый кимберлит демонстрирует наиболее интенсивное поглощение CO_2 — его концентрация в замкнутом объеме снижается быстро и достигает минимальных значений. Смесь с песком пока-

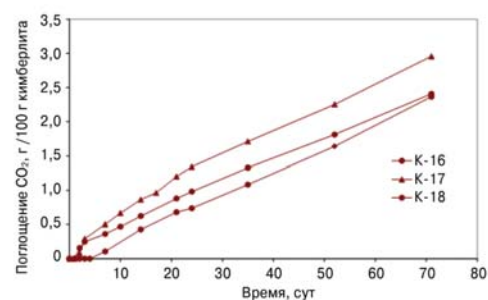


Рис. 2. Зависимость поглощения CO_2 образцами кимберлита трубки "Интернациональная" от времени

Fig. 2. Dependence of carbon dioxide uptake by kimberlite samples from the "Internatsionalnaya" pipe on time

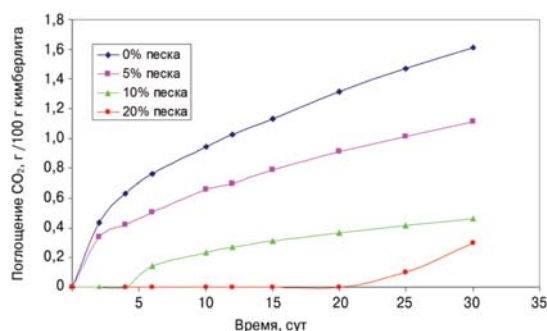


Рис. 3. Зависимость поглощения CO_2 различными смесями кимберлита и песка от времени

Fig. 3. Dependence of CO_2 uptake by different kimberlite-sand mixtures on time

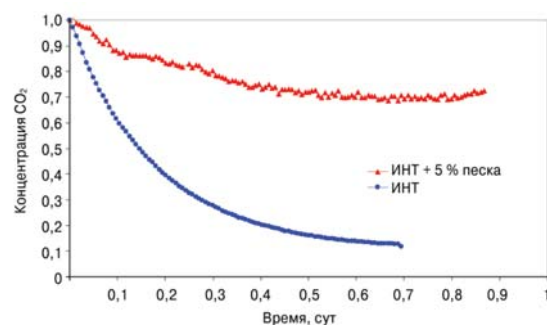


Рис. 4. Зависимость концентрации CO_2 в замкнутом реакторе (значение 1 соответствует 100 % массы CO_2 в реакторе) при взаимодействии со смесями кимберлита и песка от времени

Fig. 4. Dependence of the CO_2 concentration in the closed reactor (value 1 corresponds to 100 % of the CO_2 mass in the reactor) during interaction with kimberlite-sand mixtures on time

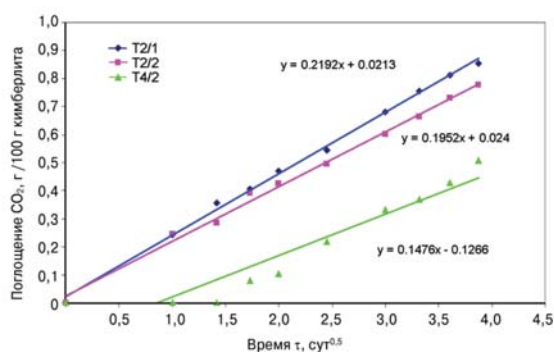


Рис. 5. Расчет кинетических коэффициентов для проб донных отложений

Fig. 5. Calculated kinetic coefficients for bottom sediment samples

зывает заметно более медленное падение концентрации CO_2 . Таким образом, эксперименты в условиях, моделирующих атмосферную концентрацию CO_2 , подтверждают вывод о том, что присутствие песка подавляет способность кимберлита к карбонизации.

