



ISOTOPE COMPOSITION OF CARBON AND OXYGEN IN CALCITES OF ALKALINE ULTRAMAFIC DYKES WITHIN THE URIK-IYA GRABEN

Yu.V. Danilova ¹✉, V.B. Savelyeva ¹, E.P. Bazarova ¹, B.S. Danilov ¹, V.A. Ponomarchuk ²

¹ Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

² Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT. The isotope composition of carbon and oxygen was studied in calcite of dykes and veins of ultramafic lamprophyres, kimberlite, alkaline mica picrites from the Yarma above-intrusion zone, and pyroxene-free picrites intruding the rocks of the Bolshetagninsky carbonatite massif within the Urik-Iya graben hosted by the East Sayan Mountains. The data on $\delta^{13}\text{C}$ (from -6.6 to -3.9 ‰ relative to VPDB) disclose the ideas on the mantle origin of the carbonate substance of dykes. High values of $\delta^{18}\text{O}$ (from $+13.9$ to $+11.8$ ‰ relative to VSMOW) suggest the impact of deuteritic fluids, i.e. magmatic fluids separated from melts, at later stage of formation of the calcite-bearing alkaline ultramafic rocks.

KEYWORDS: C-O isotopes; dyke; carbonate; alkaline ultramafic magmatism

FUNDING: The study was funded by RSF, grant 18-17-00101; Shared Research Facilities "Geodynamics and Geochronology", grant 075-15-2021-682.

SHORT COMMUNICATION

Received: June 1, 2022

Revised: August 8, 2022

Accepted: August 24, 2022

Correspondence: Yulia V. Danilova, jdand@crust.irk.ru

FOR CITATION: Danilova Yu.V., Savelyeva V.B., Bazarova E.P., Danilov B.S., Ponomarchuk V.A., 2022. Isotope Composition of Carbon and Oxygen in Calcites of Alkaline Ultramafic Dykes within the Urik-Iya Graben. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (4), 0653. doi:10.5800/GT-2022-13-4-0653

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ УГЛЕРОДА И КИСЛОРОДА КАЛЬЦИТОВ ЩЕЛОЧНО-УЛЬТРАМАФИЧЕСКИХ ДАЕК УРИКСКО-ИЙСКОГО ГРАБЕНА

Ю.В. Данилова¹, В.Б. Савельева¹, Е.П. Базарова¹, Б.С. Данилов¹, В.А. Пономарчук²

¹ Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

АННОТАЦИЯ. Исследован изотопный состав углерода и кислорода в кальците даек и жил ультрамафических лампрофиров, кимберлита, щелочных слюдяных пикритов Ярминской надинтрузивной зоны и беспироксеновых пикритов, прорывающих породы Большетагнинского карбонатитового массива в пределах Урикско-Ийского грабена (Восточное Присяянье). Данные $\delta^{13}\text{C}$ (от -6.6 до -3.9 ‰ относительно VPDB) соответствуют представлению о мантийном происхождении карбонатного вещества даек. Высокие значения $\delta^{18}\text{O}$ (от $+13.9$ до $+11.8$ ‰ относительно VSMOW) свидетельствуют о воздействии дейтерических флюидов (магматические флюиды, отделившиеся от расплавов) на поздней стадии формирования кальцитсодержащих щелочно-ультрамафических пород.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: С-О изотопы; дайка; карбонат; щелочно-ультрамафический магматизм

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ, грант №-18-17-00101, ЦКП «Геодинамика и геохронология», грант № 075-15-2021-682.

1. ВВЕДЕНИЕ

Породы дайково-жильных серий мантийного происхождения нередко сопровождают крупные щелочно-ультрамафические массивы и охватывают полный набор дифференциатов – от калиевых щелочно-ультраосновных пород до основных и средних и далее до щелочных гранитов с уникальными остаточными силикатно-карбонатными породами и карбонатитами [Kukharensko et al., 1965; Vladykin, 2009]. Дайки щелочно-ультрамафического и карбонатного состава встречаются и за пределами массивов, но в пространственной ассоциации с ними. Комплексы даек, включающие пикриты, лампрофиры и карбонатиты, известны во многих регионах и имеют возраст от позднемелового до палеопротерозойского. Изучение мантийных источников, пространственно-временных и геохимических соотношений между этими породами является одной из актуальных проблем магматической петрологии. В частности, важное значение имеет изучение дайковых роев для палеогеодинамических реконструкций, поскольку эти рои являются индикаторами рифтогенных процессов [Ernst et al., 2000; Gladkochub et al., 2010; и др.]. В работе рассмотрены данные по изотопному составу С и О дайково-жильных щелочно-ультрамафических пород в пределах Урикско-Ийского грабена в Восточном Присяянье, на юге Сибирского кратона, с целью получения представления об эволюции щелочно-ультрамафических (кимберлитовых) магм при внедрении и последующем изменении.

