

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

Алексей Юрьевич Масанов^{1, @}Андрей Юрьевич Бычков²Дарья Юрьевна Горячкина³¹АК «АЛРОСА» (ПАО), Республика Саха (Якутия), Мирный, Россия²МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия³ООО «Кэпт Налог и Консультирование», Москва, Россия¹MasanovAYu@alrosa.ru²andrewbychkov@rambler.ru, ORCID: 0000-0003-2560-6423³DGoryachkina@kept.ru

Автор, ответственный за переписку: А. Ю. Масанов

Аннотация. В работе экспериментально изучено самопроизвольное поглощение углекислого газа из воздуха отработанными кимберлитовыми породами – хвостами переработки алмазосодержащего сырья на промышленных площадках АК «АЛРОСА» (ПАО) и АО «Севералмаз». Уровень поглощений сопоставлен с уровнем выбросов парниковых газов (Score 1, 2) алмазно-бриллиантового комплекса Группы АЛРОСА в 2021–2024 гг. Отчет о выбросах и поглощениях верифицирован независимым аккредитованным органом по сертификации. Впервые зафиксированные поглощения, наряду с другими факторами, включая чистую энергию от ГЭС, превысили эмиссию парниковых газов в 2021–2024 гг. На основании полученных результатов сделаны выводы об углеродной нейтральности алмазно-бриллиантового комплекса Группы АЛРОСА.

Ключевые слова: углеродная нейтральность, кимберлит, карбонизация, окружающая среда, углерод, климат, парниковые газы, климатический проект, углеродные единицы

Для цитирования: 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.

10.26121/ 2219-5963-81-1-56-73

Environmental Conservation
SCIENTIFIC ARTICLE

Carbon dioxide direct absorption from the atmosphere by kimberlite rocks during the development of primary diamond deposits in Yakutia and the Arkhangelsk region and its contribution to the carbon-neutral transition of the ALROSA Group Diamonds Factory

Alexey Yu. Masanov^{1, @}, Andrey Yu. Bychkov², Dar'ya Yu. Goryachkina³¹PJSC «ALROSA», Republic of Sakha (Yakutia), Mirny, Russia²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia³Kept Tax and Advisory LLC, Moscow, Russia¹MasanovAYu@alrosa.ru,²andrewbychkov@rambler.ru, ORCID: 0000-0003-2560-6423³DGoryachkina@kept.ru

@Corresponding author: Alexey Yu. Masanov

Abstract. The article presents the results of an experimental study of spontaneous absorption of carbon dioxide from the air by kimberlite rocks, namely, tailings from processing of diamond-containing raw materials at the industrial sites of ALROSA and Sevelmaz. The level of absorption is compared with the level of greenhouse gas emissions (Scope 1, 2) of the ALROSA Group Diamonds Factory in 2021-2024. The emissions and absorption report has been verified by an independent accredited certification body. For the first time, the recorded uptake, along with other factors, including clean energy from Hydro Power Plants, exceeded greenhouse gases emission in 2021-2024. Based on the results obtained, conclusions are drawn about the carbon neutrality of the ALROSA Group Diamonds Factory.

Keywords: Carbon neutrality, Kimberlite, Carbonation, Environment, Carbon, Climate, Greenhouse gases, Climate project, Carbon units

For citation: Masanov AY, Bychkov AY, Goryachkina DY. Carbon dioxide direct absorption from the atmosphere by kimberlite rocks during the development of primary diamond deposits in Yakutia and the Arkhangelsk region and its contribution to the carbon-neutral transition of the ALROSA Group Diamonds Factory. *Ratsional'noye osvoeniye neдр* [Mineral Mining & Conservation] 2025;(1): 56–73. (In Russ). doi: 10.26121/2219-5963-81-1-56-73.

1. Введение

Способность ультраосновных пород поглощать углекислый газ при выветривании — продолжительном контакте с атмосферным воздухом — широко известна и описана в литературе [1, 2]. Однако изучение этого явления не имело практического значения до того момента, пока не появилась необходимость в поиске дополнительных возможностей по увеличению поглощения углекислого газа из атмосферы.

Такая способность, в свою очередь, сводится к очень характеристичной реакции, лежащей в основе многих взаимодействий в природе, — основание реагирует с кислотой с образованием соли и воды. Поскольку в недрах Земли (как и других планет земного типа) минералы, как правило, имеют основную природу, а атмосфера — кислотную, главным образом за счет диоксида углерода, такое взаимодействие упрощенно сводится к реакции типа:



в которой Me — это любой распространенный в земной коре металл (Ca, Mg и др.).

Реакции взаимодействия ультраосновных пород с углекислым газом (которые в реальности описываются более сложными химическими уравнениями, сопровождающимися преобразованием минералов), содержащимся в воздухе, приводят к поглощению CO_2 с образованием кальцита, доломита и других нерастворимых в воде карбонатов.

В природе карбонаты накапливаются в виде осадочных пород — известняка, который можно назвать конечным видом существования углерода. Если бы не процесс связывания углекислого газа в карбонаты, то, по оценке [3, с. 90, 277], содержание углекислого газа в атмосфере превосходило бы сегодняшнее значение на несколько порядков (около 400 ppm), а его парциальное давление достигало бы 90–100 бар, как на Венере. В свою очередь, это привело бы к необратимому парниковому эффекту с температурами, стабильно превышающими 550 °C.

По общепринятой концепции, лежащей в основе современных представлений о климате, про-

исходящие в природе процессы карбонизации и отложения известняка происходят существенно медленнее современного накопления углекислого газа в атмосфере, которое принято связывать с антропогенными выбросами. По этим же представлениям накапливающаяся концентрация антропогенного CO_2 и других парниковых газов (ПГ) влияет на общий климат на планете и является значимым фактором, определяющим его изменение.

Для противодействия накоплению углекислого газа в атмосфере в последние десятилетия активно тестируются и внедряются технологии его улавливания и связывания — CCS (Carbon Capture and Storage). Как правило, они основываются на экосистемах, способных накапливать углерод в биомассе, — лесах и плантациях специально высаженных растений и сельхозугодий, где применяются особые агротехнологии, позволяющие не только выращивать продукцию, но и «запечатывать» атмосферный углерод в почву или древесную массу на долгосрочное хранение [4].

Другой вариант улавливания и связывания углекислого газа — закачка его в естественные подземные резервуары, где, как планируется, он будет постепенно поглощаться ультраосновными породами. На сегодняшний день наиболее успешным из таких проектов считается исландский проект Climeworks, в рамках которого запущены две установки: в 2021 г. — Orca¹ мощностью 4 тыс. т/год, и в 2024 г. — Mammoth² мощностью 36 тыс. т/год. В целом такие проекты характеризуются огромными энергетическими затратами, необходимыми как на сепарацию CO_2 из воздуха, так и на закачку газа в подземные пласты. Своей относительной успешностью проект обязан дешевой геотермальной электроэнергии, вырабатываемой ГеоТЭС Hellisheiði (в русской транскрипции — Хеллишейди или, чаще, Хедлисейди).

Ценность CCS-технологий признана во всем мире, но наиболее быстрый прогресс реализации проектов по улавливанию и хранению CO_2 наблюдается в Северной Америке и в Европе. Политика стран в этих регионах, а также инвестиции

¹<https://climeworks.com/plant-orca> (accessed: 24 Oct 2024).

²<https://climeworks.com/plant-mammoth> (accessed: 24 Oct 2024).

в технологии и проекты CCUS (Carbon Capture, Utilization, and Storage) стимулируют действия стран по всему миру.

Правительства США (лидер по числу реализуемых CCUS-проектов) и некоторых государств Европы первыми предоставили материальную поддержку для ускорения частных инвестиций в CCS. За ними последовали правительство Японии и государственные предприятия Ближнего Востока и Китая. Теперь страны Юго-Восточной Азии, стремясь достигнуть национальные цели по углеродной нейтральности, начинают реализовывать проекты по улавливанию и захоронению CO₂ в основном через свои национальные нефтяные компании [5]. По прогнозу McKinsey, мировой объем инвестиций в технологии CCUS к 2035 г. может достигнуть US\$175 млрд в год, что сопоставимо с текущими глобальными капиталовложениями в добычу угля (US\$148 млрд в 2023 г., согласно оценке Международного энергетического агентства).³

По данным на 2025 г., в мире на разных стадиях реализации находится более 800 проектов по внедрению технологий CCS. 58 действующих крупномасштабных проектов CCS имеют общую мощность улавливания порядка 53,4 млн т CO₂ в год и общую мощность хранения углерода порядка 54,8 млн т CO₂ в год.

В настоящее время переработка природного газа и сжижение природного газа (СПГ) являются основными направлениями применения CCUS. Технологии по улавливанию и хранению углерода все чаще используются для сокращения выбросов ПГ при добыче нефти и газа, а также при переработке нефти. Прибыльный аспект рынка улавливания углекислого газа привлекает внимание как малых, так и крупных компаний. Среди последних есть газовые и нефтяные гиганты (такие как Shell), которые видят возможности для роста и компенсации выбросов CO₂. Другие компании, такие как Exxon, инвестируют в технологии CCUS, ставя перед собой амбициозные цели, включающие, к примеру, возможность ежегодно улавливать до 100 млн т CO₂ к 2040 г.⁴

По состоянию на 2025 г.⁵ крупнейшими в мире действовавшими установками по улавливанию и захоронению углерода по данным Statista⁶ являлись: Petrobras Santos Basin Pre-Salt Oil Field CCS (Бразилия) — мощность 10,6 млн т CO₂/

год; ExxonMobil Chute Creek Gas Processing Plant (США) — 7 млн т CO₂/год; Longfellow WTO Century Plant (США) — 5 млн т CO₂/год; Chevron Gorgon Carbon Dioxide Injection (Australia) — 4 млн т CO₂/год; Great Plains Synfuels Plant and Weyburn-Midale (U.S.) — 3 млн т CO₂/год; Qatargas Qatar LNG (Qatar) — 2,2 млн т CO₂/год.

Интерес к кимберлиту как возможному инструменту реализации CCS проектов впервые возник по инициативе одного из лидеров алмазного рынка — компании De Beers, заявившей о проекте CarbonVault [6]. В 2016–2018 гг. De Beers совместно с ведущими научными центрами Австралии, Канады и США провели исследования поглотительной способности кимберлитовых пород южноафриканских (Венишиа, Вурспед) и канадских (Гахчо Куэ, Виктор и Снэп Лейк) месторождений [7] в отношении углекислого газа. Результаты исследований показали, что поскольку кимберлиты демонстрируют значительное минералогическое разнообразие, интерес с точки зрения реакционной способности по отношению к диоксиду углерода представляют такие минералы кимберлитовых пород, как оливин, серпентин, брусит и смектит. Содержание силикатов в минералах при этом обратно пропорционально их поглотительной способности. В зависимости от химического состава кимберлита поглощение углекислого газа может варьироваться от 4,7 до 24 масс.%, а среднее значение составляет 13,8 масс.%. Такого количества поглощенного углекислого газа более чем достаточно, чтобы несколько раз компенсировать выбросы CO₂, возникшие при добыче и обогащении кимберлитовой руды.

