

Потенциал компенсации выбросов парниковых газов предприятий группы «АЛРОСА» за счет карбонизации отработанного кимберлита

А. Ю. Масанов*, руководитель направления по внедрению инноваций, Центр инноваций и технологий, АК «АЛРОСА» (ПАО)¹

М. А. Дубовичев, руководитель Центра инноваций и технологий, АК «АЛРОСА» (ПАО)¹

А. В. Толстов, директор Научно-исследовательского геологического предприятия, АК «АЛРОСА» (ПАО)¹, д-р геол.-минерал. наук, действ. чл. АН РС(Я)

П. С. Анисимова, зам. главного инженера по вопросам экологии и работы с коренными и малочисленными народами Севера – руководитель Экологического центра, АК «АЛРОСА» (ПАО)¹

К. В. Гаранин, главный геолог, АК «АЛРОСА» (ПАО)¹, канд. геол.-минерал. наук

А. В. Дорохов, РТУ МИРЭА², ИФХЭ РАН³, канд. хим. наук

В. Б. Барановская, зав. ЦКП ФМИ⁴, ИОНХ РАН⁵, д-р хим. наук

¹Главная штаб-квартира: Россия, Республика Саха (Якутия), 678174 Мирный, ул. Ленина, 6. Московский офис: 115184 Москва, Озерковская наб., 24.

²ФГБУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454 Москва, пр-т Вернадского, 78).

³ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина Российской академии наук (119071 Москва, Ленинский пр-т, 31, корп. 4).

^{4,5}Центр коллективного пользования физическими методами исследования веществ и материалов, ФГБУН Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН (119991 Москва, Ленинский пр-т, 31).

*Контактное лицо: MasanovAYu@alrosa.ru

ВВЕДЕНИЕ

Способность ультраосновных пород поглощать углекислый газ при выветривании – продолжительном контакте с атмосферным воздухом – широко известна и описана в литературе [1, 2]. Реакции взаимодействия ультраосновных пород с углекислым газом, содержащимся в воздухе, приводят к поглощению CO_2 с образованием кальцита и других карбонатов. Кимберлит, разрабатываемый алмазодобывающими компаниями мира, как коренная алмазосодержащая руда также является типичной ультраосновной породой, способной поглощать углекислый газ при контакте с атмосферным воздухом при наличии влаги.

Способность кимберлита поглощать углекислый газ не имела практического значения, и данный аспект изучен недостаточно, в том числе научным сообществом. Все изменила новая климатическая повестка, которую диктует запрос мирового сообщества на уменьшение антропогенного воздействия на климат за счет обеспечения углеродной нейтральности [3].

Интерес к кимберлиту как возможному инструменту реализации проектов улавливания и захоронения CO_2 (Carbon Capture & Storage) периодически возникает у производителей алмазов.

Экспериментально изучена способность кимберлитовой породы поглощать углекислый газ из атмосферного воздуха и накапливать его в составе карбонатов. По результатам исследований проб исходного кимберлита трубки «Удачная», а также проб, отобранных из хвостохранилища на разных этапах жизненного цикла породы, спектральными и рентгенодифракционными методами изучения вещества установлено, что содержание карбонатов в течение 10 лет пребывания породы в хвостохранилище может достигать 15 масс.%, при этом поглощение углекислого газа при карбонизации может достигать 8,2 масс.%. Проанализирован потенциал предприятий группы «АЛРОСА» в компенсации выбросов парниковых газов за счет указанного явления. Согласно расчетам выбросы могут полностью компенсироваться при поглощении CO_2 хвостами переработанного кимберлита. Запланированы масштабные исследования для подтверждения полученных результатов.

Ключевые слова: добыча алмазов, кимберлит, карбонизация, окружающая среда, углерод, климат, парниковые газы, климатический проект, углеродные единицы.

Один из лидеров алмазного рынка – компания De Beers – заявляла о разработке такого проекта. В 2016–2018 гг. De Beers совместно с ведущими научными центрами Австралии, Канады и США провела исследования поглотительной способности диоксида углерода кимберлитовыми породами южно-африканских (Venetia, Voorspoed) и канадских (Gahcho Kué, Victor и Snap Lake) месторождений [4]. 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 при этом обратно пропорционально поглощательной 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 покрыть эмиссию CO_2 , допущенную при разработке и обогащении кимберлитовой руды.

Структурные подразделения АК «АЛРОСА» (ПАО) – Центр инноваций и технологий, Научно-исследовательское геологическое предприятие (НИГП) и Удачный ГОК – совместно провели исследования и верификацию результатов, полученных De Beers для кимберлитовых рудников ЮАР и Канады, чтобы экспериментально оценить возможность поглощения кимберлитовыми породами углекислого газа из атмосферы. Объектами исследований были выбраны исходные образцы кимберлита из керна трубки «Удачная», образцы перерабатываемого сырья обогатительной фабрики (ОФ), а также образцы, соответствующие разному времени пребывания продуктов обогащения кимберлитовых пород в резервуарах хвостохранилища Удачного ГОКа. Целью исследований являлась проверка принципиальной возможности использования отработанных кимберлитовых пород в качестве средства улавливания и захоронения углекислого газа из атмосферы, а также определение потенциала компенсации выбросов парниковых газов, продуцируемых АК «АЛРОСА» (ПАО) в ходе производственной деятельности по добыче и переработке сырья, за счет поглощения углекислого газа отработанными породами.

Изложенные в настоящей работе результаты исследований должны положить начало более масштабным исследованиям, объектами которых могут стать новые кимберлитовые тела, разрабатываемые группой компаний «АЛРОСА» как в Якутской, так и Восточно-Европейской алмазоносных провинциях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Отбор образцов. Отбор образцов исходного кимберлита проводился из керна разведочных скважин трубки «Удачная». Каменный материал был подвергнут дроблению до класса крупности $-2+0,5$ мм с

контрольным просмотром в рентгеновских лучах на аппарате «Фотон-М» для возможного выявления и извлечения содержащихся в образцах алмазов. Видимых алмазов класса $+0,5$ мм выявлено не было.

Отбор образцов из продуктов обогащения (хвостов) ОФ был осуществлен после финального этапа технологического процесса обогащения. Пробы из материала хвостов обогащения класса крупности $-2+0,5$ мм были отобраны на фабрике № 12 Удачного ГОКа (далее ОФ-12).

Отбор образцов переработанной породы, соответствующей 1 мес, 5 мес, 5 годам и 10 годам жизненного цикла их пребывания в хвостохранилище, был проведен геологической службой Удачного ГОКа с поверхности резервуаров хвостохранилища ОФ-12 в соответствии с подготовленной схемой отбора (рис. 1).

