

## КАРБОНАТИТОПОДОБНАЯ ПОРОДА ДАЙКИ ИЗ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ АЙХАЛ, СРАВНЕНИЕ С КАРБОНАТИТАМИ УЧАСТКА НОМОХТООХ (Прианабарье)

С.И. Костровицкий<sup>1,2</sup>, Д.А. Яковлев<sup>1</sup>, Л.Ф. Суворова<sup>1</sup>, Е.И. Демонтерова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт геохимии СО РАН им. А.П. Виноградова, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1А, Россия

<sup>2</sup>Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

В алмазоносной трубке Айхал из Алакит-Мархинского поля Якутской кимберлитовой провинции (ЯКП) обнаружена дайка, представленная породой, по составу имеющая сходство с карбонатитами. Мелкозернистая порода существенно карбонатного состава (доломит, кальцит), насыщенная тонкопластинчатым флогопитом, содержит типичные для карбонатитов минералы — монацит, бадделеит, пирохлор. По высокому содержанию и распределению некогерентных элементов порода заметным образом отличается от кимберлитов и соответствует переходной разновидности от кимберлитов к карбонатитам. Уровень концентрации некогерентных элементов в породе из дайки тр. Айхал значительно ниже (в 3—5 раз), чем в карбонатитовых брекчиях, выполняющих трубки Староречинского кимберлитового поля ЯКП (участок Номохтоох). Приведено сравнение составов аксессуарных редкоэлементных минералов из породы дайки тр. Айхал и карбонатитовых брекчий Номохтооха. Предполагается, что высокая концентрация некогерентных элементов в карбонатитоподобной породе, обусловившая кристаллизацию аксессуарных минералов, обязана процессам дифференциации кимберлитового расплава-флюида, а повышенные изотопные отношения Sr указывают на преобразование породы гидротермально-метасоматическими процессами. Полученные данные о составе карбонатитоподобной породы не могут служить аргументом наличия генетической связи между кимберлитами тр. Айхал и классическими карбонатитами. Для северных полей ЯКП вопрос генетической связи кимберлитов и карбонатитов остается открытым.

*Кимберлит, карбонатит, бадделеит, пирохлор, монацит, редкоэлементный состав, Айхал, Номохтоох*

## CARBONATITE-LIKE ROCK IN A DIKE OF THE AIKHAL KIMBERLITE PIPE: COMPARISON WITH CARBONATITES OF THE NOMOKHTOOKH SITE (*Anabar area*)

S.I. Kostrovitsky, D.A. Yakovlev, L.F. Suvorova, E.I. Demonterova

A dike of rock similar in composition to carbonatites has been found in the Aikhal diamondiferous pipe of the Alakit–Markha field of the Yakutian kimberlite province (YaKP). The fine-grained rock of essentially carbonate composition (dolomite and calcite) rich in thin-platy phlogopite contains minerals typical of carbonatites: monazite, baddeleyite, and pyrochlore. In the high content and distribution of incompatible elements the rock differs significantly from kimberlites and is transitional from kimberlites to carbonatites. The content of incompatible elements in this rock is 3–5 times lower than that in carbonatite breccias of the pipes in the Staraya Rechka kimberlite field of the YaKP (Nomokhtookh site). The compositions of accessory trace-element minerals from the Aikhal dike rock and the Nomokhtookh carbonatite breccias are compared. An assumption is made that the high contents of incompatible elements in the carbonatite-like rock, which caused the crystallization of accessory minerals, are due to the differentiation of kimberlite melt/fluid. The high Sr isotope ratios indicate that the rock altered during hydrothermal and metasomatic processes. The obtained data on the composition of the carbonatite-like rock cannot serve as an argument for the genetic relationship between the Aikhal kimberlites and typical carbonatites. The genetic relationship between kimberlites and carbonatites in the northern fields of the YaKP remains an open issue.

*Kimberlite, carbonatite, baddeleyite, pyrochlore, monazite, trace element composition, Aikhal, Nomokhtookh*

## ВВЕДЕНИЕ

Вопрос генетических взаимоотношений между кимберлитовыми и карбонатитовыми породами широко обсуждается в литературе [Von Eckermann, 1967; Ковальский и др., 1969; Dawson, Hawthorne, 1973; Мальков, 1975; Mitchell, 1979, 1986, 2007; Vostor, Boyd, 1981; Лапин, 1986; Фролов и др., 2005; Agashev et al., 2008; Safonov et al., 2011; Tarpe et al., 2013]. Кимберлиты принадлежат семейству вулканических ультраосновных пород существенно оливинового состава, насыщенных летучими, в основном

CO<sub>2</sub> [Mitchell, 1986]. Карбонатиты представляют собой интрузивные и экструзивные породы, входящие в состав сложных интрузивных комплексов вместе с ультраосновными и щелочными породами, сложенные более чем на 50 мод. % карбонатами [Геологический словарь, 1978; Bell, 1989]. Карбонатиты содержат редкометаллную минерализацию и отличаются исключительно высокой концентрацией некогерентных элементов [Hoernle et al., 2002; Al-Ani, Sarapää, 2013; Trofanenko et al., 2014; Moore et al., 2015; Edahbi et al., 2018]. Кимберлитовые и карбонатитовые проявления вулканизма в пределах Сибирской платформы пространственно разделены — первые тяготеют к центральным областям, а вторые — к краевым (рис. 1).

Хотя кимберлиты относятся к ультраосновным породам, обязательное присутствие в них карбонатной составляющей (преимущественным образом представленной кальцитом), относительно высокая концентрация некогерентных элементов являются аргументами существования определенного их сходства с карбонатитами. Содержание карбонатной составляющей в якутских кимберлитах варьирует в широком диапазоне (от 5—10 до 80—90 %, в среднем составляя 23.6 % [Костровицкий, 1986, табл. 51]). Высокое содержание CaCO<sub>3</sub> в кимберлитах отдельных кимберлитовых тел явилось основанием для ряда исследователей использовать для них термины «кальцитовый кимберлит» или «карбонатитовый кимберлит» [Mitchell, 1970; Мальков, 1975; Skinner, Clement, 1979]. Представления о происхождении карбонатной компоненты, ее роли в образовании кимберлитов существенно менялись со временем — от непризнания ее магматической природы [Ковальский, 1963; Бобриевич и др., 1964; Милашев, 1974] до заключения о ее ключевом значении в формировании кимберлитовых пород [Russell et al., 2012]. Ряд исследователей называют карбонатную компоненту карбонатитовой [Лапин, Маршинцев, 1984; Agashev et al., 2008; Weiss et al., 2009; Safonov et al., 2011; Kamenetsky, Yaxley, 2015].