Процесс вступления CO₂ в химическую реакцию (минерализацию) может быть ускорен путем использования катализаторов или предварительной обработки пород (например, с помощью измельчения породы для увеличения площади поверхности). Образовавшиеся карбонатные минералы остаются стабильными в течение 1000 лет, что делает этот метод безопасным для долгосрочного хранения CO₂ [8]. Проекты такого типа называют также усилением выветривания (Enhanced weathering) минералов.

Преимущества использования данной технологии:

— стабильность и долговечность: CO₂ переходит в устойчивую форму, что исключает риск об-

³<https://globalenergyprize.org/ru/2024/01/24/moshhnost-realizuemyh-proektov-v-sfere-ccus-uvlechilas-na-40/> (дата обращения: 24.10.2024).

⁴<https://globalenergyprize.org/ru/2022/03/20/spros-na-uslugi-po-uvlivaniju-i-hraneniju-co2-k-2025-godu-vyrastet-v-chetyre-raza/> (дата обращения: 24.10.2024).

⁵Созданная МЭА всемирная база проектов CCUS, опубликованная в марте 2024 г. и обновленная в декабре 2024 г., охватывает все проекты по улавливанию углерода, начало эксплуатации которых было запланировано на 2024 г., содержит данные о полной цепочке, CCU, транспортировании и хранении углерода с заявленной производительностью более 100 тыс. т/год или 1000 т/год для установок DAC (Direct Air Capture) — прямого улавливания углерода из воздуха. Источник: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/ccus-projects-database> (дата обращения: 24.10.2024).

⁶<https://www.statista.com/statistics/1108355/largest-carbon-capture-and-storage-projects-worldwide-capacity/> (дата обращения: 24.10.2024).

ратного выделения в атмосферу, и остается стабильным в геологических масштабах времени;

- пролонгированный эффект: после складирования на хвостохранилище отработанная руда способна поглощать CO_2 в течение нескольких последующих лет;

- потенциально низкая стоимость: использование уже существующих отходов снижает затраты на хранение CO_2 .

При поддержке De Beers, FPX Nickel Corp. и других компаний на базе Департамента наук о Земле, океане и атмосфере Университета Британской Колумбии была сформирована исследовательская группа CarbMinLab⁷, состоящая из междисциплинарных ученых — геологов и инженеров, совместно работающих над решением задач крупномасштабного связывания CO_2 промышленными отходами. Созданная группой база публикаций, наряду с работами советских и российских геологов, легла в основу планирования исследований поглощающей способности кимберлитов коренных месторождений Якутии и Архангельской области, разрабатываемых АК «АЛРОСА» (ПАО) и АО «Севералмаз», входящих в группу компаний «АЛРОСА».

Исследования поглощающей способности кимберлитов российских месторождений начались с проверки данных, полученных британскими и канадскими исследователями [9]. Для определения уровня карбонизации кимберлитовой руды, прошедшей технологический цикл обогащения, в рамках работы [10], проведенной Центром инноваций и технологий совместно с геологическими службами АК «АЛРОСА» (ПАО), из хвостохранилища Удачинского ГОКа были отобраны образцы породы, соответствующей различному возрасту пребывания в хвостохранилище, и сравнены по составу минеральных фаз с образцами исходной руды из кернов трубки «Удачная». Результаты показали, что прирост карбонатов в течение 10 лет пребывания руды в хвостохранилище может достигать 15 масс.%, а поглощение углекислого газа за 10 лет достигает 8,2 масс.%, или 82 кг CO_2 на 1 т добытой и переработанной руды. При этом характер преобразования минералов свидетельствует о том, что накопление карбонатов могло происходить в результате взаимодействия с углекислым газом из воздуха в присутствии воды.

Дальнейшие комплексные исследования, проведенные научной командой геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова, включающие теоретическое изучение механизмов и термодинамики реакций, сопровождающихся по-

глощением углекислого газа из атмосферы, стендовые исследования, в которых уровень поглощения для каждого коренного месторождения был воспроизведен в стационарных условиях и измерен количественно, а также полевые исследования хвостохранилищ с наблюдением и замерами накопления карбонатов в руде в течении 20 лет, в сопоставлении результатов между собой позволили количественно оценить поглощение, а также выработать методологию такого количественного определения. Кроме того, результаты исследования природы реакций, приводящих к поглощению CO_2 из воздуха в реальных условиях с учетом специфики кимберлитовых трубок и в условиях производственных площадок позволяют выработать способы интенсификации поглощения углекислого газа с целью превышения уровня поглощения над базовым, происходящим самопроизвольно при осуществлении производственной деятельности, к которой относятся добыча и переработка руды.

2. Эмиссия ПГ группы компаний «АЛРОСА» в 2021–2023 гг.

2.1. Структура группы «АЛРОСА»

Группа «АЛРОСА» — лидер алмазодобывающей отрасли, крупнейшая в мире по объемам добычи и запасов алмазов вертикально интегрированная компания. АЛРОСА занимается разведкой месторождений, добычей, обработкой и огранкой алмазов, продажей алмазного сырья как производственно-технического, так и потребительского назначения. Компания обеспечивает около 90 % добычи алмазов в России в натуральном выражении. Основная часть добычи приходится на алмазы ювелирного качества, из которых впоследствии гранятся бриллианты для ювелирных изделий.

По состоянию на декабрь 2024 г. в структуре группы «АЛРОСА» действуют восемь специализированных комплексов, в состав которых входят следующие предприятия и организации:

алмазно-бриллиантовый комплекс (АБК): АК «АЛРОСА» (ПАО), АО «Севералмаз», АО «Алмазы Анабара», АО «ПО «Кристалл», ООО «ЮГ «АЛРОСА»;

энергетический комплекс (ЭК): ООО «ПТВС», АО «АЛРОСА-Газ», АО «Вилуйская ГЭС-3», АО «ГИДРОШИКАПА С.А.Р.Л.», ООО «Айхал-трансгаз», ООО «ЯГК», ООО «ЯЭСК»;

геологоразведочный комплекс (ГРК): ООО «АЛРОСА-Спецбурение», СП ALROSA (Zimbabwe) Ltd;

охранный комплекс (ОК): ООО «Ведомственная охрана АЛРОСА», ООО «АЛРОСА-охрана», ООО «АЛМАЗ-охрана Центр», ООО «ЧОО «Алмаз»;

⁷<https://rutube.ru/video/218d19f3e465df5b524389522c84724d/> (дата обращения: 24.10.2024).

бытовой комплекс (СБК): ALROSA Hong Kong Ltd, ALROSA East DMCC, ALROSA Belgium NV, ALROSA Israel Ltd, ALROSA Shanghai Co. Ltd;

научно-технический комплекс (НТК): АО «Инновационный Центр «Буревестник», ООО «АЛ-МАЗ Сервис», ООО «АЛРОСА ИТ»;

комплекс социальных и иных организаций (СК): ООО «АЛРОСА Бизнес-сервис», АО «АЛРОСА-торг», ООО «Зарница».

Производственные активы группы формируют АБК, который является основным структурообразующим ядром группы. Головная компания – АК «АЛРОСА» (ПАО) – публичное акционерное общество с государственным участием, с производственными активами в Республике Саха (Якутия): Удачинский ГОК, Айхальский ГОК, Мирнинско-Нюрбинский ГОК, Институт «Якутнипроалмаз», Центр сортировки алмазов (ЦСА), Единая сбытовая организация (ЕСО), Аппарат управления с главным офисом в г. Мирный.

АО «Севералмаз» и АО «Алмазы Анабара» – дочерние общества АК «АЛРОСА» (ПАО), ведущие добычу на крупнейшем в Европе коренном алмазном месторождении им. М. В. Ломоносова в Архангельской области и на алмазоносных россыпях рек Эбеях, Молодо, Далдын и других в Якутии.

АО «Производственное объединение «Кристалл» – крупнейший в России производитель

бриллиантов и одно из крупнейших в мире предприятий по огранке природных алмазов с производством в г. Смоленске.

2.1. Структура эмиссии

Компания с 2018 г. проводит количественную оценку прямых выбросов (Score 1), а с 2022 г. – и косвенных выбросов (Score 2, 3) парниковых газов (ПГ). Результаты оценки выбросов ПГ за 2021, 2022 и 2023 годы (рис. 1) задокументированы в составе отчетов об устойчивом развитии группы «АЛРОСА», утвержденных решением Наблюдательного совета АК «АЛРОСА» (ПАО), и опубликованы на корпоративном сайте компании.

Общая структура прямых (Score 1) и косвенных энергетических (Score 2) выбросов за 2023 г. представлена на рис. 2. Характер деятельности (горнодобывающая) и географическое расположение (удаление от энергетической инфраструктуры и основных промышленных центров) производственных площадок основных активов, составляющих АБК, определяют структуру их выбросов [11] (рис. 3).

Основные энергетические затраты горнодобывающего предприятия, как правило, связаны с добычей и транспортированием руды и последующей ее подготовкой к дальнейшему обогащению. В технологических процессах обогатительных фабрик группы «АЛРОСА» применяются мельницы мокрого самоизмельчения. Превалирующая часть косвенных энергетических выбросов парниковых газов АК «АЛРОСА» (ПАО) приходится на поставляемую извне электроэнергию для обеспечения работы мельниц и обогатительного оборудования.

Энергетическая инфраструктура городов Мирный и Удачный, поселков Айхал и Нюрба позволяет обеспечивать энергией соответствующие производ-

ственные площадки компании сетевыми источниками. При этом вскрытие месторождений и добыча руды сопровождаются выбросами ПГ от мобильных источников, к которым относятся экскаваторы, самосвалы, бульдозеры и другая горная техника. На долю мобильных источников приходится до 75 % прямых выбросов ПГ компании (см. рис. 3).

АО «Алмазы Анабара» характеризуется схожей структурой косвенных энергетических выбросов ПГ с тем допущением, что сырьем является не кимберлитовая руда,

2021	2022	2023
Прямые выбросы (Score 1)		
9%	11%	12%
18%	17%	18%
73%	72%	70%
Косвенные выбросы (Score 2)		
44%	38%	35%
56%	62%	65%

Источники выбросов АБК группы «АЛРОСА»	2021	2022	2023
Прямые выбросы (Score 1), т экв. CO ₂			
АК «АЛРОСА» (ПАО)	532238	595985	582217
ОА «Севералмаз»	128333	136746	146923
ОА «Алмазы Анабара»	61808	91342	101521
Итого за год	724375	825768	832093
Косвенные выбросы (Score 2), т экв. CO ₂			
Импортируемая электроэнергия	95062	90764	90355
Импортируемая теплоэнергия	74692	55629	48653
Итого за год	169754	146393	139008
Score1+Score2	894130	972161	971101

Рис. 1. Структура выбросов парниковых газов алмазно-бриллиантового комплекса группы АЛРОСА в 2021–2023 гг.