Причина ингибирования процесса. Микроскопические исследования показали, что многие зерна серпентина покрылись корками гидрооксидов и силикатов железа. Такие пленки затрудняют реакцию серпентина с углекислым газом. В некоторых случаях удалось диагностировать, что корка состоит из железистого хлорита. Этот минерал устойчивый и не участвует в карбонизации, что доказано термодинамическими расчетами. На зернах, где пленки не сформировались, фиксируется образование карбонатов (кальцита). Таким образом, ингибирующий эффект песка объясняется химическим взаимодействием: песок выступает источником железа,

формирующего на поверхности кимберлита пленку вторичных минералов.

Кинетические коэффициенты. Для количественного описания поглощений зарекомендовала себя методика, основанная на применении кинетических коэффициентов. Рассчитанные кинетические коэффициенты и значения лаг-фазы для всех исследованных образцов приведены в таблице. Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы.

Индивидуальные образцы и смесь образцов трубки "Интернациональная". Все исследованные образцы кимберлита (К-16, К-17, К-18 и сборный ИНТ) демонстрируют близкие значения кинетического коэффициента — в диапазоне 0,25–0,35 г CO_2 /100 г/сут^{0,5}. Это подтверждает сопоставимость их реакционной способности. Некоторое варьирование лаг-фазы (от 1,1 до 5,3 сут) может быть связано с различиями в минеральном составе исходных образцов.

Влияние примеси песка. Добавление песка закономерно ухудшает кинетические характеристики: при 5 % песка кинетический коэффициент снижается до 0,20 г CO_2 /100 г/сут^{0,5}, лаг-фаза сохраняется на уровне чистого кимберлита (~1,5 сут). При 10% песка коэффициент падает до 0,09 г CO_2 /100 г/сут^{0,5}, а лаг-фаза возрастает до 6 сут. При 20 % песка скорость реакции крайне низка (коэффициент не поддается надежному определению), а лаг-фаза достигает 25 сут. Смесь с 50 % песка ведет себя как чистый песок — поглощение отсутствует. Возможное объяснение наблюдаемого эффекта связано с составом песка. Использованный песок содержит значительное количество железа, что подтверждается буро-коричневым цветом смесей с 20 % и более песка. Вероятно, соединения железа осаждаются на поверхности зерен кимберлита, образуя экранирующий слой. Этот слой блокирует доступ CO_2 к активным центрам минералов и затрудняет реакцию карбонизации. Полученные параметры являются основой для последующих расчетов поглощения CO_2 в различных сценариях складирования хвостов.

Полевые исследования хвостов переработки руды песков

Проведенные эксперименты позволили определить кинетические параметры карбонизации и выявить ключевую роль примеси песка в её подавлении. Результаты изучения хвостов переработки руды и песков в хвостохранилище обогатительной фабрики № 3 (далее ОФ № 3), проведенные ранее [8], свидетельствовали об отсутствии наблюдаемого поглощения. Пробы для натурных исследований отбирались на хвостохранилище третьей очереди ОФ № 3 МНГОК. В данное хвостохранилище поступают как кимберлитовые хвосты из коренных месторождений, так и пески из россыпных месторождений, что определяет смешанный состав складированных отходов. Исследование проб пляжных намывов показало, что содержание карбонатного углерода в них составляет от 1,8 до 6,5 % (среднее 3,4 %). Максимальные содержания наблюдаются для хвостов, составленных преимущественно из материала трубки "Интернациональная", в которой более высокая исходная концентрация карбонатов с возрастом 5 лет.

Для корректной интерпретации этих данных необходимо сопоставить их с содержанием CO_2 в исходном кимберлите. Содержание карбонатного углерода в кимберлите трубки "Интернациональная" составляет 7,7–11,2 (CO_2 , % по массе), что не превышает количество в хвостах.