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Изучены дайки и жилы беспироксеновых пикритов, прорывающих породы Большетагнинского ийолитсиенит-карбонатитового массива, и ультрамафических лампрофиров (айликитов-мелаайликитов), кимберлита

и щелочных слюдяных пикритов в водораздельной части рек Белая Тагна – Ярма и в правом борту р. Ярма и ее притоков.

Определение содержаний породообразующих компонентов и редких элементов в дайках выполнено на оборудовании ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (г. Иркутск). Изучение изотопного состава С и О зерен кальцита, отобранных под микроскопом из протолок дайкового материала, выполнено с помощью масс-спектрометра MAT-253 в непрерывном потоке гелия (CF IRMS). Для пробоподготовки использовался блок Gas Bench II. Температура разложения образцов в безводной H_3PO_4 составляла 70 °С. Изотопные значения представлены в промилле (‰) в шкале VPDB – для углерода и VSMOW – для кислорода. Калибровка измерений выполнена с использованием международного стандарта NBS-19 со значениями $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}} = +1.95$ ‰ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} = +28.65$ ‰. Погрешность изотопного анализа углерода и кислорода составляла соответственно не более 0.1 и 0.2 ‰. Работы выполнены в ЦКП МИИ СО РАН (г. Новосибирск).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изученные ультрамафические лампрофиры в соответствии с классификацией [Tappe et al., 2005] представлены айликитами и мелаайликитами. Вкрапленники в них образованы частично серпентинизированным оливином Fo_{82-88} , флогопитом, титаномагнетитом. Основная масса сложена оливином, флогопитом, кальцитом, диопсидом, титан-авгитом, отмечаются керсутит, эгирин, микроклин, альбит; акцессорные минералы представлены хромшпинелидами, титаномагнетитом, пировскитом, манганильменитом, апатитом и др.

Наиболее близким к кимберлитам группы I [Tappe et al., 2008, 2014; Becker, Le Roex, 2006] минеральным

составом обладают включения (величиной до 20 см) из меланократовой части Бушканайской дайки, слагающей в настоящее время обнажение в несколько метров на р. Ярма. 80–85 % кимберлита составляет серпентинизированный оливин; второстепенные минералы представлены хромдиопсидом, хлоритизированным флогопитом, кальцитом, серпентином, хромшпинелидами, титаномагнетитом, апатитом, андрадитовым гранатом. Мезократовая часть Бушканайской дайки, вмещающей кимберлит, соответствует флогопит-пироксеновому пикриту. Содержание клинопироксена и слюды в образцах сильно варьируется.

Дайки беспироксеновых пикритов установлены только в Большетагнинском ийолит-сиенит-карбонатитовом массиве. Вкрапленники в них представлены зернами нацело серпентинизированного оливина, реже – хлоритизированного флогопита. В основной массе присутствуют серпентин, кальцит, флогопит, монтчеллит, хлорит, тальк, титанистый андрадит, хромшпинелиды, апатит, перовскит, гидрогранат.