Fig. 1. Breakdown of GHGs emissions from the ALROSA Group Diamonds Factory in 2021–2023.

а пески рассыпных месторождений, требующие относительно меньших энергетических затрат для подготовки и обогащения. Кроме того, если на обогатительных фабриках есть необходимость импортирования теплоэнергии для отопления больших производственных площадей, то работа драг, носящая сезонный характер, этого не требует.

Иная ситуация наблюдается для АО «Севералмаз», где косвенные энергетические выбросы имеют следовой характер, не сопоставимый с прямыми выбросами предприятия. Такой эффект объясняется тем, что добыча ведется на энергетически обособленном от энергосетей Ломоносовском месторождении. Электроэнергия, необходимая для работы Ломоносовского ГОКа, производится на собственной дизельной электростанции мощностью 24 МВт (с 2022 г. работает на мазуте), что, в свою очередь, приводит к существенной доле выбросов ПГ от стационарных источников (см. рис. 3).

Соотношение выбросов этих трех активов коррелируется с соотношением производственных показателей.

Следует отметить, что большая часть электроэнергии, импортируемой АК «АЛРОСА» (ПАО), производится Вилуйской ГЭС-3, построенной для обеспечения электроэнергией объектов алмазного комплекса АК «АЛРОСА» (ПАО) и находящейся в собственности компании. Так как в соответствии с российским законодательством ГЭС относятся к возобновляемым источникам энергии, выбросы ПГ от потребления соответствующего объема электроэнергии в расчете не учитываются, коэффициент выбросов от производства электроэнергии группы «АЛРОСА» принимается равным нулю.

3. Исследования поглощающей способности углекислого газа за счет карбонизации отработанного кимберлита

Исследования поглощения углекислого газа кимберлитом и хвостами обогащения состояли из

трех блоков, включавших теоретические, экспериментальные и полевые исследования. В настоящей статье резюмируются результаты экспериментальных исследований поглощения, сопоставленные с результатами накопления карбонатов в хвостохранилищах.

3.1. Методика проведения экспериментов

Методика проведения экспериментов заключалась в поглощении чистого углекислого газа с измерением изменения объема газа, захваченного породой. Навеска дробленой породы или материала хвостов с определенным количеством дистиллированной воды или растворов различного состава помещалась в тонкостенный реактор из полиэтилентерефталата (ПЭТ) объемом 300–500 см³. Затем реактор продувался потоком углекислого газа из баллона и закрывался. При поглощении газа происходило уменьшение объема,

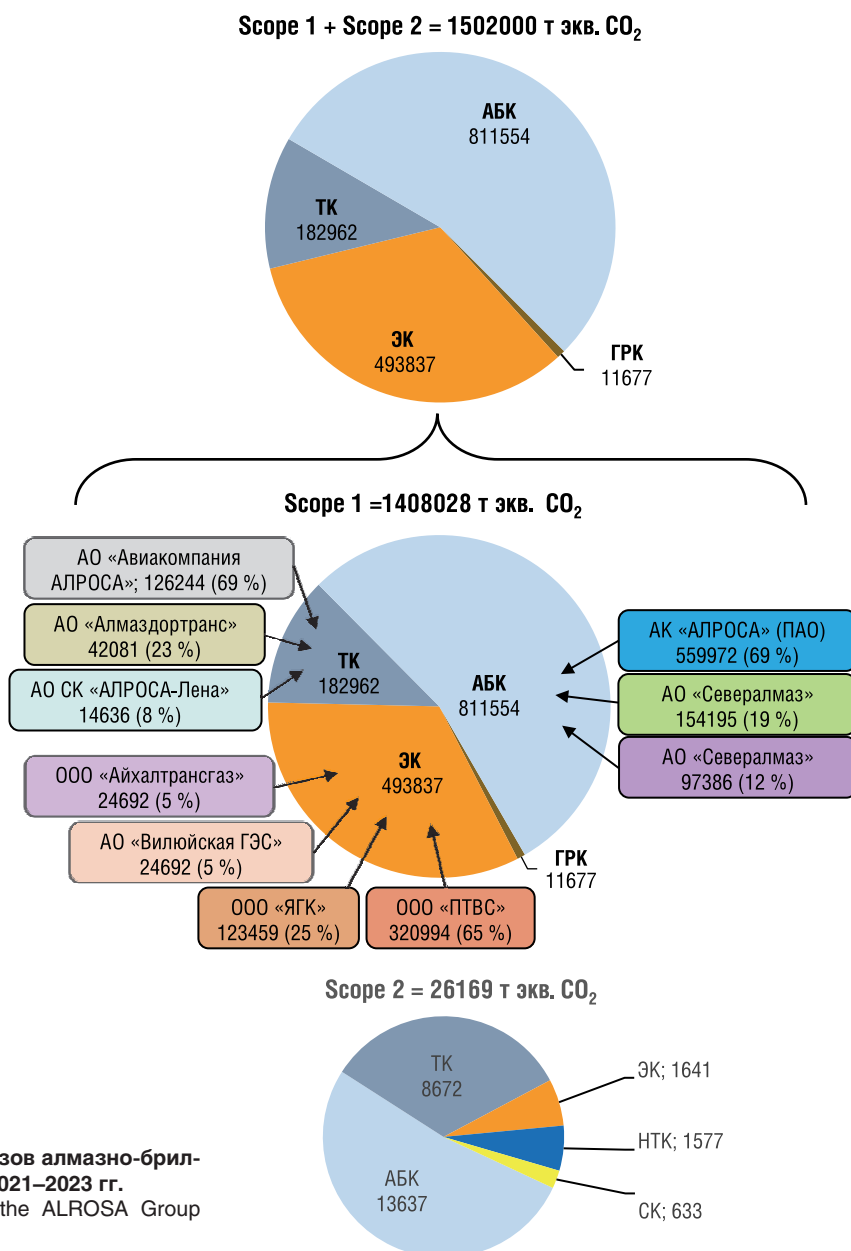


Рис. 2. Структура выбросов парниковых газов алмазно-бриллиантового комплекса группы АЛРОСА в 2021–2023 гг.

Fig. 2. Breakdown of GHGs emissions from the ALROSA Group diamond complex in 2021–2023.

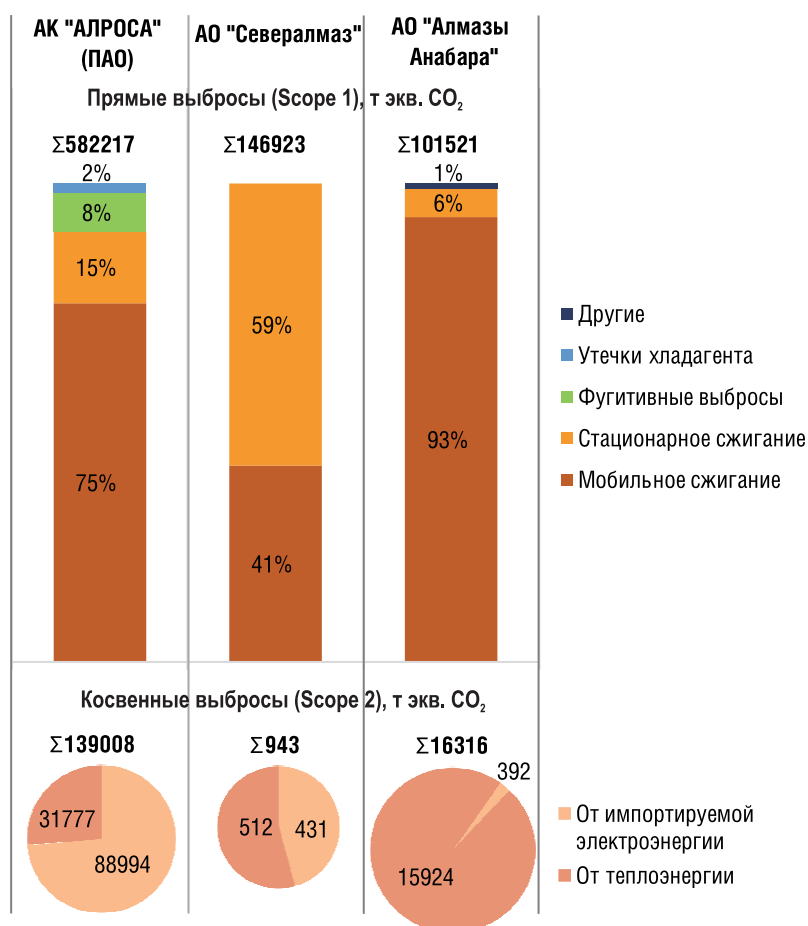


Рис. 3. Структура выбросов парниковых газов АК «АЛРОСА» (ПАО), АО «Севералмаз» и АО «Алмазы Анабара» в 2023 г.

Fig. 3. Breakdown of GHGs emissions from the ALROSA PJSC, Severalmaz JSC and Almazly Anabara JSC in 2023.

Таблица 1. Кинетические параметры реакции карбонизации кимберлита

Table 1. Kinetic parameters of the kimberlite carbonation reaction

Трубка	Лag-фаза, сут	Кинетический коэффициент, %CO ₂ /год ^{0.5}
Айхальский ГОК		
Айхал	5.11	0.31
Юбилейная	1.35	0.28
Мирнинский ГОК		
Интернациональная	2.59	0.30
Мир	0.25	0.34
Мир К-20	0.02	0.64
Удачный ГОК		
Удачная	4.29	0.31
Заполярная	6.80	0.29
Зарница	0.35	0.27
Архангельский ГОК		
Архангельская	2.06	0.27
им. Карпинского	2.58	0.28
Нюрбинский ГОК		
Нюрбинская	5.70	0.29
Ботубинская	6.66	0.27

реактор сжимался, изменение объема регистрировалось. Аморфный ПЭТ является малопроницаемым материалом для углекислого газа, поэтому часто используется для бутилирования газированных напитков. Для контроля потерь проводился в аналогичных условиях холостой эксперимент, но без добавления образца. Этот подход моделирует максимальное поглощение за счет большого количества углекислого газа. Полное поглощение всего газа соответствует добавлению 5 масс. % CO₂ к исходной породе, однако эти условия не моделируют условия хвостохранилища.