ИК-спектроскопические исследования. ИК-спектры исследовались в РТУ МИРЭА с применением ИК Фурье-спектрофотометра ФСМ 2201 (ООО «Инфраспек»), препараты образцов прессовались с КВг в таблетки (диаметр 13 мм, толщина 1 мм) и регистрировались с шагом измерения 1 см^{-1} в диапазоне от 4000 до 400 см^{-1} .

СННС/С-элементный анализ. Элементный анализ на содержание углерода был проведен в двух исследовательских центрах: в РТУ МИРЭА – на элементном анализаторе EuroVector EA 1112 и в ЦКП ФМИ ИОНХ РАН – на элементном анализаторе EuroVector EA 3000. Для проведения анализа пробы предварительно измельчали в нефритовой ступке.

Рентгенодифракционные исследования. Количественный и качественный состав минеральных фаз образцов определяли с помощью рентгенодифракционной спектрометрии. Измерения вы-



Рис. 1. Схема отбора проб из хвостохранилищ Удачного ГОКа в 2021 г. (с использованием Яндекс-карты)

Fig. 1. Scheme of sampling from the tailings dumps of the Udachninsky mining and processing plant in 2021 (using Yandex-maps).

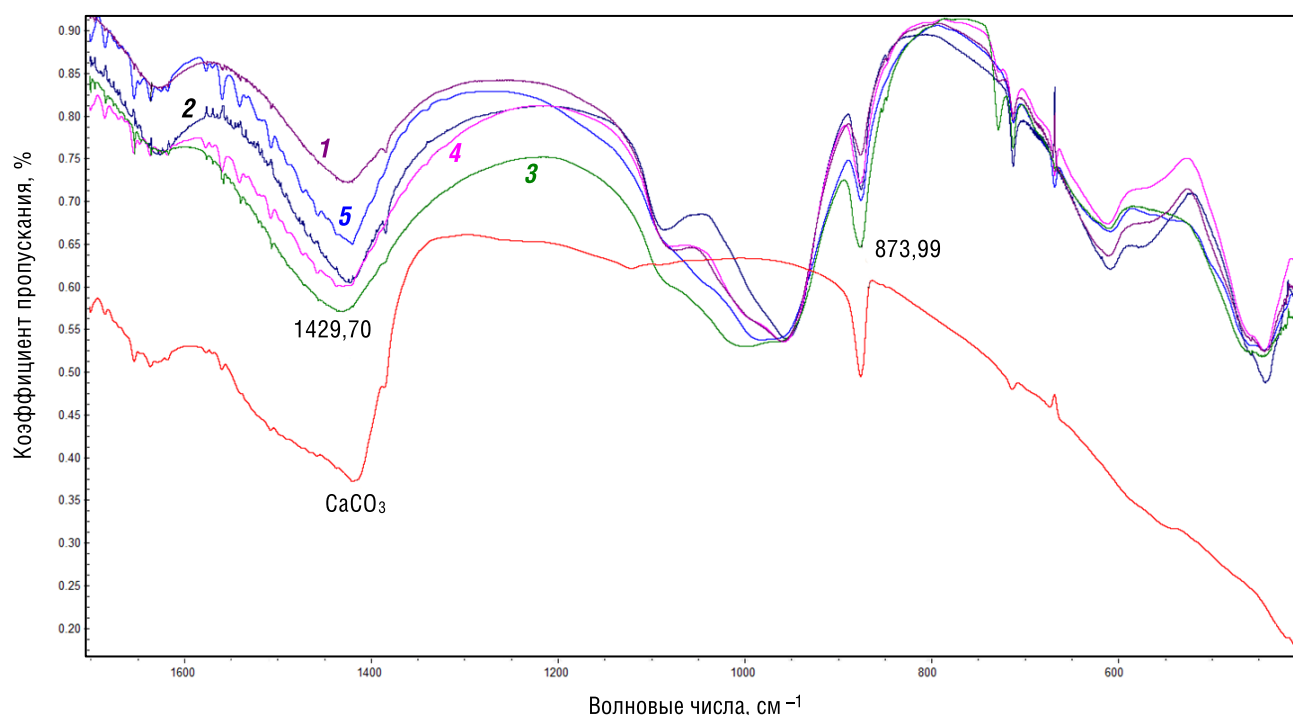


Рис. 2. ИК-спектры образцов в диапазоне 1800–400 см⁻¹ в сравнении с кальцитом (CaCO₃):

1 – исходный образец кимберлита трубки «Удачная»; 2 – отходы ОФ-12; 3–5 – образцы из хвостохранилища, находившиеся там в течение 5 мес (3), 5 лет (4) и 10 лет (5)

Fig. 2. The IR spectra of samples in the range of 1800–400 cm⁻¹ in comparison with calcite (CaCO₃): (1) Initial sample of Udachnaja kimberlite pipe; (2) Waste of the processing plant; Samples from a tailings dump stored there for (3) 5 months, (4) 5 years, and (5) 10 years.

полнены в ЦКП ФМИ ИОНХ РАН с использованием рентгеновского дифрактометра Bruker D8 Advance (Германия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Полученные ИК-спектры изученных образцов показывают качественную картину их состава и отражают количественное соотношение продуктов реакций карбонатизации вследствие поглощения углекислого газа исходной кимберлитовой рудой при ее измельчении, прохождении полного цикла обогащения и различной продолжительности пребывания хвостов обогащения в хвостохранилище (рис. 2).

В области от 1800 до 400 см⁻¹ проявляются колебания, характерные для порообразующих минералов кимберлитовых пород. Так, в отметках 1600, 1420, 980, 874 и 720 см⁻¹ для всех образцов отмечаются полосы поглощения, отвечающие валентным колебаниям ν_{SiO} и деформационным колебаниям δ_{SiOSi} и δ_{OSiO} силикатных пород. Интенсивность этих полос остается практически неизменной для всех изученных образцов. Полосы поглощения при 1430 и 874 см⁻¹ отвечают соответственно валентным и деформационным колебаниям карбонат-иона (CO₃²⁻). Аналогичные полосы поглощения проявляются в спектре образца химически чистого CaCO₃. Наличие данных полос поглощения в спектре кимберлитовой породы

указывает на присутствие CaCO₃ в исследуемых образцах, а по соотношению интенсивностей полос поглощения, отвечающих карбонат-иону, и полос, отвечающих колебаниям силикатов, можно судить о количестве карбоната в образцах.

Сравнение ИК-спектров исследуемых образцов показывает, что наименьшее содержание карбонатов наблюдается в образце исходного кимберлита, отобранного непосредственно из керна трубки «Удачная», а наибольшее – в образце хвостов обогащения кимберлитовой породы, соответствующей 5 мес пребывания в хвостохранилище. Значения отношений интенсивностей полос поглощения силикатов и карбонатов в остальных пробах, в том числе соответствующих 5 и 10 годам пребывания в хвостохранилище, находятся в середине между значениями исходной пробы и пробы, соответствующей 5 мес.