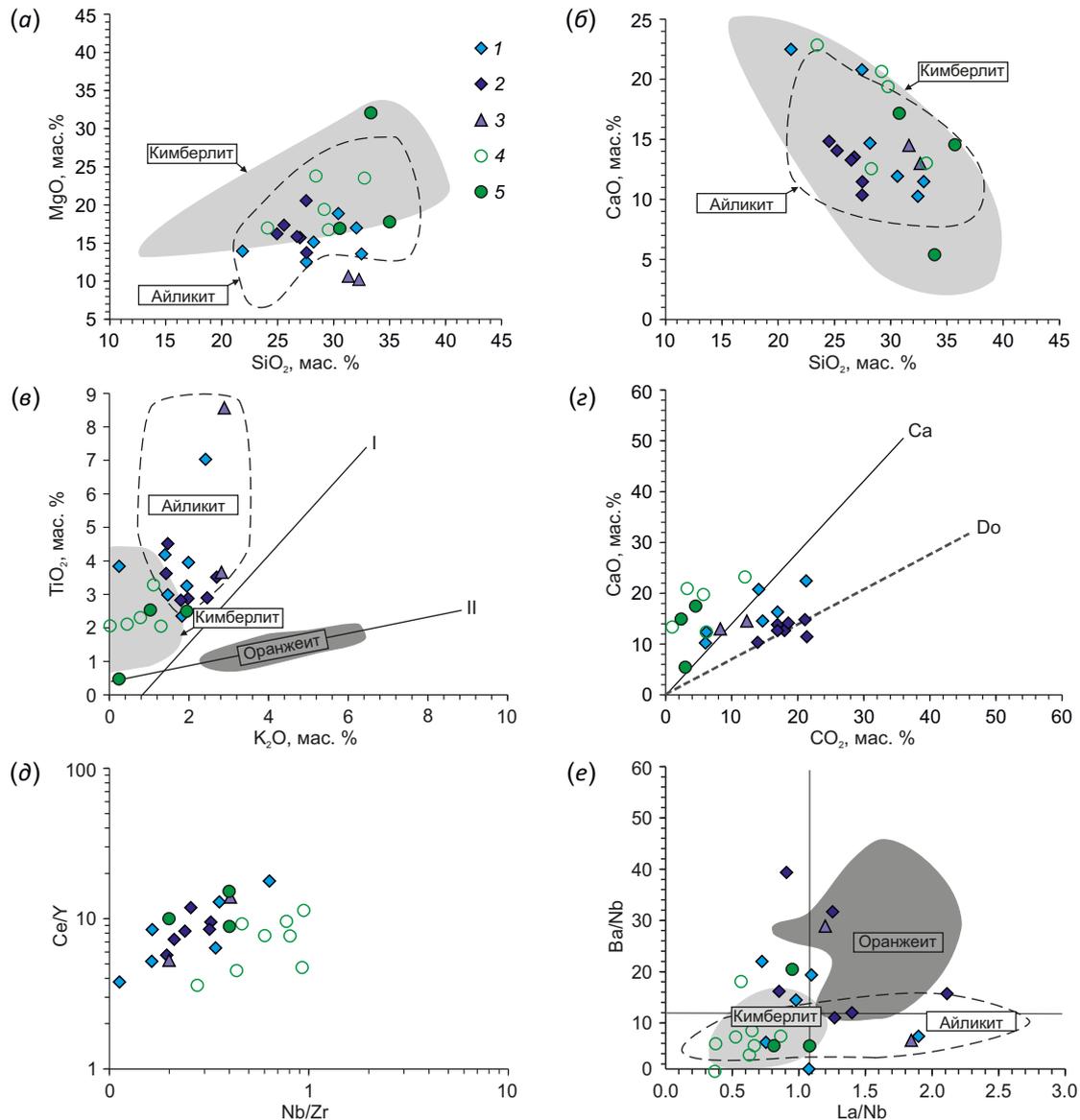


Рис. 1. Вариации петрогенных оксидов (а-с) и соотношения Ce/Y – Nb/Zr (д), Ba/Nb – La/Nb (е) в щелочно-ультрамафических дайках Урикско-Ийского грабена.

1 – айликиты; 2 – доломитизированные айликиты; 3 – мелаайликиты; 4 – беспироксеновые пикриты; 5 – кимберлит и флогопит-пироксеновые пикриты. Линии на фрагменте (с): Ca – кальцита, Do – доломита. Поля ультрамафических лампрофиров (айликитов), кимберлитов I и II (оранжеитов) групп выделены по работам [Tappe et al., 2008, 2014; Becker, Le Roex, 2006].

Fig. 1. Variations of petrogenetic oxides (a–c) and Ce/Y – Nb/Zr (d), Ba/Nb – La/Nb (e) ratios in alkaline ultramafic dykes of the Urik-Iya graben.

1 – aillikites; 2 – dolomitized aillikites; 3 – mela-aillikites; 4 – pyroxene-free picrites; 5 – kimberlite and phlogopite-pyroxene picrites. The lines in fragment (c): Ca – calcite, Do – dolomite. Fields of ultramafic lamprophyres (aillikites), kimberlites of groups I and II (orangeites) are identified according to [Tappe et al., 2008, 2014; Becker, Le Roex 2006].