В высокоалмазоносной трубке-месторождении Айхал нами обнаружена дайка, выполненная породой существенно карбонатного состава (рис. 2). Высокий уровень некогерентных элементов и наличие таких аксессуарных минералов, как монацит, бадделит и пироклор указывает на возможную принадлежность данной породы к карбонатитам. Задачами настоящей статьи являлось — дать описание состава этой породы, провести сравнение ее состава с типичными кимберлитами и карбонатитами, обсудить вопросы, имеется ли генетическая связь между кимберлитовыми и карбонатитовыми породами и можно ли называть карбонатную составляющую кимберлитов карбонатитовой составляющей? В качестве типичной карбонатитовой породы нами взяты карбонатитовые брекчии, выполняющие трубки участка Номохтоох Староречинского кимберлитового поля (Прианабарье), описанные в ряде публикаций [Маршинцев, 1974; Чернышева, Костровицкий, 1981; Костровицкий и др., 2007]. Пространственное совмещение этих трубок с кимберлитовыми трубками, уровень их изученности обусловили приоритетность этого выбора. Дополнительно нами изучен химический состав кальцита и доломита (табл. 1s)\*, флогопита (табл. 2s), монацита (табл. 7s), сульфидов (табл. 4s), а также микроэлементный состав бадделита (табл. 5s, 8s) и апатита (табл. 3s, 6s) из этих трубок.

В статье использована следующая аббревиатура названий минералов [Whitney, Evans, 2010]: Srp — серпентин, Phl — флогопит, Cal — кальцит, Dol — доломит, Ap — апатит, Spl — шпинель, Mag — магнетит, Py — пирит, Prt — пирротин, Ptl — пентландит, Mnz — монацит, Bdy — бадделит, Pcl — пироклор, Ol — оливин, Bar — барит, Ilm — ильменит.

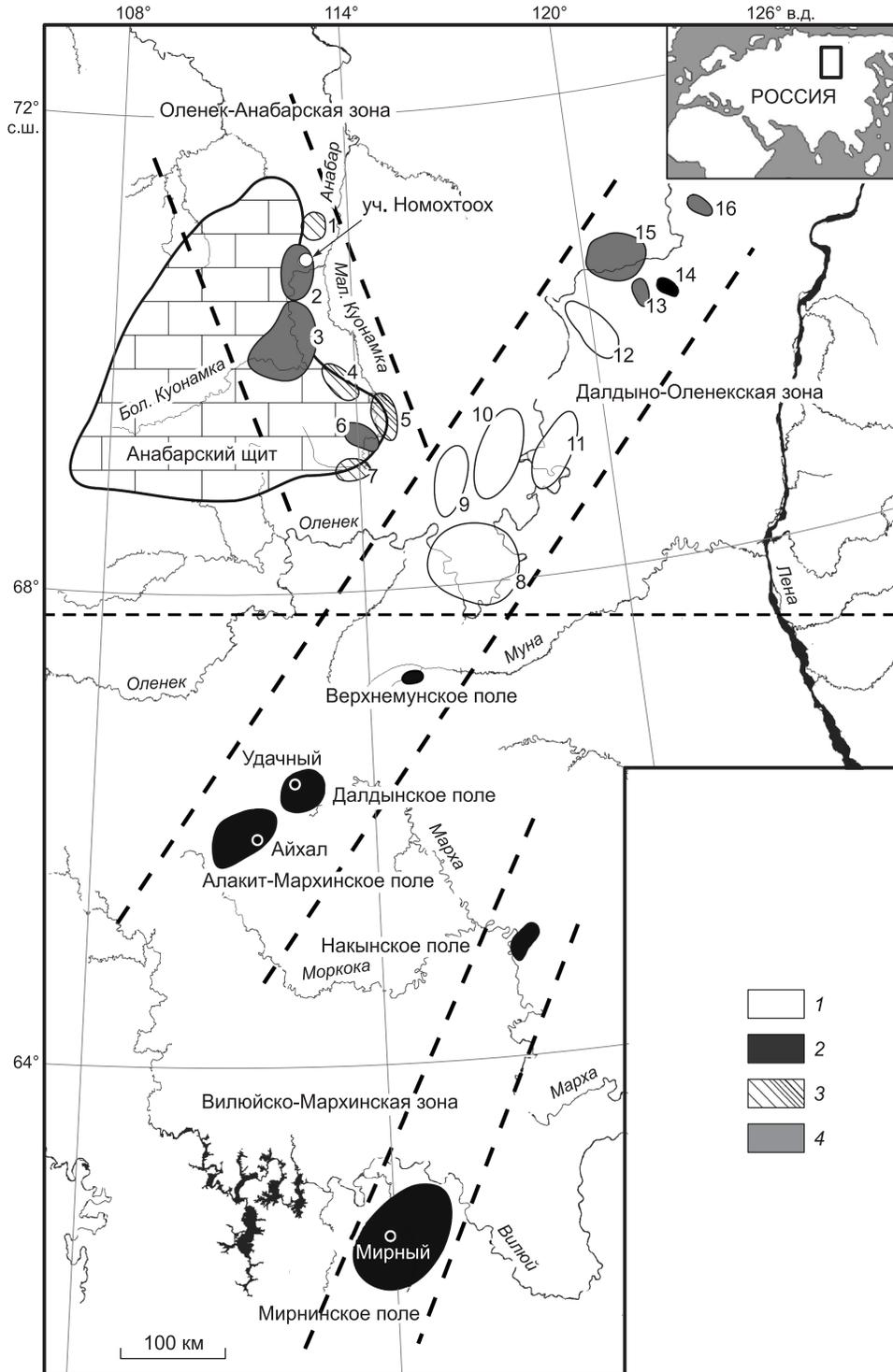
## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРУБКЕ АЙХАЛ

Детальное описание геологического строения тр. Айхал дано в публикациях А.Д. Харькива с соавторами [1995, 1997, 1998]. До карьерной обработки трубка представляла собой крутопадающее тело дайково-трубочной формы с.-в. простирания (азимут 63°), протяженностью на поверхности по длинной оси 510 м при ширине 50—120 м. С поверхности трубка была почти полностью перекрыта трапповым sillом. Соотношение длинной оси трубки к короткой изменяется от 6:1 на поверхности до 29:1 на глубине 240 м [Харькив и др., 1998]. Трубка Айхал является примером многофазного трехканального тела, которое на поверхности представляло собой единое тело, глубже на отметках 100—374 м разделено перемычкой карбонатных пород на два рудных тела, а еще глубже на отметке 520 м снова разделяется на два тела: юго-западное и северо-восточное. Карьерными работами установлено участие в строении трубки четырех дотрубочных даек мощностью от 0.25 до 2—3 м [Харькив, 1975]. Хотя возраст формирования непосредственно тр. Айхал не определялся (из-за отсутствия перовскитов и цирконов в кимберлитах), но по аналогии с возрастными всеми трубочными тел южных алмазоносных полей ЯКП, в том числе Алакит-Мархинского поля, в котором трубка расположена, ее возраст принимается как девон-карбонный.