Данные по содержанию углерода получены с использованием СННС-анализаторов. Принцип их действия основан на динамическом методе Дюма-Прегля – сжигании пробы в присутствии окислителя в токе инертного газа. Для обеспечения точности полученных результатов проведен межлабораторный сравнительный эксперимент с привлечением двух исследовательских центров – РТУ МИРЭА и ИОНХ РАН. Полученные результаты приведены в табл. 1. Поскольку между результатами нет значимых отличий, в дальнейших расчетах

использованы средние значения полученных концентраций.

Результаты элементного анализа показывают схожую с полученной по ИК-спектральным данным картину: минимальное содержание углерода наблюдается в образцах исходного кимберлита – 1,96 %, в то время как наибольшее – в образцах из хвостов ОФ и первых месяцев пребывания в хвостохранилище – 5,45 и 5,15 % соответственно, после чего в хвостах обогащения, спустя 5–10 лет пребывания их в хвостохранилище, содержание атомарного углерода стабилизируется до значения 3,6 %.

Состав кимберлитовых пород изучен достаточно детально [5–12]. Среди минералов, составляющих кимберлитовые породы, в наибольшей степени распространены оливин $(Mg, Fe)_2[SiO_4]$, флогопит $K(Mg, Fe)(OH, F)_2Si_3AlO_{10}$, клинопироксен $Ca(Mg, Fe, Al)Si_2O_6$, а также исходные карбонаты – кальцит $CaCO_3$ и доломит $CaCO_3 \cdot MgCO_3$. Углерод при этом может содержаться только в карбонатах, если пренебречь содержанием углерода – в виде и битумов, и алмаза. Поскольку содержание последнего даже в самых богатых месторождениях, например в трубке «Интернациональная», не превышает 10 кар/т, что соответствует $2 \cdot 10^{-4}$ % и несопоставимо с содержанием углерода в породообразующих карбонатах.

Согласно литературным данным [13] содержание карбонатов в трубках Якутской алмазоносной провинции не превышает 4,7 % (1,2 % в пересчете на углерод), что сопоставимо с экспериментальными данными, полученными для образца исходного кимберлита трубки «Удачная»: в пересчете на

Таблица 1. Результаты элементного анализа (углерод)

Table 1. Results of elemental analysis (carbon)

Возраст образца, мес	Образец	Содержание С, %			Содержание CO_2 , %		
		РТУ МИРЭА	ИОНХ РАН	Среднее значение	РТУ МИРЭА	ИОНХ РАН	Среднее значение
0	Исходный	–	–	1,2	–	–	4,40
0,1	Размельченный	1,91	2,00	1,96	7,00	7,33	7,17
0,2	Отходы ОФ	6,10	4,80	5,45	22,37	17,60	19,98
1	Месячный	4,99	5,30	5,15	18,30	19,43	18,87
5	5-месячный	5,14	4,80	4,97	18,85	17,60	18,22
60	5-летний	4,44	3,30	3,87	16,28	12,10	14,19
120	10-летний	4,78	3,60	4,19	17,53	13,20	15,36

углерод – 1,96 % (см. табл. 1). По мнению автора работы [13], относительно низкое содержание карбонатной компоненты по сравнению с другими алмазоносными кимберлитовыми полями объясняется сравнительно низким уровнем развития в кимберлитах наложений карбонатизации.

Исходя из того, что весь углерод в образцах можно считать накопленным в виде карбонатов, можно построить динамическую диаграмму поглощения углекислого газа (рис. 3). Экспериментально полученное содержание углерода в исходном образце 1,96 % соответствует поглощению 7,17 масс.% CO_2 . Реально этот уровень может быть несколько ниже, поскольку подготовка образцов и аналитические измерения проводилось в атмосфере воздуха, из которого размельченные частицы уже могли поглощать углекислый газ. Тем не менее, примем это значение в качестве исходного фона, обусловленного содержанием кальцита и доломита. Максимум поглощения углекислого газа по результатам элементного анализа приходится на стадию выхода извлеченной

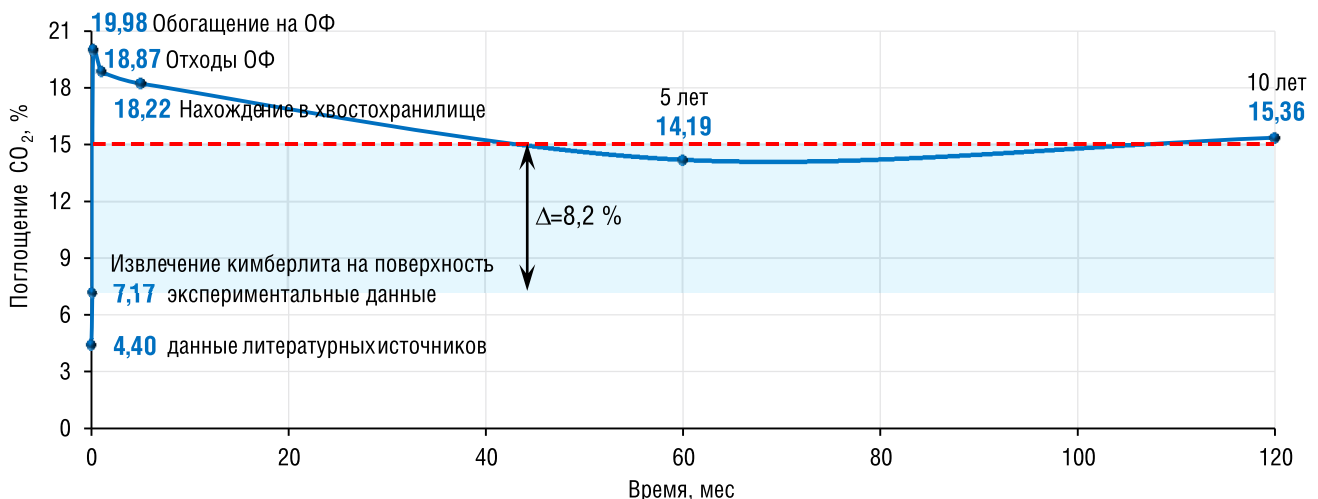


Рис. 3. Динамическая диаграмма поглощения углекислого газа (CO_2)

Fig. 3. Dynamic graphic of carbon dioxide (CO_2) absorption.