Таблица 1. Результаты определения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в кальците щелочно-ультрамафических даек
Table 1. Results of determination of the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values in calcite from alkaline ultramafic dykes

Порода	Образец	$\delta^{13}\text{C}$, ‰ _(VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ _(VSMOW)
Ярминская надинтрузивная (жильная) зона			
Айликиты	26/18	-5.6	13.7
	53-06/18	-4.7	13.9
	70/18	-5.1	13.4
Мелаайликит	97/18	-4.0	12.2
	531-06/18	-4.6	12.9
Кимберлит	51/18	-5.3	12.8
Большетагнинский карбонатитовый массив			
Беспироксеновый пикрит, центр дайки, прорывающей карбонатит	132/19	-6.6	12.1
Беспироксеновый пикрит, эндоконтактная зона дайки на контакте с карбонатитом	114/19	-3.9	11.8

Особенности химического состава пород. По содержанию петрогенных окислов изученные породы относятся к щелочно-ультрамафическому ряду с преобладанием К над Na. В целом породы характеризуются низким содержанием SiO_2 и высоким – CaO; беспироксеновые пикриты и кимберлит содержат повышенное количество MgO, а айликиты и мелаайликиты – TiO_2 и K_2O (рис. 1, а–в).

На диаграммах MgO – SiO_2 и CaO – SiO_2 точки айликитов, мелаайликитов, кимберлита и пикритов попадают в область перекрытия полей ультрамафических лампрофиров и кимберлитов группы I, тогда как на диаграммах TiO_2 – K_2O и Ba/Nb – La/Nb точки пикритов и кимберлита располагаются обособленно от точек айликитов и мелаайликитов, в поле кимберлитов (рис. 1, а–в, е). Соотношение CaO – CO_2 (рис. 1, г) указывает на преимущественное вхождение CaO в лампрофирах в состав кальцита и постмагматического доломита, тогда как в пикритах концентраторами Ca выступают в значительной мере, наряду с кальцитом, силикатные минералы (диопсид, монтичеллит, андрадит). На диаграмме Ce/Y – Nb/Zr беспироксеновые пикриты обособляются от ультрамафических лампрофиров, кимберлита и флогопит-пироксеновых пикритов (рис. 1, д). Соотношение Ba/Nb – La/Nb (рис. 1, е) показывает, что точки пикритов в основном находятся в поле кимберлитов группы I, а точки айликитов и мелаайликитов отражают большой разброс значений, попадая в поле ультрамафических лампрофиров, в область перекрытия и за пределы выделяемых полей [Tappe et al., 2008, 2014; Becker, Le Roex, 2006].

Изотопный состав углерода и кислорода кальцитов. Значения $\delta^{13}\text{C}$ в кальците, отобранном из даек и жил беспироксеновых пикритов Большетагнинского массива, ультрамафических лампрофиров, щелочных слюдяных пикритов и кимберлита Ярминской надинтрузивной зоны, составляют от -3.9 до -6.6 ‰. Такие значения полностью отвечают составу углерода большинства карбонатов кимберлитов и находятся в

пределах поля изотопного состава карбонатов мантии [Deines, 2002; Demeny et al., 1998; Giuliani et al., 2014; и др.]. В то же время кальцит даек демонстрирует повышенные значения $\delta^{18}\text{O}$ – от +11.8 до +13.9 ‰ по сравнению с мантийным карбонатом (табл. 1). Наиболее близкие к мантийному карбонату значения $\delta^{13}\text{C}$ -3.9 ‰ и $\delta^{18}\text{O}$ +11.8 ‰ отмечаются в беспироксеновом пикрите из эндоконтактной зоны дайки на контакте с карбонатитом Большетагнинского массива.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

На диаграмме (рис. 2) показан ожидаемый изотопный состав C и O первично-магматических карбонатов («мантийный карбонатный бокс») и модифицированные изотопные составы, отражающие син- и постмагматические процессы [Demeny et al., 1998; Wilson et al., 2007; Giuliani et al., 2014; и др.]. Кроме собственных результатов, на диаграмму вынесены данные изотопного состава $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ для карбонатных минералов айликитов, карбонатитов Белозиминского, Большетагнинского и Среднезиминского массивов, которые демонстрируют две группы точек [Vladykin et al., 2004; Doroshkevich et al., 2016; Ponomarchuk et al., 2022]. Первая группа сосредоточена в «мантийном карбонатном боксе». Вторая группа образует тренд точек, отражающий изменения изотопного состава кислорода и в меньшей степени – углерода. Максимальное отклонение от мантийных значений $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ показывают образцы карбонатитов Большетагнинского массива.