Эксперименты с поглощением углекислого газа образцами кимберлита (из якутских трубок «Заполярная», «Ботубинская», «Нюрбинская», «Удачная», «Интернациональная», «Мир», «Юбилейная», «Зарница», «Айхал» и архангельских трубок им. Карпинского и «Архангельская») в системе с переменным объемом показали, что все образцы поглощают углекислый газ (рис. 4). Один образец кимберлита (К-20) из трубки «Мир» заметно быстрее поглощает углекислый газ: за 70 сут — 5 % от начальной массы. Это объясняется минеральным составом кимбер-

лита. Как показали результаты рентгенофазового анализа, порода содержит 17 % гидроталькита [Mg₆Al₂(CO₃)(OH)₁₆·4H₂O], что является исключением из всех образцов. Гидроталькит близок по составу к бруситу и может непосредственно связывать углекислый газ из воздуха. Все прочие образцы имеют близкие скорости поглощения углекислого газа. Наблюдается пауза между началом опыта и активным поглощением углекислого газа. Такую паузу можно назвать лаг-фазой по аналогии с терминами культивации микроорганизмов. Лаг-фаза меняется от нескольких часов до 14 сут.

Функция поглощения в зависимости от времени является нелинейной, происходит снижение скорости с течением времени. Для получения линейных зависимостей нами предложена зависимость от корня из времени t (рис. 5). С точки зрения химической кинетики гетерогенных реакций такой подход 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. По углу на-

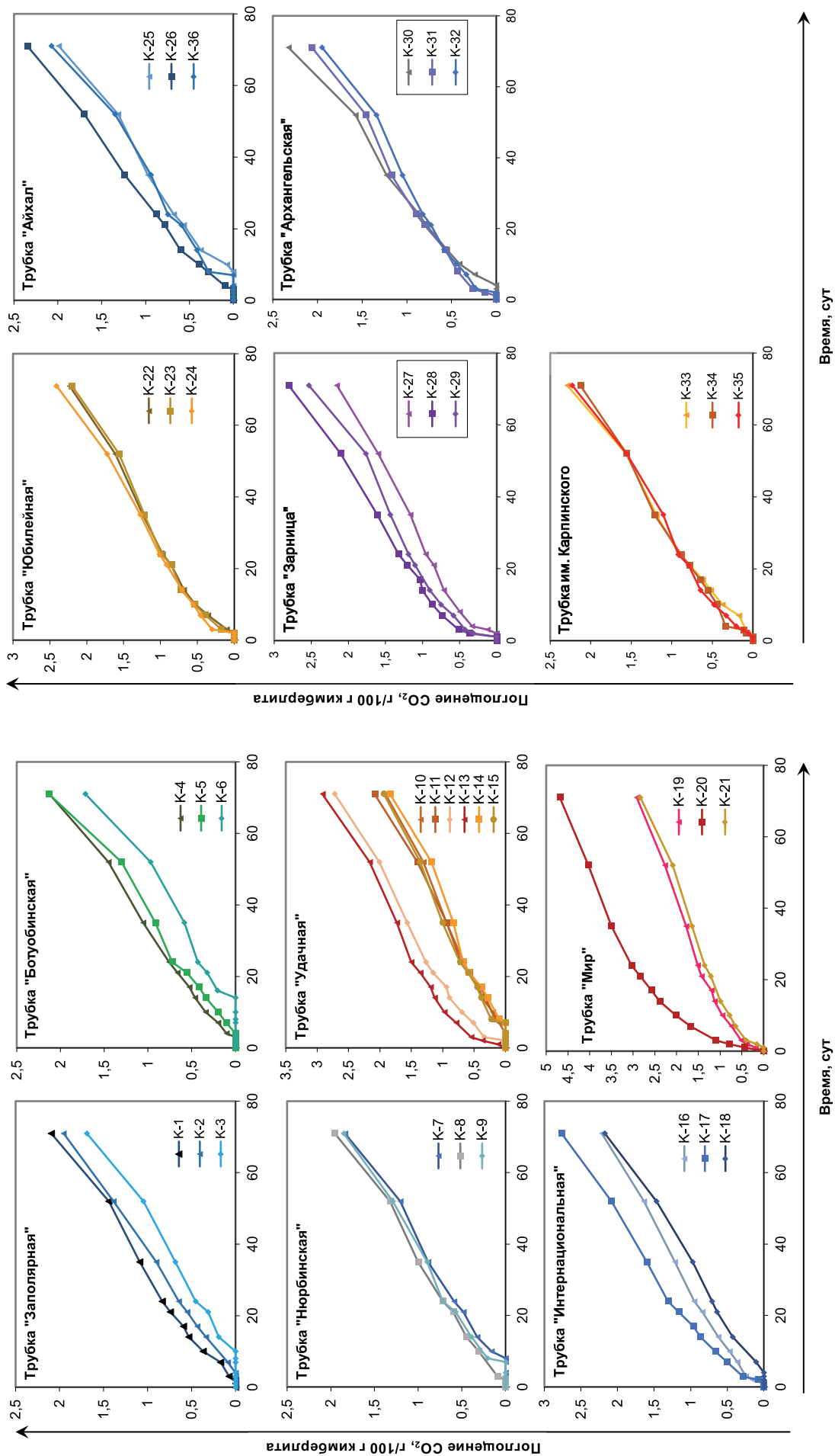


Рис. 4. Результаты экспериментов с поглощением углекислого газа образцами кимберлита в системе с переменным объемом
 Fig. 4. Test results with carbon dioxide absorption by kimberlite samples in a variable volume system.

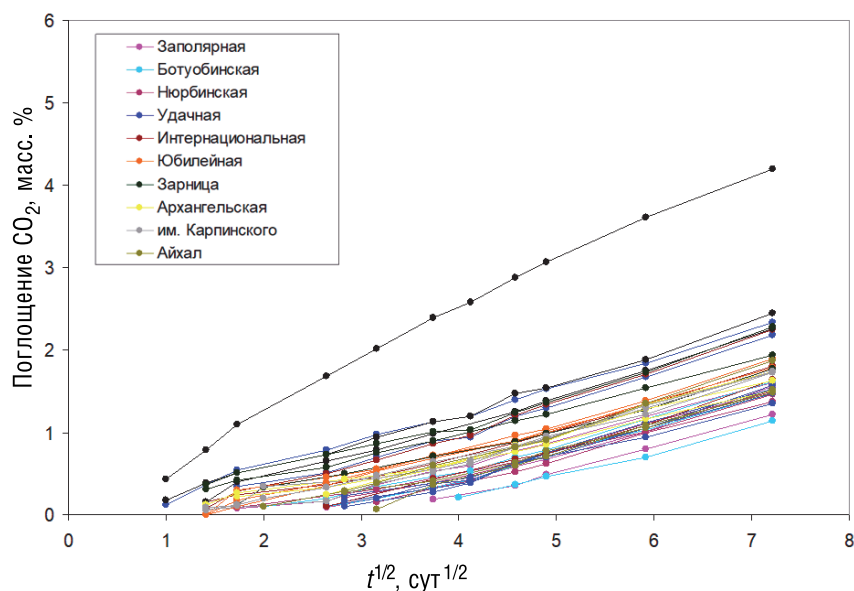


Рис. 5. Зависимость поглощения углекислого газа образцами кимберлита в системе с переменным объемом от корня из величины времени t
Fig. 5. Dependence of carbon dioxide absorption by kimberlite samples in a system with a variable volume on the root of time t .

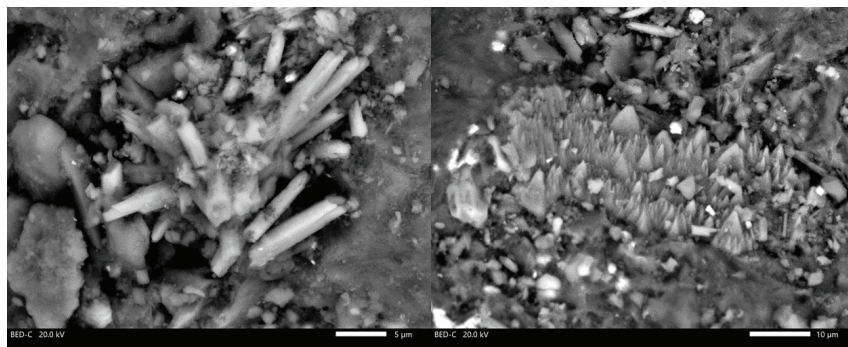


Рис. 6. Кальцит, образующийся при связывании углекислоты (трубка «Удачная», образец К-13, 50 сут). Изображения с электронного микроскопа
Fig. 6. Calcite formed by carbon dioxide sequestration (Udachnaya kimberlite pipe, sample K-13, 50 days). Electromicrographs.



Рис. 7. Намыв хвостов на пляже Ломоносовского ГОКа
Fig. 7. Inwash tails on the beach of Lomonosovsky ore mining and concentrating plant.

клона может быть рассчитан кинетический коэффициент. Все образцы, не содержащие гидроталькита, имеют одинаковые углы наклона в координатах « $t^{1/2}$ — поглощение» и, следовательно, близкие кинетические коэффициенты, которые могут быть использованы для расчета модели поглощения. Кинетические параметры реакции карбонизации кимберлита из трубок, разрабатываемых производственными предприятиями компании «АПРОСА», приведены в табл. 1.

Проведение экспериментов с периодической заморозкой показало, что при отрицательной температуре поглощение углекислого газа не происходит. В промежутке между фазами заморозки поглощение при комнатной температуре протекает со скоростью, близкой к данным в экспериментах при постоянной температуре. Таким образом, при расчете поглощения для условий объектов следует учитывать только теплое время года, когда хвосты находятся в талом состоянии.