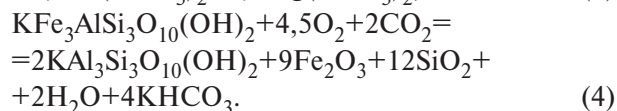
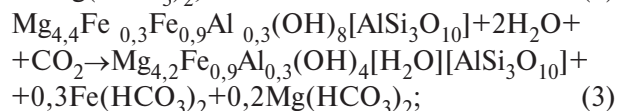
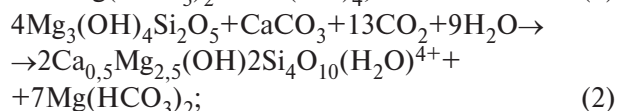
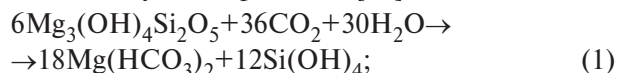
из недр горной массы после переработки ее на ОФ и пребывания в хвостохранилище в первые 5 мес. Поглощение углекислого газа на этом этапе достигает 20 масс.%, после чего в течение дальнейшего пребывания хвостов кимберлитовой породы в хвостохранилище, приближающегося к 5 и 10 годам, этот показатель стабилизируется на уровне 15 масс.%.

Полученное значение (15 масс.%) поглощения углекислого газа сопоставимо с результатами исследований, проведенных De Beers для кимберлитов ЮАР и Канады. Полученные в АК «АЛРОСА» данные для трубки «Удачная» входят в диапазон, определенный для кимберлитов трубок Venetia, Voorspoed, Gahcho Kué, Victor и Snap Lake (от 4,7 до 24 %), что, безусловно, согласуется с литературными данными об их петрохимической схожести, а также подтверждает единый характер взаимодействия кимберлитовых пород с углекислым газом воздуха в присутствии воды и после механохимического воздействия на кимберлит при последующем обогащении. Разница между экспериментально полученным исходным и конечным значениями поглощения углекислого газа составляет 8,2 масс.%. Эта цифра является результатом экспериментального измерения накопления CO_2 (приведенного в настоящем исследовании) в течение 10-летнего жизненного цикла перерабатываемой кимберлитовой руды методом элементного анализа.

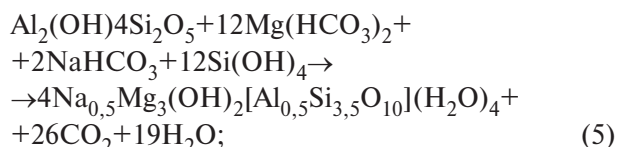
Объяснить наблюдаемое на основании полученных данных пиковое значение поглощения на первых стадиях жизненного цикла сырья, достигающее 20 масс.%, и дальнейшую стабилизацию

содержания CO_2 в хвостовых продуктах можно, предположительно, следующими процессами.

I. При обогащении (размельчении в мельницах с водой) в результате химических превращений кимберлита в сложной системе «кимберлит – вода – воздух» могут происходить химические реакции, которые имеют как обратимый, так и необратимый характер поглощения углекислого газа. Так, поглощение CO_2 происходит при протекании следующих реакций [14]:

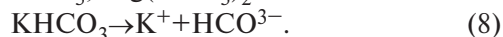


Выделением углекислого газа из полупродуктов первых реакций сопровождаются следующие реакции:



В результате «быстрых» обратимых реакций происходит поглощение углекислого газа до уровня 20 масс.% за счет карбонизации, а в результате «медленных» – стабилизация этого показателя до уровня 15 масс.%.

II. В результате поглощения углекислого газа происходит образование как нерастворимых карбонатов – CaCO_3 , MgCO_3 , так и растворимых – KHCO_3 , NaHCO_3 , $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$:



В течение всего времени пребывания отходов обогащения кимберлитов в хвостохранилище под воздействием атмосферных осадков (дождя и таяния снега) происходит вымывание растворимых карбонатов (в виде гидрокарбонатов) с их последующей цементацией в нижних слоях хвостохранилища.

В случае первого предположения предельным уровнем поглощения следует считать значение, при котором происходит стабилизация – 15 масс.%, во втором – пиковый уровень поглощения – 20 масс.%.

Таблица 2. Содержание минеральных фаз в образцах

Table 2. Mineral phases content in samples.

Минеральная фаза	Химическая формула	Содержание минеральных фаз (%) в образцах возрастом, мес					
		0,1	0,2	1	5	60	120
Кварц	SiO_2	1,1	0,7	3,5	2,2	4,7	2,6
Флогопит	$\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	5,7	7,6	7,4	7,4	7,4	9,8
Кальцит	CaCO_3	22,5	47,7	33,9	34,0	38,7	32,5
Доломит	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	–	10,6	25,9	27,8	7,7	10,9
Магнетит	Fe_3O_4	2,8	–	1,0	0,6	3,5	2,3
Хлорит	$\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	2,4	6,5	0,8	1,3	3,2	2,7
Оливин	$\text{Mg}_{0,8}\text{Fe}_{0,2}\text{SiO}_4$	32,8	10,9	3,7	4,7	4,3	4,5
Фаялит	Fe_2SiO_4	–	–	–	–	–	2,0
Лизардит	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	12,7	15,9	23,8	21,7	28,8	21,1
Анортит	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	14,9	–	–	–	–	–
Периклаз	MgO	1,3	–	–	–	–	–
Рибекит	$(\text{Na,Ca})_2(\text{Fe,Mn})_3$	3,9	–	–	–	–	–
	$\text{Fe}_2(\text{Si,Al})_8\text{O}_{22}(\text{OH,F})_2$	–	–	–	–	–	–
Апатит	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$	–	–	–	–	–	1,7

В целом результаты рентгенодифракционного исследования образцов (табл. 2) соответствуют известным для кимберлита данным: всего для шести образцов было установлено 13 минеральных фаз, соответствующих кварцу, флогопиту, кальциту, доломиту, магнетиту, хлориту, оливину (форстериту), лизардиту, анортиту, периклазу, рибекиту, апатиту и пириту. При этом происходит количественное изменение фаз и их качественное перераспределение при переходе от образца кимберлита из зерна к образцам, соответствующим длительному времени пребывания в хвостохранилище. Содержание оливина, составляющее в исходном образце 32,8 %, резко снижается до 10,9 % уже на этапе обработки руды на ОФ и в дальнейшем стабилизируется до уровня 4,5–4,7 %.

Если уровень анортита в исходном образце составлял 14,9 %, то в других образцах его следы отсутствуют. Это же относится к флогопиту, периклазу и рибекиту. Распад этих минералов, в том числе под действием реакций карбонатизации, сопровождается наблюдаемым ростом содержания в последующих образцах кварца, магнетита, хлорита, кальцита, доломита и лизардита – все эти минералы являются продуктами реакций распада оливина, которые можно проиллюстрировать схемой трансформации минерального состава (рис. 4), предложенной на основе модели преобразования минералов в коре выветривания кимберлитов, приведенной в работе [9] на основе исследования пород и минералов трубки «Катока».