Изотопный состав углерода в кальците всех исследованных образцов дайково-жильного комплекса сохраняет значения $\delta^{13}\text{C}$, близкие к таковым в первично-магматических карбонатах щелочно-карбонатитовых массивов Урикско-Ийского грабена и во многих других ультрамафических лампрофирах, кимберлитах, карбонатитах [Vladykin et al., 2004; Doroshkevich et al., 2016; Demeny et al., 1998; Giuliani et al., 2014; Ponomarchuk et al., 2022]. Наибольший разброс значений $\delta^{13}\text{C}$ отмечен между двумя образцами Большетагнинского

массива: центром дайки беспироксенового пикрита ($\delta^{13}\text{C} = -6.6 \text{ ‰}$) и эндоконтактовой зоной дайки на контакте с кальцитовым карбонатитом ($\delta^{13}\text{C} = -3.9 \text{ ‰}$). Вариации $\delta^{13}\text{C}$ от -6.6 до -3.9 ‰ в кальците из эндоконтактовой зоны жилы, залегающей среди доломит-анкеритовых карбонатитов, вероятнее всего, обусловлены реакциями изотопного обмена при повышенных температурах между карбонатом пикритового расплава и карбонатитом в период становления Большетагнинского массива.

В то же время кальцит щелочно-ультрамафических даек обогащен ^{18}O по сравнению с карбонатом мантийного бокса, Белозиминского и Среднезиминского массивов. Точки изотопного состава кальцита из даек и жил Ярминской зоны располагаются вдоль горизонтальной оси $\delta^{18}\text{O}$, на значительном удалении от точек кальцитов из карбонатитов и айликитов Белозиминского комплекса. Свой вклад в изотопный состав кислорода могут вносить многие факторы: метасоматический флюид с высоким потенциалом H_2O и CO_2 в позднемагматическую стадию; обогащение водорастворимыми минералами, такими как карбонаты щелочных металлов и хлориды [Kamenetsky M.B. et al., 2004; Kamenetsky V.S. et al., 2007]; реагирование расплава с ксеногенным материалом вмещающих пород;

влияние грунтовых вод или выветривание [Keller, Hoefs, 1995]. На син- и постмагматической стадии эволюции кимберлитов и карбонатитов, согласно представлениям [Wilson et al., 2007; Giuliani et al., 2014], изотопные составы C и O в карбонатах существенно зависят от отношения $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$. Модельные расчеты [Wilson et al., 2007] показывают, что $\delta^{18}\text{O}$ в пределах от $+6$ до $+9 \text{ ‰}$ соответствует их формированию в кимберлитовом расплаве при температуре более 750 °C , а кальциты с более высоким $\delta^{18}\text{O}$ – от $+9$ до $+14 \text{ ‰}$ – сформировались при участии дейтерических (магматических охлажденных) флюидов на поздней стадии при субсолидусных температурах ($500\text{--}100 \text{ °C}$). Таким образом, повышенные $\delta^{18}\text{O}$ всегда сопряжены со снижением температуры формирования пород. В изученных нами образцах постмагматическое гидротермальное изменение низкотемпературными флюидами подтверждено серпентинизацией и отчасти – хлоритизацией.

Изотопный состав кислорода в кальците даек Большетагнинского массива характеризуется менее выраженным смещением точек вправо относительно мантийного карбонатного бокса. Образование этого кальцита также можно связать с субсолидусными температурами чуть ниже 500 °C . Однако карбонаты Большетагнинского массива и беспироксеновый пикрит, в