Существуют разные взгляды на внутреннее строение тр. Айхал. По А.Д. Харькиву с соавторами [1997], в сложении трубки приняли участие туфы, переотложенные осадочно-вулканогенные породы и

\* <http://sibran.ru/journals/Supplem.rar>

кимберлитовые брекчии трех фаз внедрения. Ряд исследователей [Владимиров и др., 1981] наряду с туфами и кимберлитовыми брекчиями выделили также и порфиновые кимберлиты (когерентный кимберлит) массивной текстуры. Когерентный кимберлит слагает отдельные тела в виде линз, апофиз в пределах развития кимберлитовых брекчий, а иногда и во вмещающих породах, включения типа «ким-



**Рис. 1.** Карта расположения кимберлитовых полей в Якутской провинции.

Штриховыми линиями показаны три линейные зоны, к которым приурочены поля. Кимберлитовые поля: 1 — Орто-Ыаргыньское, 2 — Староречинское, 3 — Ары-Мастахское, 4 — Дюкенское, 5 — Лучаканское, 6 — Берегиндинское, 7 — Куранахское, 8 — Чомурдахское, 9 — Западно-Укукитское, 10 — Восточно-Укукитское, 11 — Огонер-Юряхское, 12 — Мерчимденское, 13 — Молодинское, 14 — Толоупское, 15 — Куойкское, 16 — Хорбусуонское. 1—4 — возраст полей (млн лет): 1 — 429—408, 2 — 369—344, 3 — 228—217, 4 — 175—147. На врезке — район исследования.



**Рис. 2. Фотография образца карбонатитоподобной породы из дайки тр. Айхал.**

берлит в кимберлите» в туфовых разновидностях. Субгоризонтальные элементы залегания тел когерентного кимберлита являются характерной особенностью для юго-западной половины трубки. Вулканокластические кимберлиты представляют собой серую, сильно карбонатизированную мелкообломочную породу, в разной степени (5—20 %) насыщенную ксеногенным материалом вмещающих пород. Иногда отмечается сортировка обломочного материала по

крупности. В туфовидных кимберлитах встречаются округлые включения более ранней фазы внедрения порфирированного кимберлита. Все разновидности кимберлита, слагающие тр. Айхал, характеризуются относительно высокой степенью карбонатизации. Дайка кимберлита карбонатитоподобного состава мощностью до 20 см была обнаружена в юго-западной части трубки ориентировочно на глубине 200 м от поверхности при подземной ее отработке. Порода дайки Srp-Phl-Cal-Dol состава, имеющая тонкозернистую структуру, афировую текстуру (рис. 2), практически лишена макро-, микрокрист Ol (и псевдоморфоз вторичных минералов по ol) и содержит акцессорные Ap, Mnz, Pcl, Bdy, бетафит и сульфиды. Модальный минеральный состав породы — 5 % Srp, 10 Cal, 35 Phl, 50 % Dol. Как правило, зерна доломита и флогопита характеризуются идиоморфной и субидиоморфной формой, кальцит и серпентин — ксеноморфной.

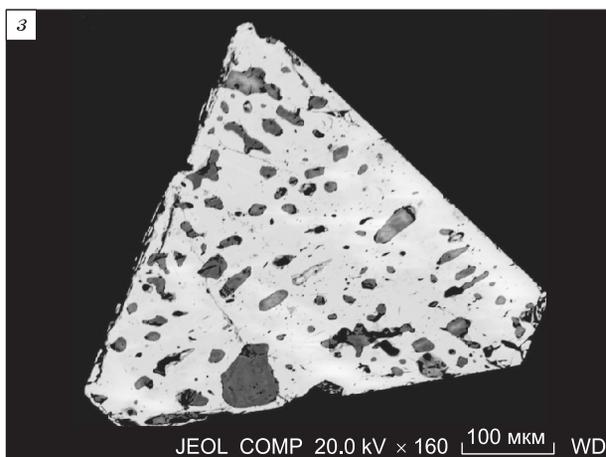
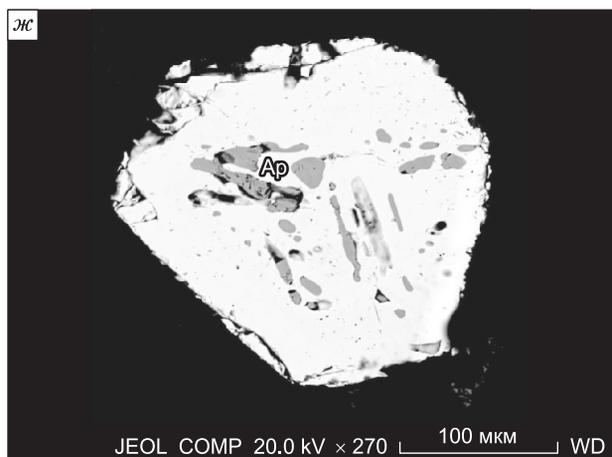
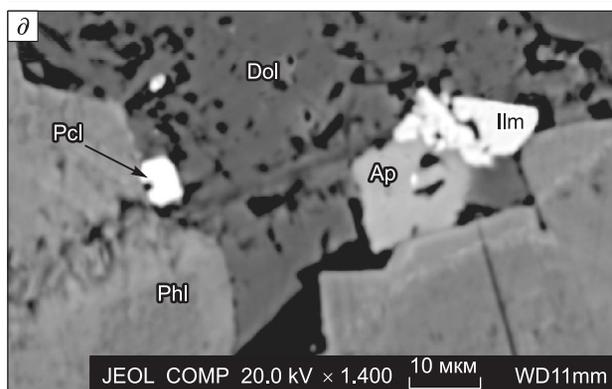
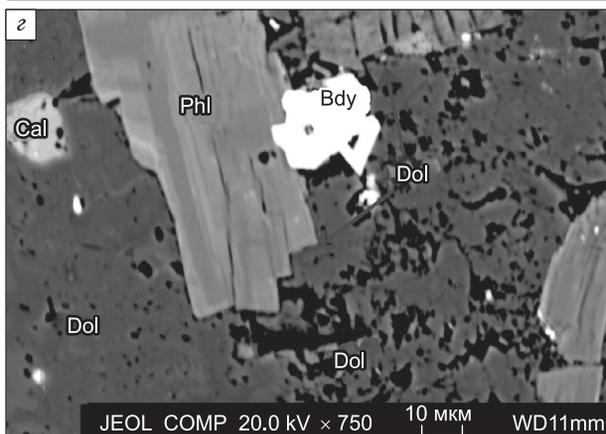
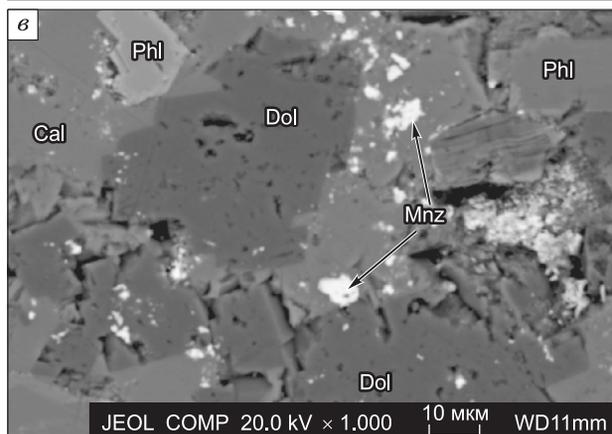
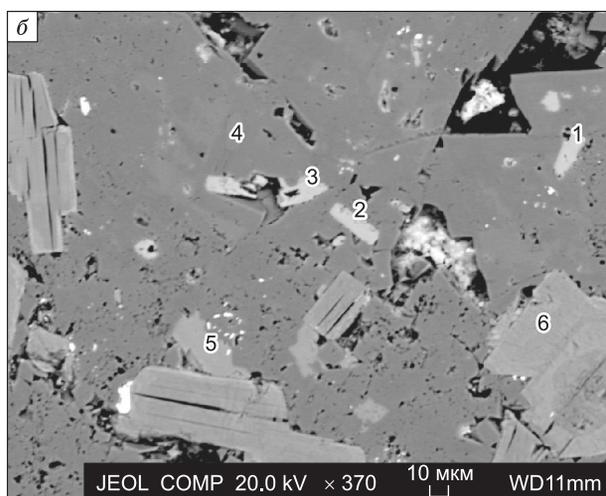
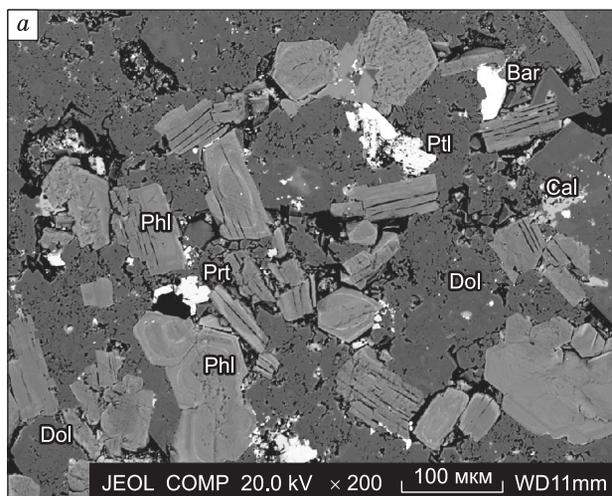
### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КАРБОНАТИТОВЫХ ТРУБКАХ ПРИАНАБАРЬЯ