Дальнейшие масштабные исследования смогут прояснить ситуацию и определить механизмы реакций взаимодействия, характер продуктов и дебет поглощения CO_2 в таких реакциях.

Динамика изменения фаз образцов кальцита, доломита и лизардита (рис. 5) указывает на то, что накопление кальцита также имеет пиковый характер. Максимум накопления приходится на первые стадии жизненного цикла отработанной породы. В образце отходов ОФ содержание кальцита по результатам изме-

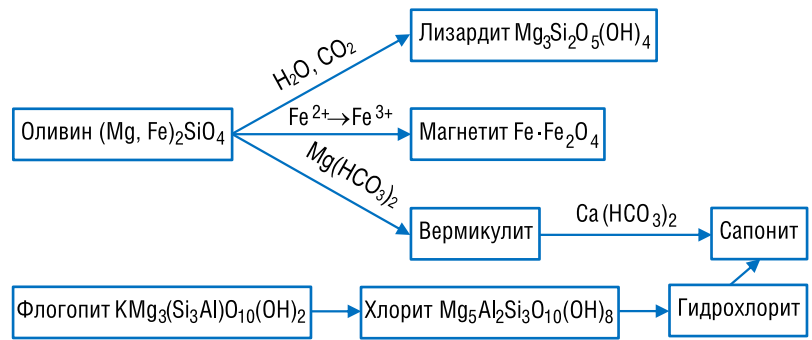


Рис. 4. Предполагаемая схема распада оливина и флогопита
Fig. 4. The proposed scheme of the disintegration of olivine and phlogopite.

рений достигает 47,7 %, а к 10 годам пребывания в хвостохранилище стабилизируется на уровне 32,5 %. Содержание доломита возрастает с отметки ниже уровня определения спектрометра до значения 10,6 % и достигает максимума 27,8 % к годовичному сроку пребывания в хвостохранилище. Разница между содержанием в исходном образце кимберлита и образце отработанной руды, соответствующем 10 годам пребывания в хвостохранилище, составляет для кальцита 10 %, для доломита – 10,9 %.

Если пересчитать эти показатели на углекислый газ, поглощенный при таком накоплении в соответствии с условными реакциями $\text{CaO} + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3$ и $\text{CaO} + \text{MgO} + 2\text{CO}_2 = \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, то получим массо-

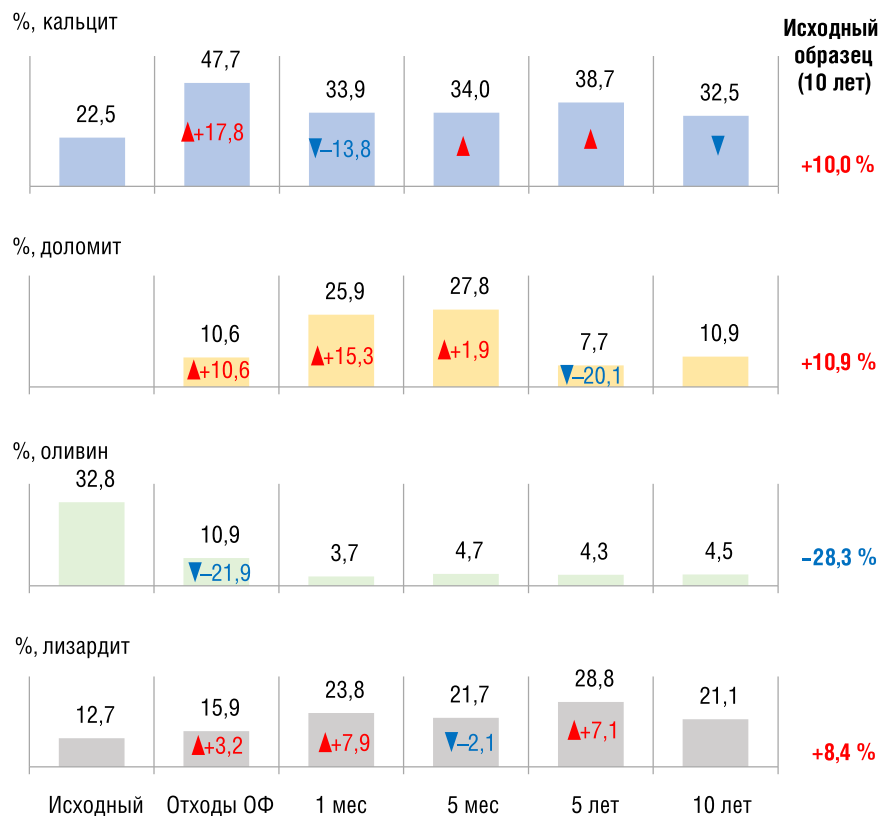


Рис. 5. Динамика изменения фаз кальцита, доломита, оливина и лизардита
Fig. 5. Trend of changes in the phases of calcite, dolomite, olivine and lizardite.

вый процент поглощения CO_2 для кальцита 6,2 %, для доломита – 2,5 %. Суммарное значение, определенное по количественному изменению фаз на основе рентгенодифракционного анализа для поглощенного диоксида углерода, будет составлять 8,7 масс. %.

Таким образом, на основе двух параллельных измерений были получены значения для поглощения CO_2 . Значения, полученные посредством элементного анализа (8,2 масс. %) и рентгенодифракционного измерения (8,7 масс. %) сходятся

между собой: разница между ними при условии получения результатов *in situ* невелика.

Для дальнейшей оценки потенциала компенсации выбросов предлагается использовать наименьшее значение – 8,2 масс. % (или 82 кг CO_2 на 1 т переработанной руды).

ПОТЕНЦИАЛ КОМПЕНСАЦИИ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Полученное значение поглощения углекислого газа в течение 10 лет жизненного цикла отходов обогащения кимберлитовой руды трубки «Удачная», разрабатываемой Удачинским ГОКом, позволяет в первом приближении дать оценку потенциала компенсации выбросов парниковых газов предприятиями группы компаний АК «АЛРОСА» за счет поглощения углекислого газа кимберлитовыми породами.

Согласно данным Отчета об устойчивом развитии за 2020 г. [15, с. 109] и показателям ESG* группы «АЛРОСА» [16] количество руды, переработанной в 2017, 2018, 2019 и 2020 годах составляет 39132, 40488, 41252 и 29686 тыс. т соответственно. Если допустить, что поглощение углекислого газа на других рудниках, разрабатываемых предприятиями группы, имеет схожее значение (8,2 масс. %) и сравнить его с данными по эмиссии эквивалента углекислого газа, опубликованными в том же отчете, то можно вычислить потенциал компенсации. Потенциал поглощения углекислого газа составляет 2,4 млн т в 2020 г. и может превышать в 4,4 раза эмиссию эквивалента углекислого газа, производимую алмазно-бриллиантовым комплексом (АБК) АК «АЛРОСА» (ПАО), ПАО «Севералмаз», АО «Алмазы Анабара» за этот период, и в 2,4 раза – эмиссию группы компаний «АЛРОСА» (рис. 6), в которую также входят геологоразведочный, энергетический и транспортный комплексы, включая авиакомпанию «АЛРОСА». Структура эмиссии в эквиваленте CO_2 в 2020 г. представлена на рис. 7.