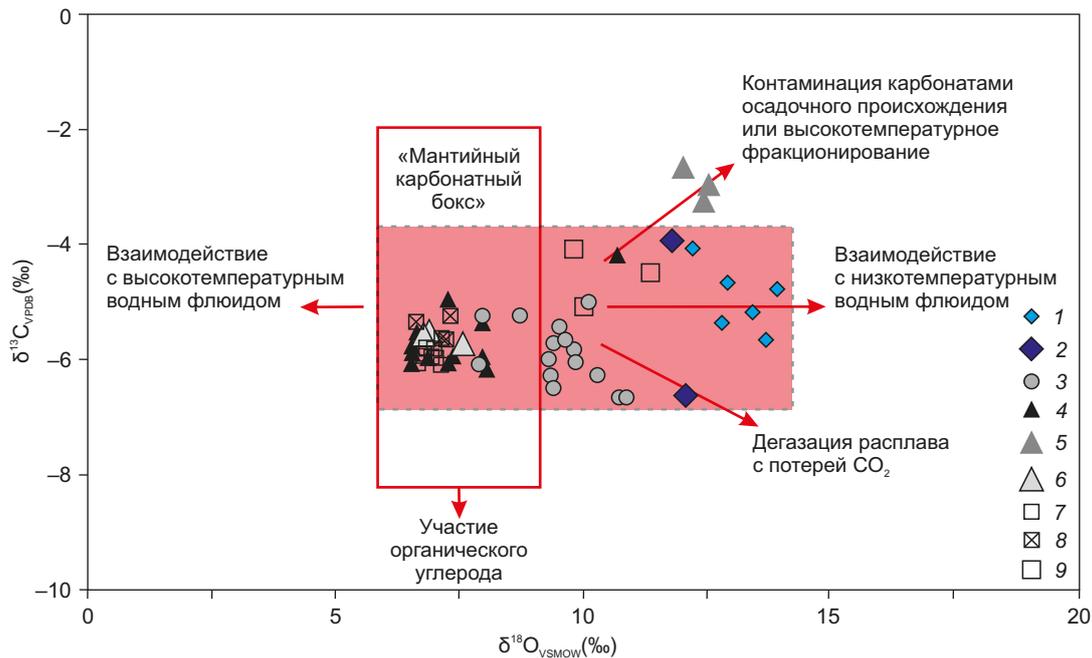


Рис. 2. Диаграмма $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ для карбонатов щелочно-ультрамафических пород и карбонатитов на основе работ [Giuliani et al., 2014; Tappe et al., 2006] с дополнениями авторов.

Розовое поле – кальцит щелочно-ультрамафических даек: 1 – Ярминской зоны, 2 – Большетагнинского массива, 3 – кальцит айликитов Белозиминского массива [Ponomarthuk et al., 2022]. Карбонаты массивов: 4 – Белозиминского, 5 – Большетагнинского, 6 – Среднезиминского по [Vladykin et al., 2004]. Карбонаты Белозиминского массива: 7 – кальцит, 8 – доломит, 9 – анкерит по [Doroshkevich et al., 2016].

Fig. 2. Diagram $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ for carbonates of alkaline ultramafic rocks and carbonatites based on [Giuliani et al., 2014; Tappe et al., 2006] with modifications.

Pink field – calcite of alkaline ultramafic dikes: 1 – Yarma zone, 2 – Bolshetagninsky massif, 3 – calcite from aillikites of the Beloziminsky massif, after [Ponomarthuk et al., 2022]. Carbonates of massifs: 4 – Beloziminsky, 5 – Bolshetagninsky, 6 – Sredneziminsky, after [Vladykin et al., 2004]. Carbonates of the Beloziminsky massif: 7 – calcite, 8 – dolomite, 9 – ankerite, after [Doroshkevich et al., 2016].

отличие от лампрофиров и кимберлитов Ярминской зоны, обогащены ^{13}C , из-за чего точки изотопных составов этих образцов на диаграмме направлены в сторону высокотемпературного фракционирования углерода мантийных карбонатов [Tappe et al., 2006]. Тренд высокотемпературного фракционирования совпадает с трендом контаминации осадочными карбонатами [Giuliani et al., 2014]. Чтобы выяснить, какой из факторов оказывает большее влияние на изотопный состав углерода в карбонате даек, требуются дополнительные исследования.

Имеющиеся изотопно-геохимические данные, полученные для даек со значениями $\epsilon\text{Nd(T)}$ от +2.9 до +4.5 [Savelyeva et al., 2022], указывают на то, что жильные тела беспироксеновых пикритов Большетагнинского массива и дайки ультрамафических лампрофиров, кимберлита, щелочных слюдяных пикритов Ярминской зоны образовались из единого мантийного источника, близкого по изотопным характеристикам к источнику OIB. В то же время варьирующиеся отношения $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ от 0.7025 до 0.7059 указывают на неоднородность изотопного состава мантийного источника или разную степень контаминации мантийных расплавов материалом верхней континентальной коры. Анализ данных предыдущих исследований (кимберлитов, ультрамафических лампрофиров, карбонатитов) и наши данные $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ щелочно-ультрамафических даек показали, что мантийные карбонаты не сохраняют высокотемпературный первично-магматический изотопный состав кислорода, но более устойчивы в отношении изотопов углерода. Обогащение ^{18}O связано с участием дейтерических магматических флюидов, отделившихся от расплавов на син- и постмагматической стадии формирования, и сопряжено со снижением температуры формирования кальцитов. Не исключены и другие сценарии, способные привести к обогащению ^{18}O , как, например, контаминация мантийных расплавов коровыми породами или флюидами. Однако вблизи выходов щелочно-ультрамафических даек вмещающие породы, богатые карбонатом, не обнаружены.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования изотопного состава кальцита в кимберлите, флогопит-пироксеновых пикритах, ультрамафических лампрофиров Ярминской надинтрузивной (жильной) зоны и в беспироксеновых пикритах Большетагнинского карбонатитового массива выявили достаточно однородные значения $\delta^{13}\text{C}$, соответствующие мантийному источнику и близкие к таковым в породах щелочно-карбонатитовых массивов Урикско-Ийского грабена. В то же время кислород кальцита из пород дайково-жильного комплекса характеризуется более высокими значениями $\delta^{18}\text{O}$ по сравнению с карбонатами щелочно-карбонатитовых массивов, что отражает высокую степень изменения карбоната даек в постмагматическую стадию при участии дейтерических флюидов.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность рецензентам, замечания которых способствовали существенному улучшению качества статьи.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

8. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Becker M., Le Roex A.P., 2006. Geochemistry of South African on- and off-Craton, Group I and Group II Kimberlites: Petrogenesis and Source Region Evolution. *Journal of Petrology* 47 (4), 673–703. <http://doi.org/10.1093/petrology/egi089>.

Deines P., 2002. The Carbon Isotope Geochemistry of Mantle Xenoliths. *Earth-Science Reviews* 58 (3–4), 247–278. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00064-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00064-8).

Demeny A., Ahijado A., Casillas R., Vennemann T.W., 1998. Crustal Contamination and Fluid/Rock Interaction in the Carbonatites of Fuerteventura (Canary Islands, Spain): a C, O, H Isotope Study. *Lithos* 44 (3–4), 101–115. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00050-4](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00050-4).

Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Izbrodin I.A., Ripp G.S., Khromova E.A., Posokhov V.F., Travin A.V., Vladykin N.V., 2016. Stable Isotope Composition of Minerals in the Belaya Zima Plutonic Complex, Russia: Implications for the Sources of the Parental Magma and Metasomatizing Fluids. *Journal of Asian Earth Sciences* 116, 81–96. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.11.011>.

Ernst R.E., Buchan K.L., Hamilton M.A., Okrugin A.V., Tomshin M.D., 2000. Integrated Paleomagnetism and U-Pb Geochronology of Mafic Dikes of the Eastern Anabar Shield Region, Siberia: Implications for Mesoproterozoic Paleolatitude of Siberia and Comparison with Laurentia. *The Journal of Geology* 108 (4), 381–401. <https://doi.org/10.1086/314413>.

Giuliani A., Phillips D., Kamenetsky V.S., Fiorentini M.L., Farquhar J., Kendrick M.A., 2014. Stable Isotope (C, O, S) Compositions of Volatile-Rich Minerals in Kimberlites: A Review. *Chemical Geology* 374–375, 61–83. <http://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.03.003>.

Gladkochub D.P., Pisarevsky S.A., Donskaya T.V., Ernst R.E., Wingate M.T., Söderlund U., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Hamilton M.A., Hanes J.A., 2010. Proterozoic Mafic Magmatism in Siberian Craton: An Overview and Implications for Paleocontinental Reconstruction. *Precambrian Research*

183 (3), 660–668. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.02.023>.

Kamenetsky M.B., Sobolev A.V., Kamenetsky V.S., Maas R., Danyushevsky L.V., Thomas R., Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., 2004. Kimberlite Melts Rich in Alkali Chlorides and Carbonates: A Potent Metasomatic Agent in the Mantle. *Geology* 32 (10), 845–848. <https://doi.org/10.1130/G20821.1>.

Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Sharygin V.V., Faure K., Golovin A.V., 2007. Chloride and Carbonate Immiscible Liquids at the Closure of the Kimberlite Magma Evolution (Udachnaya-East Kimberlite, Siberia). *Chemical Geology* 237 (3–4), 384–400. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.07.010>.

Keller J., Hoefs J., 1995. Stable Isotopes Characteristics of Recent Natrocarbonatites from Oldoinyo Lengai. In: Bell K., Keller J. (Eds), *Carbonatite Volcanism*. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 113–123. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79182-6_9.