На северо-западе Якутской провинции в пределах Староречинского (участок Номохтоох) и Орто-Наргынского полей (Прианабарье) наряду с кимберлитовыми были обнаружены трубки, в которых доминирует карбонатитовый материал. На относительно небольшой площади участка Номохтоох вскрыто шурфами более 50 тел, сложенных карбонатитовыми и кимберлитовыми брекчиями. Детальное петрографическое описание пород из этих трубок приведено в монографиях В.К. Маршинцева [1974], В.В. Ковальского с соавторами [1969], Бородина с соавторами [1976], а также в ряде статей [Чернышева, Костровицкий, 1981, 1998]. U-Pb возраст кимберлитовых и карбонатитовых трубок Прианабарья, в том числе из участка Номохтоох, определенный по перовскитам и цирконам, соответствует поздней юре и варьирует в интервале 150—161 млн лет [Barton et al., 1995; Griffin et al., 1999; Sun et al., 2014, 2018; Жмодик и др., 2015].

Нами был изучен материал из трубок участка Номохтоох (см. рис. 1), в котором на площади 30—35 км<sup>2</sup> было обнаружено 46 карбонатитовых и 7 кимберлитовых трубок округлой, овальной, неправильной формы, большинство из которых по максимальному размеру не превышает 100—150 м [Маршинцев, 1974]. Вмещающими породами трубок участка Номохтоох являются верхнепротерозойские и кембрийские терригенно-карбонатные отложения. Карбонатитовые брекчии представляют собой породы серого, буровато-серого цвета, насыщенные ксеногенным материалом вмещающих пород (известняки, реже песчаники, отдельные ксенолиты пород кристаллического фундамента). Основная масса карбонатитовой брекчии представлена в основном тонкозернистым Cal (до 70—85 %) и Dol (7—28 %), содержащего зерна Ap (1—5 %), Phl (0.15—4.4 %), Mag (0.1—3.7 %) [Маршинцев, 1974]. В качестве акцессорных минералов находятся Bdy, Pcl, Ptm, циркон, колумбит, торит. Данные минералы характеризуются преимущественным образом обломочной угловатой формой, реже — субидиоморфной (рис. 3,

**Рис. 3. Микрофотографии в режиме COMPO (BSE).**

*a* — обр. 05-480, основная масса карбонатитоподобной породы из тр. Айхал; *b* — обр. 05-480, основная масса карбонатитоподобной породы Phl-Dol состава из тр. Айхал: 1—3 — Ap; 4 — Dol; 5, 6 — Phl, составы минералов приведены в табл. 1s, 2s, 3s; *в* — обр. 13-49, зерна монацита в основной массе карбонатитоподобной породы, приуроченные к выделениям Cal; *г* — обр. 05-480, основная масса карбонатитоподобной породы, сросток бадделеита с кристаллом флогопита; *д* — обр. 05-480, основная масса карбоната Srp-Phl-Dol состава с микрозернами пироклора, пикроильменита и апатита; *е* — обр. 13-49, включение зерна бетафита (из группы пироклора) в кристалле Phl, основная масса породы имеет Cal-Phl-Dol состав; *ж*, *з* — зерна пироклора из тяжелой фракции карбонатитовых брекчий участка Номохтоох со множеством включений апатита разной ориентировки в разных доменах кристаллов (*ж* — зерно № 57, *з* — зерно № 8).



жс, з; рис. 7s). Доломит также чаще обнаруживается в виде мелких угловатых обломков, погруженных в крипнокристаллический Cal. По минеральному составу карбонатитовые брекчии участка Номохтоох относятся к доломит-кальцитовому типу.

## МЕТОДИКА АНАЛИТИЧЕСКИХ РАБОТ

Аналитические работы по определению петрогенных оксидов в образцах методом РФА, микроэлементов методом ICP-MS и электронно-зондовые исследования проведены в ЦКП «Изотопно-геохимические исследования» ИГХ СО РАН, г. Иркутск.

Содержание петрогенных оксидов было определено методом РФА на спектрометре СРМ-25 (предел обнаружения 10 г/т). Измерения выполнены при напряжении 30 кВ, токе 40 мА. Рентгеновская трубка с Rh-анодом. Образцы гомогенизировали с помощью сплавления с флюсом — метаборатом лития ( $\text{LiBO}_2$ ) в индукционной печи в тиглях из стеклоглуглера при температуре 1100 °С. Соотношение проба:флюс — 1:2. Перед проведением пробоподготовки определяются потери летучих при температуре 950 °С. Для калибровки использовали стандартные образцы горных пород — СГД-1А (габбро), СИ-2 (карбонатит), JB-1 (базальт), JP-1 (перидотит) (Япония).

Концентрации редких элементов в породах определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP MS) на спектрометре Elan 6100 DRS в ИГХ СО РАН, аналитик: Н.Н. Пахомова. Использовано кислотное разложение проб. Точность многократно повторяемых анализов на стандарте составляла < 5 % для Sr, La, Ce, Nd, Sm, Tb, Ho, Er, Yb и 5—15 % для Y, Zr, Pr, Eu, Gd, Dy, Tm, Lu, Hf. Пределы обнаружения 0.01—0.03 г/т. Содержания Na, K, Li, Rb, Cs определяли методом пламенной фотометрии (предел обнаружения 1 г/т), Ni, Cr, V, Zn, Cu — атомно-адсорбционным методом (предел обнаружения 10 г/т).