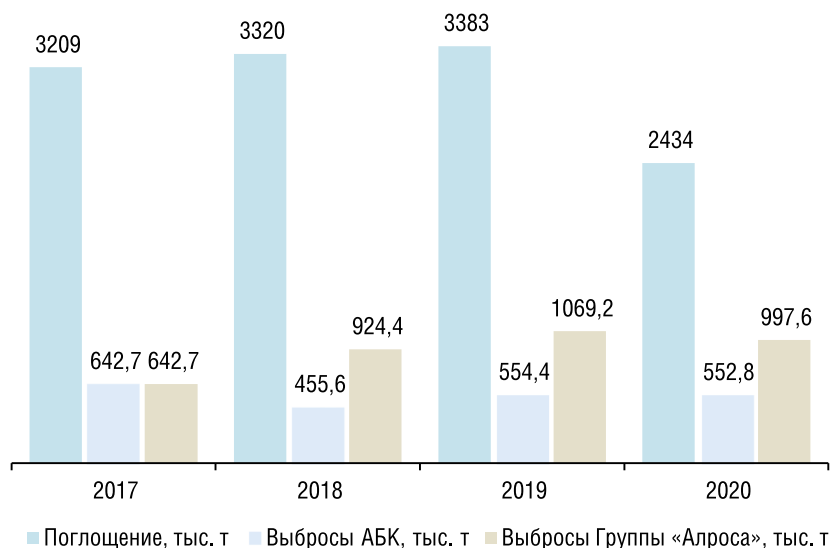


Рис. 6. Соотношения поглощения углекислого газа (CO_2) и эмиссии эквивалента CO_2 предприятий алмазно-бриллиантового комплекса (АБК) АК «АЛРОСА» (ПАО) и предприятий Группы «АЛРОСА» в 2017–2020 гг.

Fig. 6. Ratio of carbon dioxide (CO_2) absorption and CO_2 equivalent emissions by the enterprises of the ALROSA (PJSC) diamond complex and the enterprises of the ALROSA Group in 2017–2020.

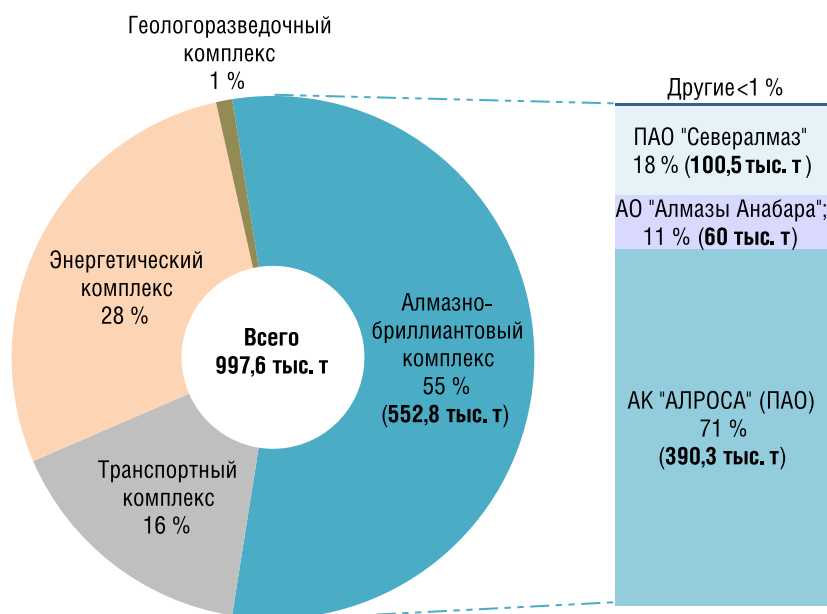


Рис. 7. Структура эмиссии эквивалента углекислого газа предприятиями группы «АЛРОСА» в 2020 г.

Fig. 7. Emission structure of the equivalent of carbon dioxide by ALROSA Group enterprises in 2020.

*Environmental, Social and Governance – экология, социальная ответственность, управление.

Таким образом, основываясь на первых экспериментальных данных, полученных в результате изучения кимберлитов трубки «Удачная» и отходов их обогащения, оценен потенциал компенсации поглощения углекислого газа за счет естественной карбонизации перерабатываемой кимберлитовой руды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проведены первые исследования по возможности компенсации парниковых газов, продуцируемых Группой «АЛРОСА», за счет естественного поглощения их продуктами отработки кимберлита. Для этого выполнен отбор образцов кимберлитовой руды трубки «Удачная», а также образцов отработанной породы на различных этапах жизненного цикла отходов обогащения с поверхности хвостохранилищ Удачинского ГОКа. Отобранные образцы были исследованы с применением методов ИК-спектроскопии, элементного анализа, а также рентгенодифракционного анализа. Результаты исследований показали, что поглощение углекислого газа на стадии переработки и после первых 5 мес пребывания в хвостохранилище достигает 20 масс.%, после чего в течение 5–10 лет поглощение стабилизируется до значения 15 масс.%. С учетом исходного содержания карбонатов в изученных образцах среднее поглощение углекислого газа составляет 8,2 % (или 82 кг CO₂ на 1 т переработанной руды). Полученные данные согласуются с аналогичными исследованиями, проведенными компаниями Anglo American и De Beers в 2017–2018 гг.

На основании экспериментально полученных результатов дана оценка потенциала компенсации эмиссии эквивалента парниковых газов Группы «АЛРОСА» за счет карбонизации кимберлитовой руды при ее переработке и дальнейшем пребывании отходов обогащения в хвостохранилище в естественных условиях. Проведенная первичная оценка позволяет констатировать, что потенциал поглощения CO₂ в процессе переработки кимберлитовых руд АК «АЛСРОА» (ПАО) в 2,4 раза превышает эмиссию углекислого газа всех предприятий Группы «АЛРОСА».

Данные результаты следует рассматривать в качестве предварительных, полученных на основании экспериментальных исследований кимберлитов трубки «Удачная» и хвостов обогащения Удачинского ГОКа. Более точные, объективные и обоснованные результаты на представительном объеме могут быть получены в результате масштабных исследований по разрабатываемым месторождениям (не менее 10) АК «АЛРОСА» (ПАО), теоретических проработок и стендовых испытаний.