Поскольку содержание карбонатов в пляжных намывах не превышает их содержания в исходном кимберлите, был сделан вывод об отсутствии связывания углекислого газа пляжными намывами. Данный вывод полностью согласуется с результатами экспериментов, показавших подавление карбонизации при смешении кимберлита с песком. Исследование проб донных отложений показало, что содержание карбонатного углерода в них составляет 6,2–21,3 % (среднее 10,3 %). Данное значение превосходит содержание карбонатного углерода в пляжных намывах — 1,8–6,5 % (среднее 3,4 %). Детальный анализ проб по участкам опробования выявил следующие закономерности:

Кинетические параметры поглощения CO_2 образцов кимберлита трубки "Интернациональная" и их смеси с песком

Kinetic parameters of CO_2 uptake by kimberlite samples from the Internatsionalnaya pipe and their mixtures with sand

Образец	Лаг-фаза, сут	Кинетический коэффициент, г CO_2 /100 г/сут ^{0,5}
К-16	1,10	0,249
К-17	1,35	0,350
К-18	5,33	0,296
ИНТ	~1,5	0,300
ИНТ+5 % песка	~1,5	0,200
ИНТ+10 % песка	6,0	0,090
ИНТ+20 % песка	25	Не определяли
ИНТ+50 % песка	Нет	Не поглощает

• Участок 1. Проба T1/1 (песчаной размерности) содержит 12,7 % CO_2 ; проба T1/2 (мелкая фракция алевритовой размерности) — максимальное количество карбонатного углерода — 21,3 % CO_2 ; проба T1/3 (песчаной размерности) содержит 11,3 % CO_2 . Во всех пробах преобладает песок, следов минералов кимберлита не выявлено.

• Участок 2. Проба T2/1 (песчаной размерности) — преобладает кимберлит, содержание CO_2 — 5,81 %, что ниже содержания в исходном кимберлите (7,7–11,2 %); проба T2/2 (алевритовой размерности) — также преобладает кимберлит, содержание CO_2 — 8,01 %.

• Участок 3. Пробы T4/1 и T4/2 содержат смесь песчаных и кимберлитовых пород, представлены крупнозернистым песком, содержание CO_2 — 6,2–6,9 %.

Ключевое наблюдение заключается в том, что максимальное содержание CO_2 зафиксировано не в пробах с преобладанием кимберлита, а в пробах песка (участок 1). Этот факт имеет принципиальное значение для понимания механизма карбонизации в текущих условиях (совместное складирование хвостов).

Изучение карбонизации донных отложений

Эксперименты с пробами донных отложений (метод 1) преследовали две цели: во-первых, подтвердить, что кимберлит сохраняет способность поглощать CO_2 даже после длительного нахождения в хвостохранилище; во-вторых, оценить, как присутствие песчаной примеси влияет на этот процесс в реальных, уже сформировавшихся отложениях. Результаты экспериментов приведены на рис. 5. Наибольшее поглощение наблюдалось для образцов T2/1 и T2/2, состоящих преимущественно из кимберлита. Образец T4/2, представляющий собой смесь кимберлита и песка, поглощает заметно меньше CO_2 и имеет большую продолжительность лаг-фазы (2 сут). Прочие образцы, состоящие из песка, не показали поглощения углекислого газа. Даже образец T4/1, где примесь кимберлита заметна и может достигать 50 %, не связывал CO_2 .

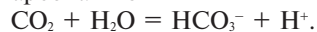
Для проб с преобладанием кимберлита (T2/1, T2/2, T4/2)

эти кинетические коэффициенты существенно ниже, чем для чистого кимберлита (см. таблицу). Пробы песка, как и в контрольных экспериментах, не проявили способности к связыванию CO_2 .

Таким образом, экспериментально подтверждено, что даже в донных отложениях, где уже произошло некоторое накопление карбонатов, кимберлитовый материал сохраняет потенциал для дальнейшей карбонизации. Однако присутствие песка этот потенциал снижает.