Количественный элементный анализ минералов-спутников алмаза, минералов основной массы кимберлитов проведен на электронно-зондовом микроанализаторе Superprobe JXA-8200 фирмы Jeol с пятью спектрометрами с волновой дисперсией при следующих аналитических условиях: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток пучка электронов 20 нА, время счета импульсов на пике 10 с и фона — по 5 с с каждой стороны от линии (аналитик Л.Ф. Суворова). Морфология, зональность и количественное соотношение минералов в кимберлитах изучены на растровом электронном микроскопе по изображениям в обратнорассеянных электронах (BSE) при различных увеличениях.

Химический состав минералов определяли методом РСМА на микроанализаторе JXA-8200, Jeol Ltd. (Япония) с применением спектрометров с волновой дисперсией и фирменного матобеспечения (аналитик Л.Ф. Суворова). Анализируемыми образцами служили полированные аншлифы породы. Условия возбуждения и регистрации аналитических сигналов следующие: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток пучка электронов 20 нА, его диаметр 1—10 мкм в зависимости от исследуемого объекта, время счета импульсов на пике линии 10 с, фон измерялся с двух сторон от пика линии — по 5 с. Коррекция аналитического сигнала на матричные эффекты осуществлялась ZAF-методом. Определялись следующие элементы: F, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu, Sr, Ba, Nb, La, Ce, Nd, Pr, Zr, Y, Th, пределы обнаружения 0.05—0.10 мас. %. В качестве образцов сравнения использовали природные и синтетические минералы, аттестованные как лабораторные образцы в ИГМ СО РАН, г. Новосибирск. При измерении состава очень мелких зерен бетафита (<3 мкм) произошел захват вмещающей матрицы, поэтому пересчитанный анализ следует считать полуколичественным. Морфология, зональность и количественное соотношение минералов в кимберлитах с различными структурными особенностями изучены на растровом электронном микроскопе по изображениям в обратнорассеянных электронах (BSE) при различных увеличениях.

Изотопные исследования Sr и Nd выполнены в Центре коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН. Изотопные отношения Nd, Sr,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  и  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  определены с добавлением трассеров  $^{149}\text{Sm}$ — $^{150}\text{Nd}$  и  $^{84}\text{Sr}$ — $^{85}\text{Rb}$  к истертому образцу. Выделение Sr, Rb и PЗЭ из растворенных в смеси кислот навесок образцов осуществляли на катионообменных колонках объемом 2 мл, заполненных смолой BioRed AG 50Wx8-mesh. Очистку стронция выполняли на этих же колонках во вторую ступень работы. Разделение Sm от Nd проводили на колонках, заполненных смолой LnSpec [Pin, Zaldugui, 1997]. Изотопные отношения Sr, Rb, Nd и Sm измеряли на многоколлекторном твердофазном масс-спектрометре Finnigan MAT262. В период измерений значения изотопного стандарта стронция NBS 987 составили  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710268 \pm 0.000011$ , JNd-1  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512087 \pm 0.000005$ .

## ХИМИЧЕСКИЙ И МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ

В таблицах 1 и 2 приведены составы кимберлитов из тр. Айхал (в том числе из карбонатитоподобной дайки), а также карбонатитовых брекчий и вулканокластического кимберлита из участка Номохтоох Староречинского поля. Соответствующие графики (рис. 4) демонстрируют особенности составов из

Таблица 1. Химический состав кимберлитов и карбонатитоподобной породы из тр. Айхал и карбонатитовых брекчий из участка Номохтоох Староречинского поля (мас. %)

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	06-42	06-76	06-76	05-480 дайка	05-480	13-49 дайка	01-361	Среднее (17)	Среднее (9)	78-1565	78-1558	90-67
SiO <sub>2</sub>	26.72	29.11	25.89	13.64	33.17	10.72	25.58	26.41	17.02	13.64	7.89	25.1
TiO <sub>2</sub>	0.45	0.61	0.64	0.35	0.29	0.47	0.55	0.4	0.34	0.17	0.18	1.18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.78	2.27	2.9	4.8	2.15	3.97	1.66	2.2	2.68	3.47	1.33	2.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.75	5.72	3.81	2.96	3.65	2.65	4.5	3.32	2.68	Не опр.	Не опр.	Не опр.
FeO	0.89	1.91	1.32	1.03	1.57	1.0	1.53	1.1	1.24	7.88*	13*	7.39*
MnO	0.06	0.03	0.04	0.09	0.05	0.04	0.07	0.07	0.07	0.88	1.04	0.19
MgO	28.52	24.73	17.12	23.5	33.81	16.35	24.71	25.05	17	9.78	9.5	22.34
CaO	14.69	12.38	22	19.16	5.52	28.14	17.3	16.92	24.45	28.38	28.14	14.55
Na <sub>2</sub> O	0.23	0.22	0.2	0.2	0.21	0.35	0.18	0.13	0.12	1.2	0.28	0.06
K <sub>2</sub> O	0.506	1.019	1.45	2.19	0.5	1.59	0.47	0.32	1.16	1.19	0.51	0.6
H <sub>2</sub> O	11.28	11.83	9.03	3.36	12.8	2.49	9.28	9.24	5.07	1.66	2.24	12.02
CO <sub>2</sub>	11.14	8.32	15.46	25.65	5.99	28	13.34	13.72	27.4	28.16	30.8	12.78
F	0.35	0.6	0.62	0.26	0.65	Не опр.	0.24	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.67	0.95	0.63	0.53	0.46	1.02	0.93	0.43	0.31	1.83	3.55	0.42
SO <sub>3</sub>	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	3.25	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.
Сумма	100.04	99.7	101.11	97.72	100.82	100.04	100.34	99.31	99.54	98.24	97.95	99.33

Примечание. 1—9 — из тр. Айхал; здесь и в табл. 2: 2 — крупнопорфировый кимберлит, 3 — мелкопорфировый кимберлит, 5 — кимберлитовая брекчия; 10—12 — из участка Номохтоох: трубки — 10 — Токио, 11 — Прима, 12 — Джо-северная; 1—7, 10—12 — данные авторов; 8, 9 — усредненные данные из [Илупин и др., 1978]; 8 — центр трубки, 9 — северо-восток трубки. В скобках — число анализов. Здесь и далее: Не опр. — содержание не определялось.

\* Общее железо в форме FeO.

дайки по сравнению с составом кимберлитов из тр. Айхал и карбонатитовых брекчий из участка Номохтоох. В целях представительности информации мы использовали в графиках наряду с собственными и литературные данные по составу кимберлитов из тр. Айхал [Илупин и др., 1978] и карбонатитовых брекчий из участка Номохтоох [Маршинцев, 1974]. Кимберлиты из тр. Айхал относятся к высоко-Мг