Последующие исследования

С целью изучения механизмов, термодинамики и кинетики реакций, сопровождающихся поглощением углекислого газа в условиях добычи и обогащения кимберлитов Якутской и Архангельской алмазоносных провинций и пребывания отходов обогащения в хвостохранилищах, а также для создания методики оценки поглощения углекислого газа для отдельных месторождений, АК «АЛРОСА» (ПАО) предполагает провести масштабные исследования, к которым планируется привлечь ведущие научные центры.

Объектами исследований станут образцы кимберлитов из разрабатываемых Группой «АЛРОСА» коренных месторождение алмазов (трубки «Удачная», «Зарница», «Айхал», «Юбилейная», «Нюрбинская», «Ботуобинская», «Майская», «Интернациональная», «Мир», «Заря», им. Карпинского-1, а также «Архангельская» и «Поморская»). При этом будут изучены продукты переработки руд указанных трубок, а также образцы отходов обогащения кимберлитов из хвостохранилищ Айхальского, Мирнинского, Удачинского, Нюрбинского и Ломоносовского ГОКов.

В рамках планируемой работы предполагается выполнить научные исследования, направленные на изучение реакций, сопровождающих поглощение углекислого газа кимберлитовыми породами, а также провести комплексное полевое и экспериментальное изучение, включая изучение минерального и фазового составов в толще хвостохранилищ, стендовые испытания с учетом климатических особенностей Якутии и Архангельской области. **РОИ**

Поступила в редакцию 20.07.2021



Список использованных источников

1. Гафанин В. К., Посухова Т. В., Гафанин 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 : 25.00.09. – М., 2013. – 26 с.
3. Spontaneous Serpentine Carbonation Controlled by Underground Dynamic Microclimate at the Montecastelli Copper Mine, Italy / Ch. Boshi, F. Bedini, I. Baneschi [et al.] // Minerals. 2020. No. 10(1), pp. 1–19. DOI: 10.3390/min10010001. (на англ.)

4. 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, Ia. M. Power, G. Dipple // *Mineralogy and Petrology*. 2018. 112(36). P. 755–765. DOI:10.1007/s00710-018-0589-4. (на англ.)
5. Францесон Е. В. Петрология кимберлитов. – М. : Наука, 1968. – 198 с.
6. Коренные месторождения алмазов мира = Diamond primary deposits of the world / А. Д. Харьков, Н. Н. Зинчук, А. И. Крючков, АК «Алмазы России-Саха», ЯНИГП ЦНИГРИ. – М. : Недра, 1998. – 554 с.
7. Нормативный кварц как критерий интенсивности массопереноса при постмагматическом изменении кимберлитов трубки Ботубинская (Якутия) / В. Б. Василенко, А. В. Толстов, В. А. Минин, Л. Г. Кузнецова, Н. В. Сурков // *Геология и геофизика*. 2008. Т. 49. № 12. С. 1189–1204.
8. Химический состав и алмазоносность кимберлитов трубки Нюрбинская (В. Сибирь) в процессе вторичного изменения / В. Б. Василенко, А. В. Толстов, Л. Г. Кузнецова, В. А. Минин // *Геохимия*. 2009. № 11. С. 1146–1154.
9. Основные процессы, определяющие вторичные изменения кимберлитов / В. Б. Василенко, Л. Г. Кузнецова, А. В. Толстов, В. А. Минин // *Геохимия*. 2016. № 4. С. 396–406.
10. Латин А. В., Толстов А. В., Василенко В. Б. Петрогеохимические особенности кимберлитов Средне-Мархинского района в связи с проблемой геохимической неоднородности кимберлитов // *Геохимия*. 2007. № 12. С. 1292–1304.
11. Особенности вещественного состава кимберлитов Слюдюкарского поля (Западная Якутия) / М. В. Мальцев, А. В. Толстов, Т. С. Старкова, А. С. Иванов // *Наука и образование*. 2017. № 4 (88). С. 37–43.
12. Новое тело высокоалмазоносных кимберлитов в Накынском поле Якутской кимберлитовой провинции / А. В. Толстов, В. А. Минин, В. Б. Василенко, Л. Г. Кузнецова, А. Н. Разумов // *Геология и геофизика*. 2009. Т. 50. № 3. С. 227–240.
13. Яковлев Д. А. Вещественный состав кимберлитов Верхнемунского поля (Якутия) : автореферат дисс. ...канд. геол.-минерал. наук : 25 00 09. – Иркутск, 2007. 22 с.
14. Стегницкий Ю. Б. Вещественно-индикационные параметры кимберлитов и их использование при разведке и эксплуатации месторождений: На примере трубок Нюрбинская и Каток: автореферат дисс. ...канд. геол.-минерал. наук : 25.00.11. – Мирный, 2006. – 22 с.
15. Группа АЛРОСА Отчет об устойчивом развитии 2020 : [Электронная версия]. URL: http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2021/06/ALROSA_SR_2020_RU.pdf.
16. Группа АЛРОСА Показатели ESG : [Электронный ресурс]. URL: http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2021/08/ALROSA_ESG_Databook_RUS.xlsx.

UDC code 622.371.1/7: 504.3.054 (АК «АЛРОСА»)

DOI: 10.26121/RON.2021.87.40.008

Offsetting potential of GHG emissions of ALROSA Group enterprises due to carbonation of waste kimberlite**Alexey Yu. Masanov***, Task Leader to innovation adoption of the Center for Innovation and Technologies, ALROSA PJSC¹**Mikhail A. Dubovichev**, Head of the Center for Innovation and Technologies, ALROSA PJSC¹**Alexander V. Tolstov**, Director of the Scientific Research Geological Enterprise, ALROSA PJSC¹, Full Member of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), D.Sc. (in Geol.-Mineral.)**Polina S. Anisimova**, Deputy Chief Engineer for Ecology and Work with Indigenous and small-numbered peoples of the North & Head of the Environmental Center, ALROSA PJSC¹**Konstantin V. Gararin**, Chief Geologist, ALROSA PJSC¹, PhD (in Geol.-Mineral. Sciences)**Andrey V. Dorokhov**, PhD (in Chem. Sciences), RTU MIREA², IPCE RAS³**Vasilisa B. Baranovskaya**, D.Sc. (in Chem.), Head of the Center for Collective use of Physical methods for the study of Substances and Materials, IGIC RAS⁴¹Main headquarters: 6, Lenin ul., Mirnyj, Republic of Sakha (Yakutia), 678174, Russia. *Moscow office*: 24, Ozerkovskaja naberezhnaja, Moscow, 115184, Russia.²MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo prospekt, Moscow, 119454, Russia).³Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences (4 korpus, 31, Leninskij prospekt, Moscow, 119071, Russia).⁴Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences (31, Leninskij prospekt, Moscow, 119991, Russia).