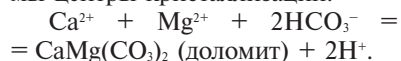
В пробах песка было зафиксировано высокое содержание карбонатов. При этом сами пески, поступающие в хвостохранилище из россыпных месторождений, не содержат карбонатов в сколь угодно значимых количествах — это подтверждается данными по составу россыпей. Следовательно, наблюдаемое накопление карбонатов не может быть связано с исходным составом песков. На основе полученных данных предлагается следующий механизм накопления карбонатов в донных отложениях хвостохранилища.

• *Поступление CO_2 .* Атмосферный углекислый газ растворяется в воде хвостохранилища, образуя угольную кислоту и гидрокарбонат-ионы



• *Поступление катионов.* Ионы кальция и магния поступают в воду при выщелачивании кимберлитовых минералов (серпентин, оливин). Взаимодействие кимберлита с водой повышает pH, что способствует сдвигу равновесия в сторону образования карбонат-иона.

• *Осаждение доломита.* Из раствора, пересыщенного относительно доломита, происходит осаждение этого минерала. Для начала кристаллизации необходимы центры кристаллизации:



• *Роль песка.* В предлагаемой схеме песок выполняет функцию центров кристаллизации для зарождения и роста кристаллов доломита. Поверхность песчаных зерен предоставляет готовые площадки для осаждения карбонатного материала из пересыщенного раствора.

Вместе с тем, в условиях донных отложений песок может спо-

собствовать осаждению карбонатов благодаря нескольким факторам:

• *Центры кристаллизации.* Поверхность песчаных зерен служит готовыми центрами для зарождения и роста кристаллов доломита из пересыщенного раствора.

• *Влияние на pH.* Присутствие гидроксидов железа, связанных с песчаными частицами, может локально подщелачивать раствор, способствуя осаждению карбонатов.

• *Дополнительный источник CO_2 .* В пробах донных отложений обнаружена примесь органического вещества, главным образом, опада лиственницы. Деструкция этого вещества бактериями в донных отложениях выделяет дополнительное количество CO_2 .

Следовательно, можно утверждать, что в базовых условиях совместного складирования реализуется механизм, при котором кимберлит выступает источником ионов магния и кальция, песок — центром кристаллизации, а связывание углерода из CO_2 происходит через раствор с последующим осаждением доломита на песчаных частицах. Этот процесс существенно менее эффективен, чем прямая карбонизация кимберлита и лимитируется объемом воды и наличием центров кристаллизации. Раздельное складирование песков и рудных хвостов позволит реализовать потенциал связывания кимберлита.

Интенсификация поглощения за счет раздельного складирования хвостов переработки руд и песков

Прогноз связывания CO_2 по годам базируется на экспериментально установленном кинетическом коэффициенте. Значение этого коэффициента для кимберлита трубки "Интернациональная" находится в интервале, характерном для всех изученных коренных месторождений АК "АЛРОСА" (ПАО). Это определяется близким минеральным составом кимберлита разных месторождений. Для расчета использовались консервативные значения, полученные при оценке кинетического коэффициента. Сопоставление с природными наблюдениями на хвостохранилищах Удачинского, Айхаль-

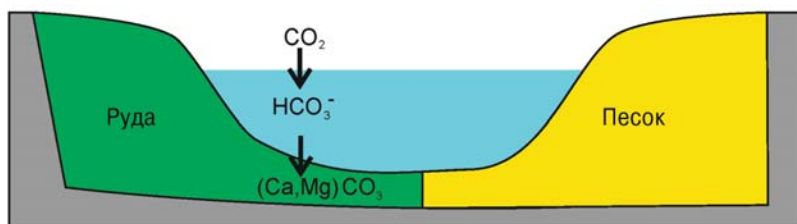


Рис. 6. Схема поглощения углекислого газа при проведении мероприятий по раздельному складированию хвостов руды и песка