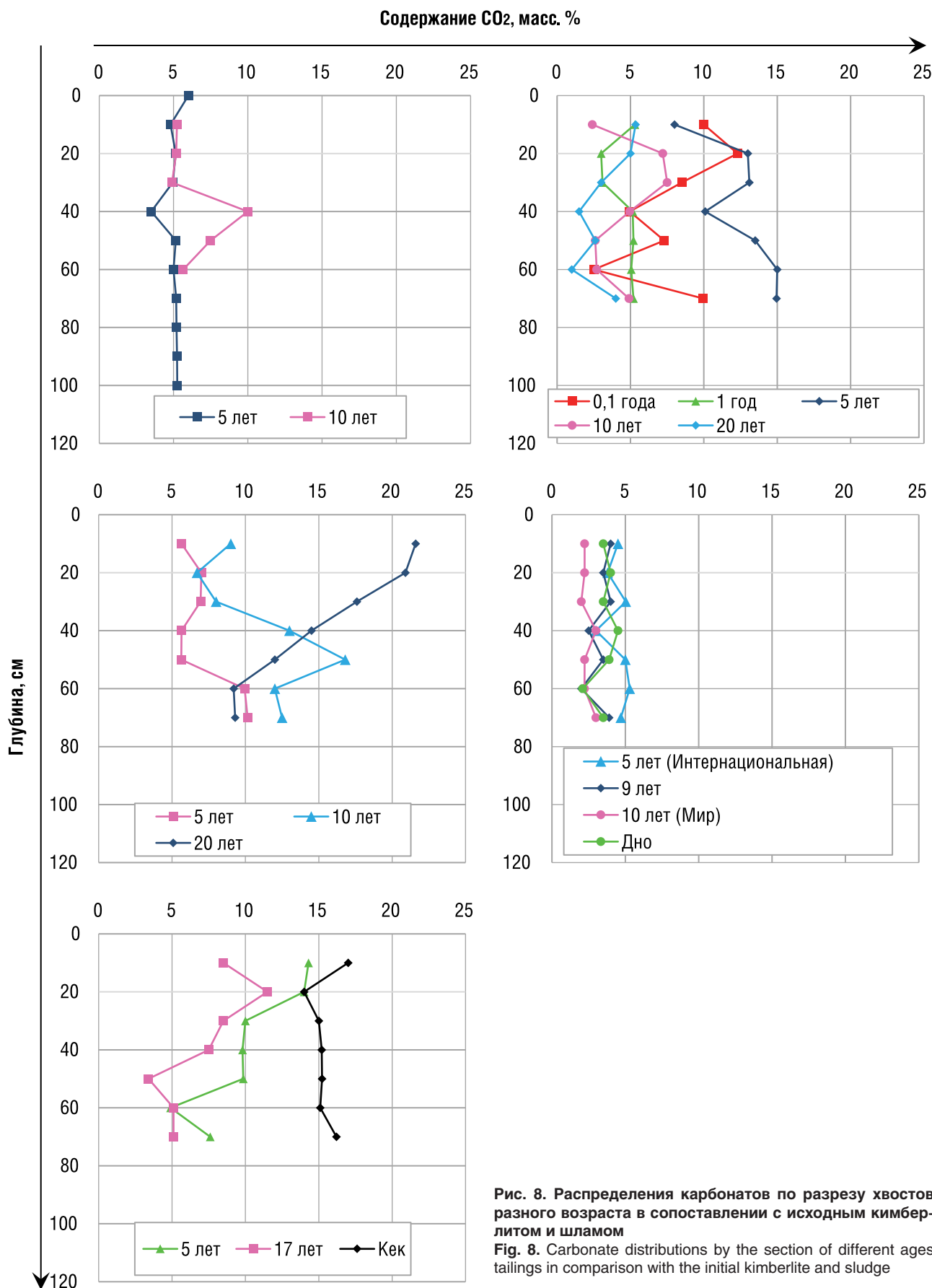
3.2. Полевые исследования

Следующим методом исследования поглощающей способности кимберлита было прямое опробование хвостов разного возраста с последующим определением содержания карбонатов (рис. 6) в форме углекислого газа. Исследовано также содержание карбонатов в шламе, поступающем с обогатительной фабрики (рис. 7), и в образцах кимберлита разрабатываемых трубок.

Определение содержания карбонатов в образцах пород и хвостов проводилось с использованием карбонаторметра КМ-04 (ООО «НПП «Геосфера»), включающего в себя блок управления и цифровой индикации, поршневой дозатор, сообщенный с реакционной камерой из прозрачного полистирола, магнитную мешалку, вытяжной вентилятор. Датчики давления и температуры в реакционной ка-

мере подключены к плате измерения. Принцип работы прибора заключается в измерении давления и температуры диоксида углерода в реакционной камере, выделяемого в процессе взаимо-

действия карбонатных веществ измельченного образца с 6%-ным водным раствором соляной кислоты, и в последующем расчете концентраций кальцита и доломита, основанном на различии



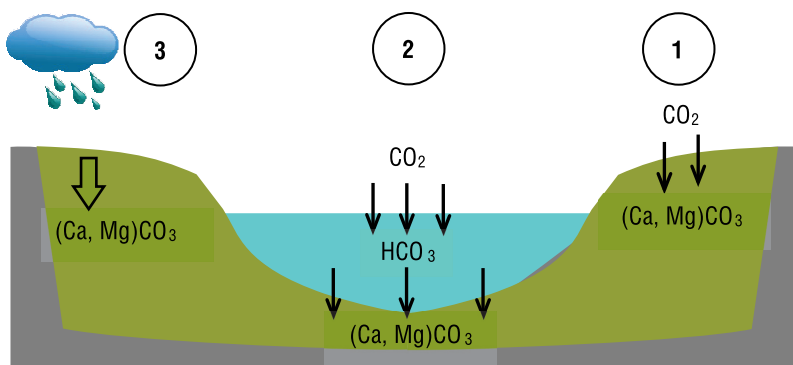


Рис. 9. Схема потоков углекислого газа в хвостохранилище:
1 – поглощение пляжной зоной; 2 – поглощение через слой воды; 3 – вымывание карбонатов атмосферными осадками в более глубокие слои

Fig. 9. Flow diagram of carbon dioxide fluxes to the tailing: (1) absorption by the beach area; (2) absorption through the water layer; (3) rain-wash of carbonates into deeper layers.

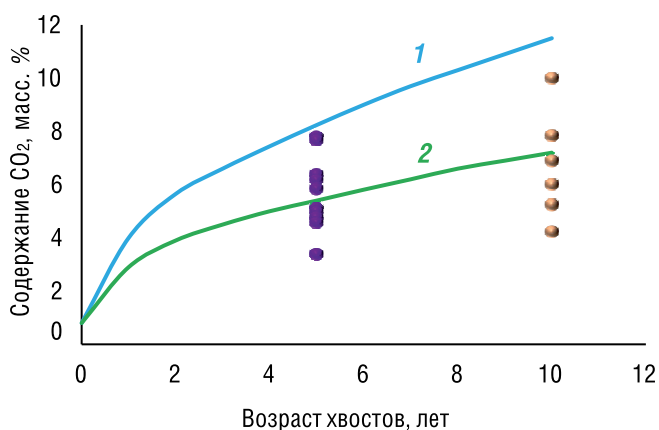


Рис. 10. Расчет модели поглощения углекислого газа хвостами Архангельского ГОКа по экспериментальным данным (кривая 1) и по результатам натурных измерений (кривая 2); точки – содержание CO₂ в хвостах разного возраста
Fig. 10. A model of carbon dioxide absorption by tailings of the Arkhangelsk MPC, calculated from experimental data (curve 1) and from natural measurements (curve 2); points are the CO₂ content in different-age tailings.

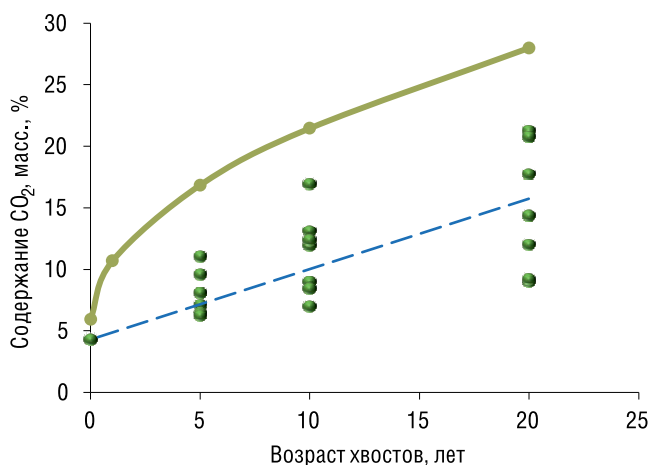


Рис. 11. Расчет модели поглощения углекислого газа разновозрастными хвостами Айхальского ГОКа по результатам натурных измерений (сплошная кривая). Пунктир – линия тренда; точки – содержание CO₂ в хвостах разного возраста
Fig. 11. Calculation of the model of carbon dioxide absorption by tailings of different ages of the Aikhal GOK based on the field tests results (solid curve). The dotted line is the trend line; the dots are the CO₂ content in tails of different ages.

кинетики их реакции с кислотой. Для удобства работы и повышения достоверности результатов измерений предусмотрена синхронизация автоматического запуска программы регистрации и обработки данных с моментом впрыска дозированного объема кислоты в реакционную камеру и включения магнитной мешалки. Масса исследуемого образца составляет 1000 мг, нижний предел определения кальцита и доломита в образце – 1 %, диапазон измерения и индикации давления в реакционной камере – 0,2 кг/см², предел допустимой погрешности измерения давления – 0,2 %. Калибровка карбонатаметра осуществлялась с использованием навесок реактива CaCO₃ (ос. ч., Реахим) и стандартного образца состава доломита (СО-6) ГСО 7222–96.

Диаграммы распределения карбонатов по разрезу хвостов разного возраста в сопоставлении с исходным кимберлитом и шламом приведены на рис. 8. Результаты показали, что материал хвостов Ломоносовского, Удачинского и Айхальского ГОКов активно связывает углекислоту. Это фиксируется по накоплению карбонатного углерода в хвостах со временем и по пониженной концентрации углекислого газа в подземном воздухе в сравнении с атмосферным. Однако для Мирнинского и Нюрбинского ГОКов накопление карбонатного углерода в хвостах не выявлено. Снижение содержания углекислого газа в подземном воздухе было заметно только в свежем кеке Нюрбинского ГОКа.

Предложена гипотеза о влиянии состава воды пруда-отстойника на характер поглощения углекислого газа. Наибольшее отличие вод хвостохранилищ, где наблюдается поглощение, – это относительно низкая минерализация, составляющая для Ломоносовского ГОКа 0,51–0,71 г/л, для Айхальского – 2,5 г/л, для Удачинского – 3,6–4,14 г/л. Для Мирнинского ГОКа минерализация на порядок выше и составляет 28 г/л.

Результаты экспериментальных исследований и исследования распределения карбонатов в хвостохранилищах позволили разработать модель поглощения углекислого газа. Как показывают экспериментальные исследования, поглощение начинается после выпуска шлама в хвостохранилище и происходит как в пляжной зоне, так и под слоем воды. Важную роль для поглощения играет влажность хвостов. Показано, что воздушно-сухие кимберлиты и хвосты не вступают в реакцию

с углекислым газом атмосферы. При увеличении влажности скорость связывания CO_2 существенно возрастает. Повторное пересыхание в ряде случаев может приводить к потере способности хвостов поглощать углекислоту, что может быть связано с ингибированием поверхности минеральных зерен пленками кремнекислоты.