Kukharensko A.A., Orlova M.P., Bulakh A.G., Bagdasarov E.A., Rimskaya-Korsakova O.M., Nefedov E.I., Il'inskiy G.A., Sergeev A.S., Abakumova N.B., 1965. Caledonian Complex of Ultrabasic, Alkaline Rocks and Carbonatites of the Kola Peninsula and North Karelia. *Nedra, Moscow*, 772 p. (in Russian) [Кухаренко А.А., Орлова М.П., Булах А.Г., Багдасаров Э.А., Римская-Корсакова О.М., Неведов Е.И., Ильинский Г.А., Сергеев А.С., Абакумова Н.Б. Каледонский комплекс ультраосновных, щелочных пород и карбонатитов Кольского полуострова и Северной Карелии. М.: Недра, 1965. 772 с.].

Ponomarchuk V., Zhmodik S., Ashchepkov I., Belyanin D., Kiseleva O., Pyryaev A., 2022. The C and O Isotopes in Calcites from Aillikites and Carbonatites of the Beloziminsky and Tomtor Massifs (Siberia, Russia). In: *Proceedings of the EGU General Assembly Conference Abstracts* (April 19–30, 2021). EGU21-12681. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-12681>.

Savelyeva V.B., Danilova Yu.V., Letnikov F.A., Demonteyeva E.I., Yudin D.S., Bazarova E.P., Danilov B.S., Sharygin I.S., 2022. Age and Melt Sources of Ultramafic Dykes and Rocks of the Bolshetagninskii Alkaline Carbonatite Massif (Urikiya Graben, SW Margin of the Siberian Craton). *Doklady Earth Sciences* 505, 452–458. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22070169>.

Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Heaman L.M., Kjarsgaard B.A., Romer R.L., Stracke A., Joyce N., Hoefs J., 2006. Genesis of

Ultramafic Lamprophyres and Carbonatites at Aillik Bay, Labrador: A Consequence of Incipient Lithospheric Thinning beneath the North Atlantic Craton. *Journal of Petrology* 47 (7), 1261–1315. <https://doi.org/10.1093/petrology/egl008>.

Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Kjarsgaard B.A., 2005. Integrating Ultramafic Lamprophyres into the IUGS Classification of Igneous Rocks: Rationale and Implications. *Journal of Petrology* 46 (9), 1893–1900. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi039>.

Tappe S., Foley S.F., Kjarsgaard B.A., Romer R.L., Heaman L.M., Stracke A., Jenner G.A., 2008. Between Carbonatite and Lamproite–Diamondiferous Torngat Ultramafic Lamprophyres Formed by Carbonate-Fluxed Melting of Cratonic MARID-Type Metasomes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72 (13), 3258–3286. <http://doi.org/10.1016/j.gca.2008.03.008>.

Tappe S., Kjarsgaard B.A., Kurszlaukis S., Nowell G.M., Phillips D., 2014. Petrology and Nd-Hf Isotope Geochemistry of the Neoproterozoic Amon Kimberlite Sills, Baffin Island (Canada): Evidence for Deep Mantle Magmatic Activity Linked to Supercontinent Cycles. *Journal of Petrology* 55 (10), 2003–2042. <http://doi.org/10.1093/petrology/egu048>.

Vladykin N.V., 2009. Potassium Alkaline Lamproite-Carbonatite Complexes: Petrology, Genesis, and Ore Reserves. *Russian Geology and Geophysics*. 50 (12), 1119–1128. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.11.010>.

Vladykin N.V., Morikiyo T., Miyazaki T., Tsybukova S.S., 2004. Geochemistry of Carbon and Oxygen Isotopes in Carbonatites of Siberia and Mongolia and Some Geodynamic Consequences. In: *Deep-Seated Magmatism, Its Sources, and Their Relation with Plume Processes*. Proceedings of the IV International Seminar. Publishing House of IG SB RAS, Irkutsk, p. 89–106 (in Russian) [Владыкин Н.В., Морикие Т., Миядзаки Т., Цыпукова С.С. Геохимия изотопов углерода и кислорода карбонатитов Сибири и Монголии и некоторые геодинамические следствия // Глубинный магматизм, его источники и их связь с плюмовыми процессами: Труды IV международного семинара. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2004. С. 89–106].

Wilson M.R., Kjarsgaard B.A., Taylor B., 2007. Stable Isotope Composition of Magmatic and Deuteric Carbonate Phases in Hypabyssal Kimberlite, Lac de Gras Field, Northwest Territories, Canada. *Chemical Geology* 242 (3–4), 435–454. <http://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.05.002>.