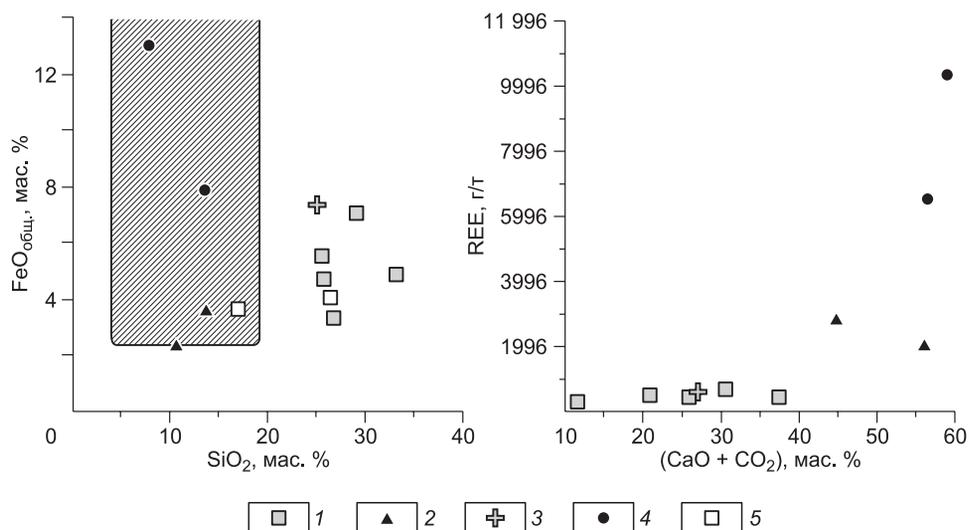


Рис. 4. Графики состава кимберлитов и карбонатитов из тр. Айхал и участка Номохтоох Староречинского поля (см. табл. 1).

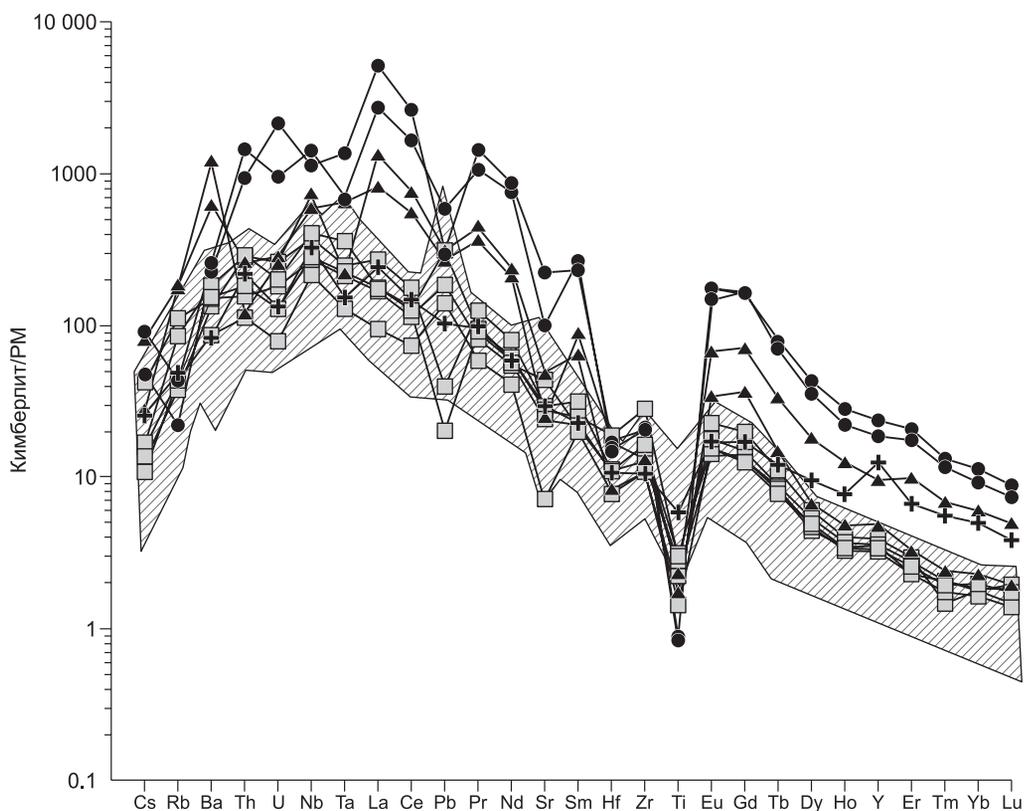
1 — кимберлиты из тр. Айхал; 2 — карбонатитоподобная порода из дайки тр. Айхал; 3 — кимберлитовые брекчий из трубки участка Номохтоох Староречинского поля; 4 — карбонатитовые брекчий из трубок участка Номохтоох Староречинского поля; 5 — средние составы кимберлитов из центра и северо-восточной части тр. Айхал, по данным [Илупин и др., 1978]. Заштрихованное поле — область значений состава для карбонатитовых брекчий, по В.К. Маршинцеву [1974].

Таблица 2. Микроэлементный состав кимберлитов и карбонатитоподобной породы из тр. Айхал и карбонатитовых брекчий из участка Номохтоох Староречинского поля (г/т)

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	06-42	06-76	06-76	01-361	05-480	05-480	13-49	78-1565	78-1558	90-67
						дайка				
Sc	10.9	19	10.2	He опр.	11.8	22	24	He опр.	He опр.	He опр.
V	54	68	79	62	98	54	79	32	50	89
Cr	1144	2235	1052	843	944	691	1013	35	32	662
Co	32	100	61	62	68	45	25	10	19	60
Ni	797	1411	1046	1363	1232	1431	366	12	63	705
Cu	4.16	43	418	11	136	112	94	8	7	62
Zn	17	28	24	42	19	43	7.5	He опр.	He опр.	80
Rb	27	54	71	24	27	113	118	27	14	31
Sr	502	583	920	618	152	1016	528	2104	4679	624
Y	14.8	16	16	18	15	22	44	108	85	57
Zr	185	316	174	143	122	121	148	235	240	118
Nb	202	290	191	263	153	531	423	1012	808	234
Cs	0.25	0.39	0.97	0.3	0.36	0.64	1.85	2.1	1.1	0.59
Ba	1079	1280	1060	936	604	8574	4370	1807	1591	580
La	124	126	119	193	67	961	582	1929	3636	171
Ce	229	241	209	325	135	1398	1016	3032	4832	271
Pr	23	24	21	32	14.9	115	93	269	364	25
Nd	79	84	74	110	56	326	285	1029	1187	81
Sm	9.7	11.2	9.4	14	8.9	29	40	118	103	10.2
Eu	2.34	2.98	2.47	3.5	2.40	5.2	10.4	27	23	2.61
Gd	7.4	8.1	7.1	10.8	7.7	25	39	88	90	9.28
Tb	0.83	0.87	0.82	1.1	0.94	1.09	3.34	7.8	7.0	1.19
Dy	3.20	3.62	3.00	4.1	3.35	4.54	12.3	29	24	6.43
Ho	0.49	0.56	0.52	0.6	0.51	0.72	1.88	4.2	3.3	1.16
Er	1.01	1.22	1.01	1.3	1.13	1.45	4.35	9.1	7.7	2.94
Tm	0.12	0.14	0.14	0.1	0.13	0.17	0.47	0.9	0.8	0.38
Yb	0.73	0.80	0.81	0.8	0.88	1.02	2.65	5.0	4.1	2.20
Lu	0.094	0.13	0.12	0.1	0.12	0.13	0.34	0.6	0.5	0.26
Hf	3.40	5.8	3.49	3.4	2.41	2.57	5.3	5.3	4.6	3.36
Ta	8.4	13.4	7.9	9.2	4.77	8.2	24	25	50	5.62
Pb	1.44	22	13.2	2.8	10.0	23	19	42	21	7.30
Th	15	24	13.0	24.0	9.5	10.1	22	122	79	18.36
U	2.71	4.23	3.82	5.5	1.66	5.5	6.0	20	45	2.78
REE	482	504	448	696	299	2868	2090	6548	10282	585
La/Yb	170	158	147	241	76	942	220	386	887	78
La/Nb	0.61	0.43	0.62	0.73	0.44	1.81	1.38	1.91	4.5	0.73
Nb/Ta	24.05	21.64	24.18	28.59	32.08	64.76	17.63	40.48	16.16	41.64
Zr/Hf	54.41	54.48	49.86	42.06	50.62	47.08	27.92	44.34	52.17	35.12
Pb/Ce	0.05	0.22	0.22	0.05	0.15	0.51	0.76	4.2	1.11	0.12

Примечание. 1—5 — кимберлит из тр. Айхал; 6, 7 — карбонатитоподобная порода из дайки в тр. Айхал; 8, 9 — карбонатит из трубок участка Номохтоох; 10 — кимберлит из трубки участка Номохтоох.