Как показали полевые наблюдения, поглощение в пляжной зоне связано с влажными хвостами, а на дне озера оно происходит за счет связывания гидрокарбонат-иона из раствора (рис. 9). Эти потоки существенно не различаются, но поглощение донными отложениями может длиться дольше, как например на старом осушенном хвостохранилище Айхальского ГОКа. Причины тому следующие: отложения пляжей способны пересыхать и терять реакционную способность; они подвержены воздействию атмосферных осадков. Дождевая вода не насыщена по отношению к карбонатам и способна растворять их. Растворимость карбоната кальция в дождевой воде, равновесной с воздухом, содержащим 330 ppm CO_2 , составляет 67,79 мг/л (в форме CaCO_3). Если принять среднегодовое количество осадков 300 мм, то они выносят карбонат кальция в количестве 20,34 г/м²/год, что эквивалентно 8,95 г CO_2 /м²/год. Таким образом, накопление карбоната кальция в верхней части пляжной зоны при снижении потока связывания углекислоты за счет реакции с кимберлитом может прекратиться. При потоке менее 8,95 г CO_2 /м²/год содержание в верхнем слое хвостов начинает снижаться, что отмечалось на многих хвостохранилищах. В частности, для Удачинского ГОКа накопление CO_2 происходит первые 5 лет, затем оно снижается.

Для Мирнинского и Нюрбинского ГОКов, в хвостохранилищах которых накопление углекислого газа не наблюдается, содержание со временем постоянно уменьшается. Это можно объяснить переносом кальцита в нижние слои хвостов.

Растворимость кальцита зависит от концентрации углекислого газа в воздухе согласно реакции $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$.

Растворенные дождевой водой карбонаты будут переотложены в горизонтах, в которых сохраняется способность связывания углекислого газа, и pH повышается. Следовательно, можно утверждать, что отложенный карбонат остается в хвостохранилище необратимо. Для Айхальского ГОКа горизонт вторичного отложения карбонатов обнаружен на глубине 40–50 см в хвостах 10-летнего возраста, поэтому для этого ГОКа вынос карбонатов глубже не происходит.

Для расчета поглощения на конкретных объектах удобно использовать кинетический коэффициент поглощения (ККП), рассчитанный с учетом продолжительности теплого периода года. Значение ККП может быть рассчитано из экспериментальных данных (см. табл. 1) или по накоплению CO_2 в хвостах со временем как зависимость от квадратного корня времени. Наблюдаемое значение ККП для Айхальского ГОКа составило 2,08 % CO_2 /год^{0.5}. Экспериментальные данные показали более высокое значение ККП — 3,36 % CO_2 /год^{0.5} при 150 днях в году с положительными температурами. По этим данным была рассчитана модель поглощения углекислого газа хвостами Айхальского ГОКа (рис. 10).

Результаты показывают, что кинетические параметры, полученные разными методами, в целом хорошо совпадают. При этом экспериментальные данные дают более высокие значения. Несовпадение может объясняться климатическими особенностями, не учтенными в эксперименте. Для дальнейших оценок может быть рекомендовано значение ККП, полученное по реальному накоплению CO_2 в хвостах.

Для Айхальского ГОКа в интервале возрастов 0–20 лет по содержанию карбонатов получен ККП, равный 2,22 % CO_2 /год^{0.5}. Этот коэффициент достаточно хорошо совпадает с полученным экспериментально значением — 2,92 % CO_2 /год^{0.5} при учете 100 дней в году с положительной температурой. Расчет модели поглощения с этими коэффициентами приведен на рис. 11.

Хвосты возраста 20 лет изучались на дне осушенного старого хвостохранилища, поэтому они не промывались атмосферными осадками и контактировали с водой, насыщенной относительно карбоната кальция и поэтому же вынос карбонатов из них не происходил. Следовательно, по ним можно рассчитать кинетический коэффициент.

Для Мирнинского ГОКа накопления CO_2 не наблюдается. Напротив, с возрастом содержание карбонатов в хвостах уменьшается. Этот процесс связан с выносом карбонатов атмосферными осадками и талыми водами в более глубокие горизонты. Можно предположить, что такой процесс происходит одинаково каждый год, что позволяет рассчитать скорость выноса. Изменение содержания карбонатов (в пересчете на CO_2) показано на рис. 12. Линейная регрессия позволяет установить, что ежегодное снижение содержания карбонатов в хвостах составляет 0,48 % (в пересчете на CO_2). Это значение можно использовать для учета тех карбонатов, которые были вынесены в более глубокие слои хвостохранилища.

Для хвостов Нюрбинского ГОКа также не наблюдается поглощение углекислого газа, содержание карбонатов уменьшается с возрастом. Линейная регрессия показывает, что ежегодное уменьшение составляет 0,6 %.

В хвостах Удачинского ГОКа наблюдается увеличение содержания карбонатов (до возраста 5 лет), а затем — снижение. Это можно интерпретировать как сумму процессов накопления и выноса в более глубокие горизонты. Полученное значение углового наклона показывает, что содержание карбонатов (в форме CO_2) уменьшается на 0,56 %.

Экспериментальные исследования показали, что ККП для кимберлитов, попадающих в хвосты Удачинского ГОКа, составляет 2.61 % $\text{CO}_2/\text{год}^{0.5}$ при учете 100 дней в году с положитель-

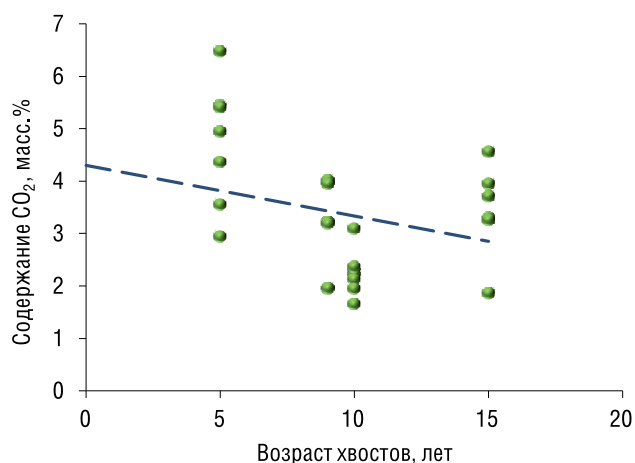


Рис. 12. Линейная регрессия содержания карбонатов (в форме CO_2) в разновозрастных хвостах Мирнинского ГОКа
Fig. 12. Linear regression of carbonate content (in the form of CO_2) in different-age tailings of the Mirninsky MPC.

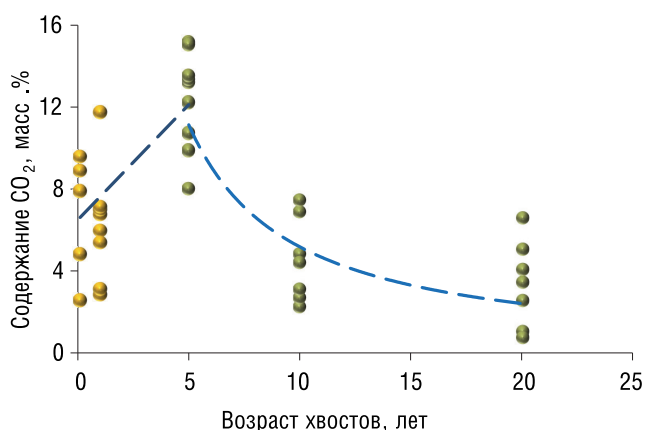


Рис. 13. Расчет модели поглощения углекислого газа хвостами Удачинского ГОКа по экспериментальным данным (пунктирные кривые) — наблюдаемое накопление карбонатов в хвостах с учетом выноса (кинетический коэффициент взят по природным данным). Точки — содержание CO_2 в хвостах разного возраста

Fig. 13. Calculation of the model of carbon dioxide absorption by the tailings of Udachninsky MPC according to experimental data (dotted curves) — the observed accumulation of carbonates in the tailings, taking into account the removal (kinetic coefficient is taken from natural data). Dots — CO_2 content in tails of different ages.

ной температурой. По накоплению карбонатов в хвостах с учетом выноса рассчитан кинетический коэффициент — 3 % $\text{CO}_2/\text{год}^{0.5}$. Эти значения хорошо совпадают. Была рассчитана модель наблюдаемого накопления карбонатов (в форме CO_2) в хвостах Удачинского ГОКа с использованием кинетического коэффициента по природным данным и выноса, равного 0,6 % в год (рис. 13). Результаты расчета модели хорошо совпадают с наблюдаемыми значениями, но, учитывая, что связывание углекислого газа хвостами происходит необратимо, для оценки поглощения следует использовать расчет полного поглощения. В данном случае рекомендуется использовать кинетический коэффициент, полученный по экспериментальным данным, поскольку для природных наблюдений точность оценки недостаточна.

Рекомендованные кинетические коэффициенты и объем поглощенной углекислоты хвостами разных лет приведены в табл. 2. Эти коэффициенты могут быть использованы для расчета поглощения по производственным площадкам.

4. Компенсация выбросов парниковых газов. Верификация результатов

По результатам работ, выполненных учеными из МГУ имени М. В. Ломоносова на основе теоретических и стендовых исследований руды всех коренных месторождений (кимберлитовых трубок), разрабатываемых группой «АЛРОСА», а также по результатам полевых исследований, выполненных на производственных площадках в городах Мирном и Удачном и поселках Нюрба и Айхал в Республике Саха (Якутия), а также на площадке Ломоносовского ГОКа (Архангельская обл.), с целью регулирования и упорядочения расчетов поглощения углекислого газа производственными площадками была разработана Методика количественного определения поглощения углекислого

Таблица 2. Рекомендуемые кинетические коэффициенты поглощения (ККП) и относительное поглощение углекислоты хвостами разного возраста

Table 2. Recommended kinetic absorption coefficients and relative absorption of carbon dioxide by different-ages tailings

ГОК	ККП, % $\text{CO}_2/\text{год}^{0.5}$	Накопление CO_2 по годам, %				
		1	2	3	4	5
Ломоносовский	2.08	2,1	2,9	3,6	4,2	4,7
Мирнинский	3.3*	3,3	4,7	5,7	6,6	7,4
Нюрбинский	2.8*	2,8	4,0	4,8	5,6	6,3
Айхальский	2.22	2,2	3,1	3,8	4,4	5,0
Удачинский	2.61	2,6	3,7	4,5	5,2	5,8

*Коэффициенты, экспериментально определенные для оценки потенциального связывания углекислоты.