Fig. 6. Scheme of carbon dioxide uptake during the implementation of separate storage of ore tailings and sand



Рис. 7. Торцевой сброс T4 подлёдного складирования на XX ОФЗ МНГОК

Fig. 7. End discharge T4 of the under-ice storage facility at TSF OPP-3 of MNMPD (Tailings Storage Facility, Ore Processing Plant No. 3 of the Mirny–Nyurba Mining and Processing Division)

ского и Ломоносовского ГОК показало хорошую сходимость расчетных и наблюдаемых значений связывания углекислого газа. Для хвостохранилища МНГОК природные наблюдения не показали связывания углекислого газа. Установлена причина: смешение хвостов разного состава — руды и песков. Раздельное складирование должно привести к процессу связывания CO_2 . Не установлено других факторов, препятствующих протеканию реакции карбонизации кимберлита трубки "Интернациональной". В связи с этим можно утверждать, что проведение мероприятий по раздельному складированию хвостов приведет к расчетному связыванию углекислого газа. Для

расчета теоретического поглощения CO_2 после проведения мероприятий по раздельному складированию хвостов могут применяться кинетические коэффициенты, определенные для чистого кимберлита. Экспериментально определенный кинетический коэффициент для такого состава равен $0,20 \text{ г } \text{CO}_2/100 \text{ г породы/сут}^{0,5}$.

Расчеты связывания, полученные в результате проведенных исследований, стали основой для Методики расчета поглощения углекислого газа для хвостохранилища МНГОК (в базовом и проектных вариантах) при реализации климатического проекта раздельного складирования руд и песков, утвержденного в качестве

Стандарта организации СТО АЛРОСА 1-2.007.2026 Приказом генерального директора АК "АЛРОСА" (ПАО) № 01/65-П от 06.03.2026.

При совместном складировании кимберлита и песка прямая карбонизация руды подавлена. Поглощение CO_2 происходит по механизму, включающему растворение атмосферного CO_2 в воде, поступление ионов кальция и магния из кимберлита и последующее осаждение доломита на песчаных частицах как центрах кристаллизации.

Интегральный коэффициент накопления CO_2 при совместном складировании хвостов:

$$3,82\% \text{CO}_2/\text{год}^{0,5} \times 2,76 \% \text{CO}_2/\text{год}^{0,5} \approx 0,1 \% \text{CO}_2/\text{год}^{0,5}.$$

При раздельном складировании процесс карбонизации протекает круглогодично, включая зимний период, так как при подлёдном складировании хвосты находятся под слоем воды и не промерзают. Схема поглощения углекислого газа при проведении мероприятий по раздельному складированию хвостов руды и песка представлена на рис. 6.

В годовом выражении коэффициент связывания углекислого газа за 365 дней составит $0,20 \text{ г } \text{CO}_2/100 \text{ г породы/сут}^{0,5} \times \sqrt{365 \text{ сут}} = 3,82 \% \text{CO}_2/\text{год}^{0,5}$.

Реализация климатического проекта

Идея климатического проекта основана на разделении самопроизвольного поглощения, происходящего в результате производственной деятельности компании, и дополнительного поглощения (сверх базового), которое может быть реализовано путем применения специальных мер интенсификации. Так были дополнительно изучены причины отсутствия поглощения в МНГОК.

Ключевым требованием для создания таких условий, в свою очередь, стало требование раздельного складирования руды трубки "Интернациональной" от песков россыпных месторождений. Это означало буквально складирование руды в одних локациях в пределах хвостохранилища, а песков — в других, таким образом, чтобы они не перемешивались и примеси песков не ограничивали протекания реакций преобразования минералов.