*Author to whom correspondence should be addressed: MasanovAYu@alrosa.ru.

Abstract: The ability of kimberlite rock to absorb carbon dioxide from atmospheric air and accumulate it in carbonates has been experimentally studied. According to the results of studies of samples taken from the tailings storage at different stages of the rock life cycle, as well as samples of the initial kimberlite of the Udachnaya pipe spectral and X-ray diffraction methods of studying the substance have established that the content of carbonates during 10 years of rock residence in the tailings storage can reach 15 wt.%, while the absorption of carbon dioxide during carbonation can reach 8.2 wt.%. The potential of the enterprises of the ALROSA Group in compensating for greenhouse gas emissions due to this phenomenon is analyzed. According to the calculations, the emissions can be fully compensated by the absorption of CO₂ by the tailings of processed kimberlite. Large-scale studies are planned to confirm the results obtained.

Key words: Diamond mining; Kimberlite; Carbonation; Environment; Carbon; Climate; Greenhouse gases; Climate project; Carbon units.

Received 20.07.2021

References

1. Garanin V.K., Posuhova T.V., Garanin K.V. *Mineralogija mestorozhdenij almaza* [Mineralogy of diamond deposits*]. Moscow, Maks-press Publ., 2012, 329 p. ISBN 978-5-317-04239-4. (in Russ.)
2. Sushencova B.Ju. *Vzaimodejstvie uglekislogo gaza s ul'traosnovnymi i osnovnymi porodami: jeksperimental'noe i termodinamicheskoe modelirovanie. Avtoreferat diss. ...kand. geol.-mineral. nauk* [Interaction of carbon dioxide with ultrabasic and basic rocks: experimental and thermodynamic modeling.* Extended abstract of candidate's thesis]. Moscow, 2013, 26 p.(in Russ.)
3. Boschi Ch., Bedini F., Baneschi I., Rielli A., Baumgartner L., Perchiazzi N., Ulyanov A., Zanchetta G., Dini A. Spontaneous Serpentine Carbonation Controlled by Underground Dynamic Microclimate at the Montecastelli Copper Mine, Italy. *Minerals* 10(1):1-19. DOI:10.3390/min10010001. (in Eng.)
4. Mervine E.M., Wilson S.A., Power Ia.M., Dipple G.M., Turvey C.C., Hamilton J.L., Vanderzee S., Raudsepp M., Southam C., Matter J.M., Kelemen P.B., Steinfenhofer J., Miya Z., Souhtam G. 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 & Petrology*, 2018 (suppl. iss. 2), vol. 112(36), pp. 755–765. DOI:10.1007/s00710-018-0589-4. (in Eng.)
5. Francesson E.V. *Petrologija kimberlitov* [Petrology of kimberlites*]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 198 p.
6. Har'kiv A.D., Zinchuk N.N., Krjuchkov A.I. *Korennye mestorozhdenija almazov mira* [Diamond primary deposits of the world]. Moscow, Nedra Publ., 1998, 554 p.
7. Vasilenko V.B., Tolstov A.V., Minin V.A., Kuznetsova L.G., Surkov N.V. Normative quartz as an indicator of the mass transfer intensity during the postmagmatic alteration of the Botuobinskaya pipe kimberlites (Yakutia), *Russian Geology and Geophysics*, 2008, vol. 49, no. 12, pp. 894–907. (in Eng.)
8. Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G., Minin V.A., Tolstov A.V. Chemical composition and diamond potential of kimberlites having experienced secondary alteration: Nyurbinskaya pipe, East Siberia. *Geochemistry International*, 2009, vol. 47, no. 11, pp. 1075–1082. (in Eng.)
9. Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G., Tolstov A.V., Minin V.A. Key processes determining secondary alterations in kimberlites. *Geochemistry International*, 2016, vol. 54, no. 4, pp. 369–377. (in Eng.)
10. Lapin A.V., Tolstov A.V., Vasilenko V.B. Petrogeochemical characteristics of the kimberlites from the Middle Markha region with application to the problem of the geochemical heterogeneity of kimberlites. *Geochemistry International*, 2007, vol. 45, no. 12, pp. 1197–1209. (in Eng.)
11. Maltsev M.V., Tolstov A.V., Starkova T.S., Ivanov A.S. Features of the matter of the Suldyukar field kimberlites (Western Yakutia). *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2017, no. 4(88), pp. 37–43. (in Russ.)
12. Tolstov A.V., Razumov A.N., Minin V.A., Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G. A new body of highly diamondiferous kimberlites in the Nakyn field of the Yakutian kimberlite province. *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 3, pp. 162–173. (in Eng.)
13. Jakovlev D.A. *Veshhestvennyj sostav kimberlitov Verkhnemunskogo polja (Jakutija). Avtoreferat diss. ...kand. geol.-mineral. nauk* [Material composition of kimberlites of the Verkhnemunsky field (Yakutia).* Extended abstract of candidate's thesis]. Irkutsk, 2007, 22 p.
14. Stegnickij Ju.B. *Veshhestvenno-indikacionnye parametry kimberlitov i ih ispol'zovanie pri razvedke i jekspluatacii mestorozhdenij: Na primere trubok Nyurbinskaja i Katoka. Avtoreferat diss. ...kand. geol.-mineral. nauk* [Material and indicative parameters of kimberlites and their use in the exploration and extraction of deposits: On the example of the Nyurbinskaya and Katoka pipes.* Extended abstract of candidate's thesis]. Mirnyj, 2006, 22 p.
15. ALROSA Group. Sustainable Development Report 2020. Available at: http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2021/06/ALROSA_SR_2020_RU.pdf.
16. ALROSA Group. ESG indicators. Available at: http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2021/08/ALROSA_ESG_Databook_RUS.xlsx.

*Translated by the Authors of this article.

Ссылка для цитирования в русскоязычных изданиях:

Потенциал компенсации выбросов парниковых газов предприятий группы «АЛРОСА» за счет карбонизации отработанного кимберлита / А. Ю. Масанов, М. А. Дубовичев, А. В. Толстов, П. С. Анисимова, К. В. Гаранин, А. В. Дорохов, В. Б. Барановская // Рациональное освоение недр. 2021. № 4. С. 64–73. DOI: 10.26121/RON.2021.87.40.008.

To cite this article in English:

Masanov A.Yu., Dubovichev M.A., Tolstov A.V., Anisimova P.S., Garanin K.V., Dorokhov A.V., Baranovskaya V.B. Offsetting potential of GHG emissions of ALROSA Group enterprises due to carbonation of waste kimberlite *Ratsional'noye osvoyeniye nedr* [Mineral Mining & Conservation (MMC)], 2021, no. 4, pp. 64–73. DOI: 10.26121/RON.2021.87.40.008.