петрохимическому типу с относительно низким содержанием FeO, TiO<sub>2</sub> и характеризуются значительной изменчивостью состава, что связано с широкой вариацией содержания карбонатной составляющей, представленной в основном Cal (20—70 % CaCO<sub>3</sub>). Карбонатитоподобная порода из дайки отличается низким содержанием SiO<sub>2</sub> (10.7—13.6 мас. %), повышенным содержанием K<sub>2</sub>O (1.5—2.2 мас. %) и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0.5—1.0 мас. %) и высоким содержанием карбонатной компоненты, представленной Cal и преимуще-



**Рис. 5. Спайдер-диаграммы распределения некогерентных элементов для кимберлитов и карбонатитоподобной породы из тр. Айхал и из карбонатитовых брекчий участка Номохтоох Староречинского поля (см. табл. 2).**

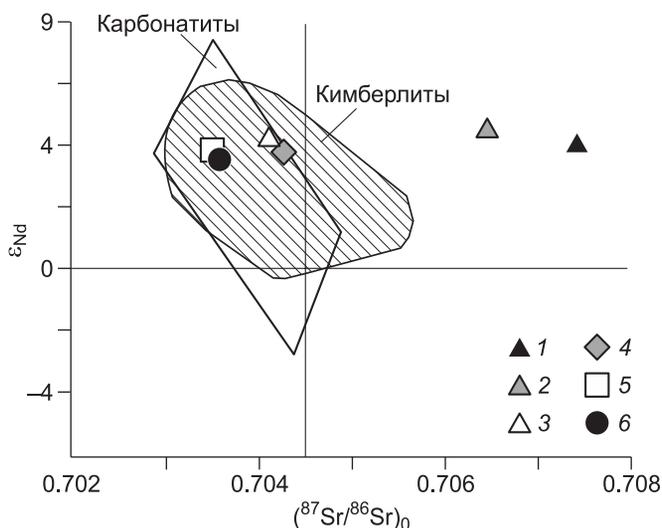
Заштрихованное поле — область составов для алмазонасных кимберлитов ЯКП. Усл. обозн. см. на рис. 4.

ственно Dol (до 80 %  $\text{CaCO}_3 + \text{CaMgCO}_3$ ). Карбонатитовая брекчия из участка Номохтоох характеризуется [Маршинцев, 1974; см. табл. 31, среднее из 36 анализов] низким содержанием  $\text{SiO}_2$  (4.3—19.2, среднее 12.2 мас. %) и высоким содержанием карбонатной составляющей ( $\text{CaO} + \text{CO}_2$  варьирует в пределах 24.2—69.4; среднее 55.3 мас. %) и отличается от кимберлитов тр. Айхал относительно высоким содержанием  $\text{FeO}_{\text{общ.}}$  (среднее 9.96 мас. %) и низким  $\text{MgO}$  (2.4—13.4, среднее 9.66 мас. %). Полученные нами данные по составу карбонатитовых брекчий из участка Номохтоох (см. табл. 1) согласуются с литературными, приведенными выше.

По уровню содержания некогерентных элементов карбонатитоподобная порода из дайки тр. Айхал (табл. 2, рис. 5) значительно (на полпорядка) превосходит кимберлиты из этой же трубки и занимает на спайдер-диаграммах промежуточное положение между кимберлитами тр. Айхал и карбонатитовыми брекчиями участка Номохтоох. Заметным образом отличаются и значения показательных отношений некогерентных элементов ( $\text{La/Yb}$ ,  $\text{La/Nb}$ ,  $\text{Nb/Ta}$ ,  $\text{Zr/Hf}$ ,  $\text{Pb/Ce}$ ), рассчитанные для кимберлитов и карбонатитоподобной породы из тр. Айхал и карбонатитовых брекчий из участка Номохтоох (см. табл. 2, рис. 8s). Заметим, что кимберлитовая брекчия из участка Номохтоох (пр. № 90-67, тр. Джо-северная) как по уровню содержания некогерентных элементов, так и по значению показательных отношений (см. табл. 2) не отличается от типичных кимберлитов.

### Sr-Nd ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ

Нами изучена изотопная Sr-Nd систематика для двух образцов карбонатитоподобной породы из дайки тр. Айхал. При анализе результатов мы использовали данные по изотопным характеристикам кимберлитов из тр. Айхал и карбонатитовых брекчий из участка Номохтоох, полученные ранее [Костровицкий и др., 2007]. Изотопные характеристики кимберлитов из тр. Айхал и карбонатитовых брекчий в координатах  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 - \epsilon_{\text{Nd}}$  (рис. 6) отвечают таковым для изученных ранее [Smith, 1983; Mitchell, 1986; Tainton, McKenzie, 1994] кимберлитов типа I из разных провинций мира, все 4 точки изотопных



**Рис. 6.** График изотопных составов в координатах  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 - \epsilon_{\text{Nd}}$  для кимберлитов и карбонатитоподобной породы из тр. Айхал и карбонатитовых и кимберлитовых брекчий участка Номохтоох.

1—3 — тр. Айхал: 1 — обр. 05-480; 2 — обр. 13-49, 3 — обр. 01-361; 4 — тр. Джо-северная, обр. 90-67; 5 — тр. Ан-41п, обр. 78-1610; 6 — тр. Токио, обр. 78-1565; поля составов для кимберлитов и карбонатитов, по [Nowell et al., 2004; Donnelly et al., 2012].

составов попадают в область слабоистощенной мантии. Расположение фигуративных точек Sr-Nd состава для карбонатитоподобной породы из дайки тр. Айхал на графике смещено в сторону осадочно-морского репера, в то время как значение  $\epsilon_{\text{Nd}}$ , так же как и для кимберлита из трубки (пр. 01-361), попадает в об-

ласть слабоистощенной мантии. Смещение изотопного состава Sr обусловлено проявлением широкого по масштабу наложенного процесса карбонатизации, характерного не только для тр. Айхал, но и для всех кимберлитовых полей ЯКП [Костровицкий и др., 2007].