Рис. 8. Схемы проекта при совместном и раздельном складировании кимберлита и песков

Fig. 8. Project schemes for combined and separate storage of kimberlite and sand

Заключение

Климатический проект "Увеличение поглощений парниковых газов на Мирнинско-Нюрбинском ГОК Группы компаний "АЛРОСА" был утвержден для реализации Приказом генерального директора АК "АЛРОСА" (ПАО) в июле 2025 г., а уже в сентябре 2025 г. было осуществлено раздельное складирование хвостопродуктов. Размещение хвостов переработки проводится путем подледного складирования

в соответствии технологической картой заполнения хвостопродуктами обогатительной фабрики № 3. Вид торцевого сброса показан на рис. 7. Схемы климатического проекта при совместном и раздельном складировании показаны на рис. 8.

Реализация данного климатического проекта после выхода на полную мощность позволит достичь объемов поглощения до 26 тыс. т CO₂ в год.

Климатический проект под наименованием "Увеличение поглощения парниковых газов на Мирнинско-Нюрбинском ГОК Группы компаний "АЛРОСА"" получил отчет и заключение о валидации, зарегистрирован в Реестре углеродных единиц и стал первым технологическим проектом поглощения CDR-типа, реализованным в России.

Литература

1. Mervine E.M., Wilson S.A., Power I.M., et al. Potential for offsetting diamond mine carbon emissions through mineral carbonation of processed kimberlite: an assessment of De Beers mine sites in South Africa and Canada. *Mineralogy and Petrology*. 2018. 112 (Suppl 2). P. 755–S765. <https://doi.org/10.1007/s00710-018-0589-4>.
2. Paulo C., Power I.M., Stubbs A.R., et al. Evaluating feedstocks for carbon dioxide removal by enhanced rock weathering and CO₂ mineralization. *Applied Geochemistry*. 2021. Vol. 129. P. 104955. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.104955>.
3. Conti S. De Beers Explores the Carbon-zapping Powers of Kimberlite. April 22, 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.debeersgroup.com/~media/Files/D/De-Beers-Group/documents/building-forever/carbonvault-in-the-press.pdf>.
4. Mervine E.M., Wilson S.A., Power I.M., et al. Potential for offsetting diamond mine carbon emissions through mineral carbonation of processed kimberlite: an assessment of De Beers mine sites in South Africa and Canada. *Mineralogy and Petrology*. 2018. 112 (Suppl 2). P. 755–765. <https://doi.org/10.1007/s00710-018-0589-4>.
5. Collaborating for a net-zero future. Global Status of CCS Report 2024 by Global CCS Institute. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/11/Global-Status-Report-6-November.pdf>.
6. Масанов А.Ю., Дубовичев М.А., Толстов А.В. и др. Потенциал компенсации выбросов парниковых газов предприятий группы "АЛРОСА" за счет карбонизации отработанного кимберлита. Рациональное освоение недр. 2021. № 4. С. 64–73. doi: 10.26121/RON.2021.87.40.008.
7. Масанов А.Ю., Анисимова П.С., Толстов А.В. и др. Реализация экологических инициатив АК "АЛРОСА" (ПАО) по достижению углеродной нейтральности. Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26. № 4. С. 54–66. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-54-66>.
8. Масанов А.Ю., Бычков А.Ю., Горячкина Д.Ю. Прямое поглощение углекислого газа из атмосферы кимберлитовыми породами при разработке коренных алмазных месторождений Якутии и Архангельской области и его вклад в достижение углеродной нейтральности алмазно-бриллиантового комплекса Группы АЛРОСА. Рациональное освоение недр. 2025. № 1. С. 56–73. doi: 10.26121/2219-5963-81-1-56-73.