газа (СТО АЛРОСА 1-2.007.2024), утвержденная приказом генерального директора № 01/356-П от 11.12.2024. В методике предложена формула для расчета величины поглощения CO_2 производственными площадками (ГОКами), а также формула для расчета их суммарного поглощения на основе исходных данных о количестве переработанной руды коренных месторождений, разрабатываемых АК «АЛРОСА» (ПАО) и АО «Севералмаз», к которым относятся трубки «Заполярная», «Удачная», «Юбилейная», «Айхал», «Зарница», «Архангельская», им. Карпинского, а также «Деймос», «Новинка», «Магнитная», «Заря», «Комсомольская». Методика не включает сырые россыпных месторождений (пески), которое не обладает поглощающей способностью. Кроме того, методика не может быть применена для расчета поглощения углекислого газа хвостами других коренных месторождений, разрабатываемых в РФ, а также за рубежом (Канада, Африка и др.), поскольку учитывает специальные условия, связанные с особенностями технологического процесса подготовки руды – мокрого самоизмельчения, и условия пребывания в хвостохранилищах, оказывающие влияния на происходящие химические реакции преобразования минералов в коре выветривания кимберлитов, сопровождающиеся поглощением углекислого газа из воздуха.

Из методики также были исключены расчеты поглощения углекислого газа отработанной рудой мирнинской и нюрбинской производственных площадок, относящихся к Мирнинско-Нюрбинскому ГОКу. Несмотря на то, что кимберлитовая руда этих месторождений (трубки «Интернациональная», «Мир», «Бутобинская», «Нюрбинская») экспериментально показывает высокий уровень поглощения за счет химического связывания углекислого газа в результате реакций преобразования минералов, при полевых исследованиях в хвостохранилищах этих ГОКов заметного накопления карбонатов не было выявлено. Причины наблюдаемого явления, а также способы запуска процесса накопления карбонатов могут быть установлены в ходе последующих исследований.

Величина поглощения углекислого газа отработанной рудой производственных площадок была сравнена с выбросами ПГ в эквиваленте диоксида углерода (экв. CO_2) как в масштабе отдельных

производственных площадок, так и всего АБК группы «АЛРОСА».

АК «АЛРОСА» (ПАО) в лице Центра инноваций и технологий совместно с Экологическим центром в декабре 2024 г. провела работу по подготовке отчета по выбросам и поглощениям ПГ алмазно-бриллиантового комплекса группы «АЛРОСА» за 2021–2023 гг., а позднее и за 2024 г. В качестве консультанта при подготовке отчета привлекалась компания Kert (ООО «Кэпт Налоги и Консультирование»). Подготовленный отчет был передан в аккредитованный по международным стандартам органу TÜV Austria Standards & Compliance для проведения верификации на соответствие требованиям ISO 14064-1:2018 «Greenhouse gases - Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals» (идентичный национальный стандарт РФ ГОСТР ИСО 14064-1-2021 «Газы парниковые. Часть 1. Требования и руководство по количественному определению и отчетности о выбросах и поглощении парниковых газов на уровне организации»). Процедура верификации осуществлялась в несколько этапов и включала посещение в 2025 г. производственных объектов АК «АЛРОСА» (ПАО) – Удачинского и Айхальского ГОКов, а также Ломоносовского ГОКа АО «Севералмаз» (Архангельск). В ходе верификации проводились опрос сотрудников, наблюдение и оценка действующей системы контроля, запрос и анализ дополнительной информации, проверка данных посредством выборочного пересчета вычислений, обратной и перекрестной проверки и сверки данных.

В результате верификации отчета получен Сертификат о верификации (Verification Statement) с



ISO 14064-1:2018



Online Validation

Рис. 14. Отметка о верификации (активный QR-код). Верификация выполнена в соответствии с процедурами TÜV Austria Standards & Compliance в отношении данных о выбросах и поглощениях парниковых газов за указанный период
Fig. 14. Verification mark (active QR code). The verification was performed in accordance with the procedures of TÜV Austria Standards & Compliance regarding data on greenhouse gas emissions and removals for the specified period.

Таблица 3. Сводные данные о выбросах и поглощениях парниковых газов АБК группы «АЛРОСА» в 2021–2024 гг.

Table 3. Summary data on greenhouse gas emissions and removals by the ALROSA Group Diamonds Factory in 2021-2024

Виды выбросов и поглощений парниковых газов (ПГ)	Значения прямых выбросов и поглощений ПГ (Score 1), косвенных выбросов ПГ от импортированной энергии (Score 2), т CO ₂ -экв.			
	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.
Прямые выбросы	724375	825768	832093	862573
Косвенные выбросы	169754	146393	139008	149552
Суммарные выбросы	894130	972161	971101	1012126
Прямые поглощения	905843	944367	1024402	1048845

проверенными и подтвержденными параметрами (табл. 3). Действительность сертификата может быть проверена по QR-коду (рис. 14).

Из полученных результатов верифицированного отчета видно, что в 2021, 2023 и 2024 годах прямые поглощения ПГ превысили суммарные выбросы ПГ в периметре АБК на 1 %, 5 % и 3 % соответственно. Однако в 2022 г. превысить показатель выбросов не удалось: поглощение покрыло 98 % выбросов парниковых газов. Кроме того, в 2024 г. был рассчитан углеродный след продукции (на алмазы производства группы «АЛРОСА»): он составил $-0,71$ кг CO₂-экв/карат (отрицательное значение).

5. Интенсификация выбросов. Базовая линия поглощения и климатический проект

Международное регулирование, главным элементом которого является Парижское соглашение, направлено на удержание роста глобальной средней температуры на уровне ниже 2 °С и предлагает странам-участницам самостоятельно определять свои вклады в достижение глобальной цели на национальном уровне. В Российской Федерации принят ряд стратегических документов (Климатическая доктрина Российской Федерации⁸, Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года⁹), направленных на предотвращение изменения климата. Вопросы ограничения выбросов парниковых газов регулируются Федеральным законом «Об ограничении выбросов парниковых газов» от 02.07.2021 № 296-ФЗ (далее — ФЗ № 296), который содержит нормы, предусматривающие обязательства

регулируемых организаций предоставлять отчеты о выбросах ПГ, выполнять целевые показатели сокращения выбросов ПГ, а также возможности добровольной реализации климатических проектов. Данным законом введены понятия климатического проекта, углеродной единицы, реестра углеродных единиц. Механизм реализации климатических проектов предполагает поощрение организаций за добровольное дополнительное сокращение выбросов ПГ (без сокращения деятельности или производства). Такая деятельность может быть зарегистрирована как климатический проект при условии оформления в порядке, определяемом законодательством. Углеродные единицы, полученные в результате реализации климатических проектов, могут быть предметом торговли между компаниями, в том числе на биржах.

Значительная часть климатических проектов, зарегистрированных в мире, направлена на сокращение выбросов ПГ, в то время как проекты по поглощению ПГ (CCS) из атмосферы весьма немногочисленны и уникальны. Именно к таким принадлежит проект, который может быть реализован на основе описанного в настоящей статье явления.

Базовая линия климатического проекта — это сценарий, который является наиболее вероятным с учетом всех идентифицированных препятствий (барьеров) для реализации проекта¹⁰. Иначе говоря, это тот уровень выбросов ПГ, который реализовывался бы по умолчанию, без дополнительной проектной деятельности. Последний, в свою очередь, определяет проектную линию.

С другой стороны, явление, описанное в результате проведенных исследований, а именно, преобразование хвостовых продуктов переработки кимберлитовой руды, сопровождающее поглощением CO₂ из воздуха и накоплением в виде кальцита и доломита, происходит самопроизвольно в результате деятельности компании. Оно не является результатом специально предпринятых мер и не может быть климатическим проектом по определению.

Уникальным случаем, не описанным ранее в мировой практике, является то, что уже в базовом сценарии (в периметре АБК) уровень поглощения превышает эмиссию ПГ, делая производство углеродно-нейтральным без реализации

⁸Утв. указом Президента Российской Федерации от 26.10.2023 № 812 // Официальное опубликование правовых актов. — <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202310260009>.

⁹Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 29.10.2021 № 3052-р // Официальный интернет-портал правовой информации www.pravo.gov.ru, 01.11.2021, № 0001202111010022.

¹⁰Пункт 10 приказа Минэкономразвития России от 11.05.2022 № 248 (ред. от 08.07.2024) «Об утверждении критериев и порядка отнесения проектов, реализуемых юридическими лицами, индивидуальными предпринимателями или физическими лицами, к климатическим проектам» // Официальный интернет-портал правовой информации www.pravo.gov.ru, 31.05.2022, № 0001202205310004.

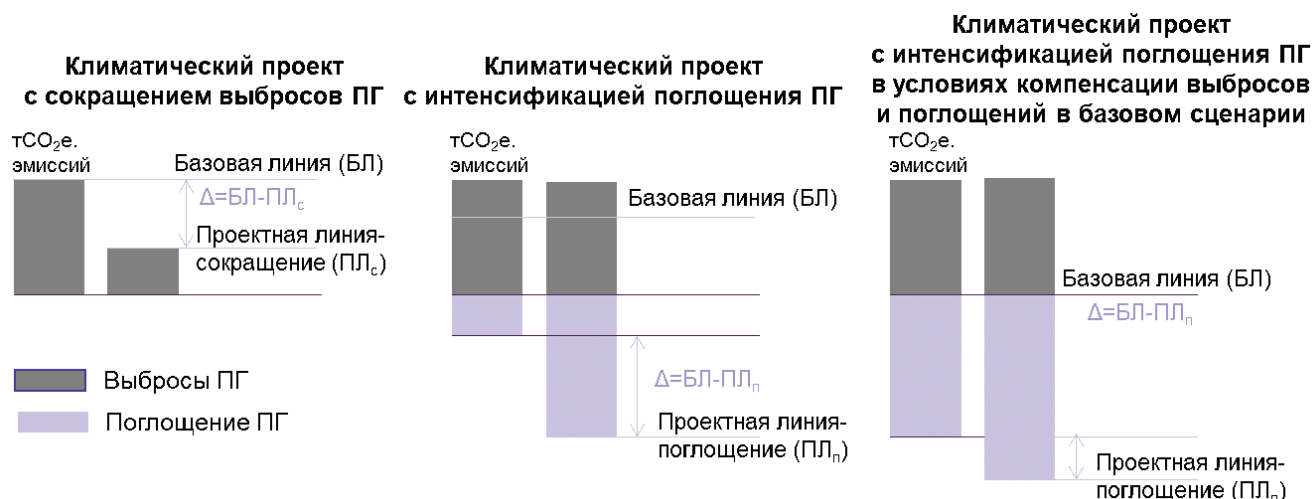


Рис. 15. Отличия климатических проектов по сокращению выбросов ПГ, увеличению поглощения ПГ, а также климатического проекта в условиях, характерных для АЛРОСА в базовом сценарии

Fig. 15. Differences between climate projects to reduce GHG emissions, increase GHG uptake, and the climate project in the conditions typical of ALROSA in the baseline scenario.

климатического проекта (рис. 15). При этом климатический проект может быть осуществлен посредством реализации мер интенсификации поглощения CO₂ на производственных объектах, которые могут включать как специальные меры на обогатительных фабриках, так и на хвостохранилищах компании, которые помимо функции складирования хвостовых продуктов (как это происходило ранее) будут наделены функцией карбонового полигона.

6. Результаты и обсуждения

В настоящей статье, с одной стороны приведены результаты экспериментальных и полевых исследований, сопоставленные между собой, и сделанные на основании них выводы о явлении поглощения углекислого газа из атмосферы переработанной рудой, а также методика его количественной оценки, а с другой стороны, — данные по эмиссии парниковых газов Группы «АЛРОСА». Количественные данные были сопоставлены в подготовленном отчете по выбросам и поглощениям ПГ алмазно-бриллиантового комплекса Группы «АЛРОСА» в 2021–2024 гг., который был верифицирован независимым аккредитованным органом по сертификации.

В результате работы получен сертификат, подтверждающий углеродную нейтральность алмазно-бриллиантового комплекса Группы «АЛРОСА» — производственной группы, включающей АК «АЛРОСА» (ПАО), АО «Севералмаз», АО «Алмазы Анабара», АО «ПО «Кристалл», ООО «ЮГ «АЛРОСА». Превышение уровня эмиссии над поглощением ПГ в 2022 г. (поглощение 944 тыс. т при эмиссии ПГ в 972 тыс. т), при условии пре-

вышения в 2021 и 2023 гг., по мнению авторов статьи, не меняет общую наблюдаемую картину. С учетом того, что общее поглощение за этот период превышает эмиссию ПГ, можно сказать, что впервые зафиксированный уровень поглощения ПГ в базовом варианте деятельности горнодобывающей компании превысил уровень эмиссии ПГ, т. е. вышел на уровень, определяющий углеродную нейтральность.

При отсутствии подтвержденных ранее заявлений такого рода, которых авторам настоящей работы на момент публикации найти не удалось, может быть сделано заявление: **АЛРОСА стала первой промышленной и первой горнодобывающей компанией, которая вышла на уровень, определяющий углеродную нейтральность**, и в периметре алмазно-бриллиантового комплекса формально превысившую этот уровень в 2021, 2023 и 2024 годах.

Отметим, что достижение уровня углеродной нейтральности в 2021, 2023 и 2024 годах, наряду с достижением отрицательного углеродного следа на алмазы в 2024 г, как, впрочем, и исключительно высокий уровень компенсации эмиссии поглощением в 2022 г., обязано не только описанному и изученному явлению поглощения углекислого газа кимберлитом. Важнейшим фактором, вносящим вклад в это, является высокая доля «зеленой» электроэнергии от собственной гидроэлектростанции — Вилуйской ГЭС-3. Благодаря наличию данного актива, компании удастся сокращать уровень косвенных энергетических выбросов ПГ (Scope 2) на 30–40 %.

Также следует отметить, что изучение природы явления поглощения углекислого газа из атмос-

феры кимберлитовыми породами позволит вы- дальнейшим применить их для реализации клима-
работать меры интенсификации поглощения и в тического проекта CCS. **РОН**



Список использованных источников

1. Гаранин В. К., Посухова Т. В., Гаранин К. В. Минералогия месторождений алмаза : учебное пособие. – М. : Макс-пресс, 2012. – 329 с. – ISBN 978-5-317-04239-4.
2. Сушенцова Б. Ю. Взаимодействие углекислого газа с ультраосновными и основными породами: экспериментальное и термодинамическое моделирование : автореферат дисс. ...канд. геол.-минерал. наук. – М., 2013. – 26 с.
3. Сорохтин О. Г., Ушаков С. А. Развитие Земли. – М. : Изд-во МГУ, 2002. – 506 с.
4. Carbon dioxide capture and storage : IPCC Special Report [Электронный ресурс] / Working Group III ; B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, L. Meyer (Eds). – N.-Y., Cambridge University, 2005. – (ISBN 0-521-86643-X). URL: https://web.archive.org/web/20180810072824/https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf (дата обращения: 22.10.2024).
5. Collaborating for a net-zero future : Global Status of CCS Report 2024 [Электронный ресурс] / Global CCS Institute. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/11/Global-Status-Report-6-November.pdf> (дата обращения: 24.10.2024).
6. Conti S. De Beers Explores the Carbon-zapping Powers of Kimberlite [Электронный ресурс]. April 22, 2020 // WWD : сайт. URL: <https://www.debeersgroup.com/~media/Files/D/De-Beers-Group/documents/building-forever/carbonvault-in-the-press.pdf> (дата обращения: 25.10.2024).
7. 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 / E. M. Mervine, S. A. Wilson, I. M. Power, et al. // Mineralogy and Petrology. 2018. 112 (Suppl 2). Pp. 755–S765. (на англ.). <https://doi.org/10.1007/s00710-018-0589-4>. 8. Heiberg T. De Beers pilots plan to store carbon dioxide in diamond-bearing rock. May 4, 2017 // Reuters : сайт. URL: <https://www.reuters.com/article/lifestyle/science/de-beers-pilots-plan-to-store-carbon-dioxide-in-diamond-bearing-rock-idUSKBN18024S/> (дата обращения: 24.10.2024).
9. Evaluating feedstocks for carbon dioxide removal by enhanced rock weathering and CO₂ mineralization / C. Paulo, I. M. Power, A. R. Stubbs, et al. // Applied Geochemistry. 2021. Vol. 129. P. 104955. (на англ.). <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.104955>.
10. Потенциал компенсации выбросов парниковых газов предприятий группы «АЛРОСА» за счет карбонизации отработанного кимберлита / А. Ю. Масанов, М. А. Дубовичев, А. В. Толстов, и др. // Рациональное освоение недр. 2021. № 4. С. 64–73. doi: 10.26121/RON.2021.87.40.008.
11. Реализация экологических инициатив АК «АЛРОСА» (ПАО) по достижению углеродной нейтральности / А. Ю. Масанов, П. С. Анисимова, А. В. Толстов, и др. // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26. № 4. С. 54–66. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-54-66>.

References

1. Garanin VK, Posukhova TV, Garanin KV. *Mineralogiya mestorozhdenii almaza* [Mineralogy of diamond deposits*]. Moscow, Maks-press Publ., 2012, 329 p. (In russ). ISBN 978-5-317-04239-4.
2. Sushentsova BYu. *Vzaimodeistvie uglekislogo gaza s ul'traosnovnymi i osnovnymi porodami: eksperimental'noe i termodinamicheskoe modelirovanie* [Interaction of carbon dioxide with ultrabasic and basic rocks: Experimental and thermodynamic modeling*] [extended abstract of dissertation]. Moscow, 2013. (In Russ).
3. Sorokhtin OG, Ushakov SA. *Razvitie Zemli* [Development of the Earth*]. Moscow, Publishing House of Moscow State University, 2002, 506 p. (In Russ).
4. IPCC Special Report on Carbon dioxide capture and storage, Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change; B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos & L. Meyer (Eds). New York, Cambridge University Publ., 2005. ISBN 0-521-86643-X. Available from: https://web.archive.org/web/20180810072824/https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf (accessed: 24 Oct 2024).
5. Collaborating for a net-zero future. Global Status of CCS Report 2024 by Global CCS Institute. Available at: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/11/Global-Status-Report-6-November.pdf> (accessed: 24 Oct 2024).
6. Conti S. De Beers Explores the Carbon-zapping Powers of Kimberlite [Internet]. Available at: <https://www.debeersgroup.com/~media/Files/D/De-Beers-Group/documents/building-forever/carbonvault-in-the-press.pdf> (accessed: 25.10.2024).
7. Mervine EM, Wilson SA, Power IM, 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):755-765. <https://doi.org/10.1007/s00710-018-0589-4>.
8. Heiberg T. De Beers pilots plan to store carbon dioxide in diamond-bearing rock [Internet]. Available at: <https://www.reuters.com/article/lifestyle/science/de-beers-pilots-plan-to-store-carbon-dioxide-in-diamond-bearing-rock-idUSKBN18024S/> (accessed: 24.10.2024).
9. Paulo C, Power IM, Stubbs AR, et al. Evaluating feedstocks for carbon dioxide removal by enhanced rock weathering and CO₂ mineralization. *Applied Geochemistry*. 2021;129:104955. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.104955>.
10. Masanov AYU, Dubovichev MA, Tolstov AV, et al. Offsetting potential of GHG emissions of ALROSA Group enterprises due to carbonation of waste kimberlite. *Ratsional'noye osvoeniye neдр* [Mineral Mining & Conservation (MMC)]. 2021;(4):64-73. (In Russ). doi: 10.26121/RON.2021.87.40.008.
11. Masanov AYU, Anisimova PS, Tolstov AV, et al. Implementation of environmental initiatives of JSC «ALROSA» (PJSC) to achieve carbon neutrality. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021;26(4):54-66. (In Russ). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-54-66>.

*Translated by the Authors of this article.

Информация об авторах

Алексей Юрьевич Масанов – руководитель направления по внедрению инноваций, Центр инноваций и технологий АК «АЛРОСА» (ПАО). Республика Саха (Якутия), 678170 Мирный, ул. Ленина, 6

Андрей Юрьевич Бычков – д-р геол.-минерал. наук, доцент, профессор, зав. кафедрой геохимии геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова. 119991 Москва, Ленинские горы, 1

Дарья Юрьевна Горючкина – директор, операционные риски и устойчивое развитие Керт (ООО «Кэпт Налоги и Консультирование»). 125040 Москва, Ленинградский просп., 34А, бизнес-центр «Алкон III»

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Прохождение статьи

Статья поступила в редакцию 04.02.2025; согласована 24.02.2025; принята к публикации 26.02.2025.

Information about the authors

Aleksey Yu. Masanov – Head of the Innovation Implementation Department at the Center for Innovation and Technology, ALROSA (PJSC). 6, Lenina ul., Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), 678170 Russia

Andrey Yu. Bychkov – D. Sci., Professor, Reader, Head of the geochemistry subdepartment of the Department of geology, Lomonosov Moscow State University. 1, Leninskie gory, Moscow, Russia

Dar'ya Yu. Goryachkina – Director, Operational Risks and Sustainable Development of Kept (Kept Tax and Advisory LLC). 34A, Leningradskii prospekt, Alcon III Business Center, 125040, Moscow, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflicts of interest

The authors declare no conflicts of interest

Article history

The article was submitted 4 February 2025; agreed 24 February 2025; accepted for publication 26 February 2025.

ДЕВЯТЫЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ

SEYMARTEC MINING

ЧЕЛЯБИНСК
ОТЕЛЬ «RADISSON BLU»

24–26
ИЮНЯ

ЭФФЕКТИВНОСТЬ
ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО
ПРОИЗВОДСТВА



seymartec.ru



+7 499 638-23-29



info@seymartec.ru

АК «АЛРОСА» (ПАО) – первая промышленная и первая горнодобывающая компания, достигшая уровня углеродной нейтральности алмазно-бриллиантового комплекса