References

1. Mervine E.M., Wilson S.A., Power I.M., et al. Potential for offsetting diamond mine carbon emissions through mineral carbonation of processed kimberlite: an assessment of De Beers mine sites in South Africa and Canada. *Mineralogy and Petrology*. 2018. 112 (Suppl 2). P. 755–S765. <https://doi.org/10.1007/s00710-018-0589-4>.
2. Paulo C., Power I.M., Stubbs A.R., et al. Evaluating feedstocks for carbon dioxide removal by enhanced rock weathering and CO₂ mineralization. *Applied Geochemistry*. 2021. Vol. 129. P. 104955. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.104955>.
3. Conti S. De Beers Explores the Carbon-zapping Powers of Kimberlite. April 22, 2020. [Elektronnyi resurs]. URL: <https://www.debeersgroup.com/~media/Files/D/De-Beers-Group/documents/building-forever/carbonvault-in-the-press.pdf>.
4. Mervine E.M., Wilson S.A., Power I.M., et al. Potential for offsetting diamond mine carbon emissions through mineral carbonation of processed kimberlite: an assessment of De Beers mine sites in South Africa and Canada. *Mineralogy and Petrology*. 2018. 112 (Suppl 2). P. 755–765. <https://doi.org/10.1007/s00710-018-0589-4>.
5. Collaborating for a net-zero future. Global Status of CCS Report 2024 by Global CCS Institute. [Elektronnyi resurs]. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/11/Global-Status-Report-6-November.pdf>.
6. Masanov A.Yu., Dubovichev M.A., Tolstov A.V. i dr. Potentsial kompensatsii vybrosov parnikovykh gazov predpriyatii gruppy "ALROSA" za schet karbonizatsii otrabotannogo kimberrita. *Ratsional'noe osvoenie neдр*. 2021. № 4. S. 64–73. doi: 10.26121/RON.2021.87.40.008.
7. Masanov A.Yu., Anisimova P.S., Tolstov A.V. i dr. Realizatsiya ekologicheskikh initsiativ AK "ALROSA" (PAO) po dostizheniyu uglerodnoi neutral'nosti. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki*. 2021. T. 26. № 4. S. 54–66. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-54-66>.
8. Masanov A.Yu., Bychkov A.Yu., Goryachkina D.Yu. Pryamoe pogloshchenie uglekislogo gaza iz atmosfery kimberlitovymi porodami pri razrabotke korennykh almaznykh mestorozhdenii Yakutii i Arkhangel'skoi oblasti i ego vklad v dostizhenie uglerodnoi neutral'nosti almazno-brilliantovogo kompleksa Gruppy ALROSA. *Ratsional'noe osvoenie neдр*. 2025. № 1. S. 56–73. doi: 10.26121/2219-5963-81-1-56-73.

А.Ю. Масанов – руководитель направления по внедрению инноваций Центра инноваций и технологий, АК "АЛРОСА" (ПАО), e-mail: MasanovAYu@alrosa.ru • А.Ю. Бычков – д-р геол.-минерал. наук, зав. кафедрой, МГУ им. М.В. Ломоносова, e-mail: andrewbychkov@rambler.ru • Г.П. Двойченко – д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН), профессор, Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного Федерального университета имени М.К. Аммосова, e-mail: dvoigp@mail.ru • А.С. Тимофеев – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, ИПКОН РАН, e-mail: timofeev_ac@mail.ru • А.В. Габрашитова – директор Экологического центра, АК "АЛРОСА" (ПАО), e-mail: GabrashitovaAV@alrosa.ru

A.Yu. Masanov – Head of Innovation Implementation, Innovation and Technology Center, ALROSA PJSC, e-mail: MasanovAYu@alrosa.ru • A.Yu. Bychkov – Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Head of Department, Lomonosov Moscow State University, e-mail: andrewbychkov@rambler.ru • G.P. Dvoichenko – Dr. Sci. (Eng.), Chief Research Fellow, Academician N.V. Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Professor, Polytechnic Institute (Branch), M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, e-mail: dvoigp@mail.ru • A.S. Timofeev – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Fellow, Academician N.V. Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, e-mail: timofeev_ac@mail.ru • A.V. Gabrashitova – Director of the Environmental Center, ALROSA PJSC, e-mail: GabrashitovaAV@alrosa.ru