### СОСТАВ МИНЕРАЛОВ

Карбонатитоподобная жила сложена породой Srp-Cal-Phl-Dol состава. Акцессорная минерализация представлена Ap, Spl, Mnz, Vdy, Pcl и сульфидами. В качестве включения в макрокристе Phl встречено зерно бетафита (высоко-Ti минерал из группы пирохлора, обогащенный PЗЭ). Состав основных породообразующих минералов из карбонатитоподобной жилы тр. Айхал приведен в табл. 1s, 2s, 3s.

Доломит образует зерна идиоморфной и субидиоморфной формы размером от 10×10 до 200 мкм), иногда агрегаты зерен (см. рис. 3, а). Содержание SrO в Dol широко варьирует от 0.01 до 0.17 мас. %, что свидетельствует о его кристаллизации в относительно широком температурном интервале. Кальцит неравномерно распределен в основной массе породы, иногда образует каймы вокруг кристаллов Phl. Редкие идиоморфные кристаллы Cal характеризуются высокой концентрацией SrO (до 0.81 мас. %), в то время как в доминирующем cal содержание SrO <0.1 мас. %. Один из самых распространенных минералов карбонатитоподобной породы Phl образует в основной массе идиоморфные и субидиоморфные кристаллы размером от 30×20 до 200×80 мкм (см. рис. 3, а); для него типичны широкие вариации таких оксидов, как TiO<sub>2</sub> (0.7—1.8 мас. %), FeO (3.0—14.1 мас. %), BaO (0.2—2.6 мас. %). Широкий диапазон содержания оксидов, скорее всего, связан с крайней неоднородностью состава кристаллизующегося расплава.

Апатит образует в матрице существенно доломитового состава неравномерно рассеянные идиоморфные призматические кристаллы размером от 10×5 до 40×10 мкм (см. рис. 3, б), иногда сростки и двойники кристаллов. Из акцессорных минералов карбонатитовой ассоциации в тр. Айхал заметное распространение получил только Mnz размером 1—5 мкм (рис. 3, в), реже встречается Vdy от 25×10 до 50×50 мкм (см. рис. 3, г). Пирохлор (Na,Ca,TR,U,Th,Zr)<sub>2</sub>(Nb,Ta,Ti)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>(F,OH) образует кристаллы размером 7×5 мкм и обнаруживается чрезвычайно редко (см. рис. 3, д). В кристалле Phl обнаружено включение бетафита ((Ca,Na,U)<sub>2</sub>(Ti,Nb,Ta)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>(OH) — минерал группы Pcl округлой формы размером 2×2 мкм (рис. 3, е). По сравнению с Pcl бетафит обогащен TiO<sub>2</sub> (до 14.2 мас. %) и PЗЭ (до 16 мас. %) (табл. 3). К сожалению, из-за малых размеров зерен корректный анализ всех перечисленных выше минералов осуществить не удалось. Приведенные в таблицах 3, 4; 4s, 7s анализы для Mnz, Pcl и бетафита включают в себя оксиды (например, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO), которые частично или полностью принадлежат матрице (состоящей из Cal, Phl, Srp), окружающей эти минералы. Барит встречается в виде редких микрокристаллов идиоморфной формы табличатой формы размером от 2—3 до 30×15 мкм (см. рис. 3, а).

Сульфиды представлены микрозернами пирита, пентландита и халькопирита (см. рис. 3, а, е) размером от 1 до 15 мкм субидиоморфной, реже неправильной формы. Наряду с преимущественно рассеянным типом распределения сульфиды образуют отдельные скопления — микрозонки размером 100×10 мкм. Сульфидная минерализация развивается в матрице основной массы карбонатитоподобной породы в межзерновых интерстициях между Phl и Dol. Состав сульфидов представлен в табл. 4s.

Типоморфные акцессорные минералы (Pcl, Vdy и Ap) были отобраны из тяжелой фракции карбонатитовых брекчий участка Номохтоох — из трубок Джо-южная, Джо-северная, Последняя, Аномалия

Таблица 3. Состав микрозерен пироклора и бетафита из основной массы жильного кимберлита (мас. %)

Компонент	1	2	3	4	5
SiO <sub>2</sub>	—	—	4.24	4.36	4.05
TiO <sub>2</sub>	1.2	1.1	14.22	13.76	13.62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	0.59	0.63	0.67
FeO	0.84	0.87	3.57	3.64	3.70
MgO	0.7	1.7	10.82	10.95	10.99
CaO	20.8	20.7	10.49	11.30	11.47
Na <sub>2</sub> O	6.7	6.2	0.23	0.20	0.26
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.06	0.44	0.52	0.55
F	0.26	0.23	0.43	0.25	0.23
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	58.34	57.78	20.05	20.39	20.25
ZrO <sub>2</sub>	1.55	1.65	0.67	0.71	0.62
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.62	0.95	1.42	1.45	1.23
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.70	4.11	7.80	7.49	7.15
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.8	0.45	4.61	4.59	4.57
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.24	0.36	1.35	1.24	1.30
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.1	<0.1	0.89	0.89	0.63
ThO <sub>2</sub>	0.33	0.21	0.54	0.63	0.56
SO <sub>3</sub>	0.11	0.14	0.49	0.43	0.45
Сумма	93.29	93.69	82.92	83.83	82.65

Примечание. 1, 2 — зерна пироклора из обр. 05-480; 3—5 — зерна бетафита размером < 5 мкм из обр. 13-49.

Таблица 4. Состав макрокристаллов пироклора из карбонатитовых брекчий участка Номохтоох Староречинского поля (мас. %)

№ пробы	TiO <sub>2</sub>	FeO	CaO	Na <sub>2</sub> O	F	SrO	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ThO <sub>2</sub>	Сумма
z7	0.87	<0.05	12.55	9.86	2.6	3.68	68.42	0.72	1.42	0.28	<0.1	<0.1	100.4
z8	1.38	<0.05	11.27	9.74	2.46	4.76	66.79	1.5	2.15	0.31	<0.1	<0.1	100.36
z9	0.96	<0.05	10.92	9.93	2.42	4.41	67.08	1.29	2.51	0.5	0.2	0.14	100.36
z10	1.45	0.1	16.23	8.87	2.37	0.69	69.86	0.07	0.36	<0.1	<0.1	<0.1	100.00
z11	0.77	0.07	11.47	9.69	2.53	3.89	67.77	1.07	2.3	0.38	<0.1	<0.1	99.94
z12	1.43	0.14	16.18	8.94	2.61	0.77	69.58	0.12	0.74	0.15	<0.1	<0.1	100.66
z14	1.06	0.11	15.75	9.17	2.31	0.92	69.00	0.36	0.49	0.13	<0.1	0.63	99.93
z15	0.84	<0.05	11.66	9.78	2.44	3.51	67.62	1.13	2.49	0.42	0.18	<0.1	100.07
z30	1.33	0.05	16.03	8.99	2.52	1.08	69.45	<0.1	0.42	0.14	<0.1	0.24	100.25
z31	0.77	0.09	13.36	9.67	2.59	3.01	67.62	0.89	1.44	0.27	<0.1	<0.1	99.71
z32	0.67	<0.05	11.07	9.85	2.57	5.08	67.55	1.11	2.00	0.16	0.11	<0.1	100.17
z33	0.91	<0.05	10.55	9.95	2.61	4.42	67.06	1.45	2.55	0.45	0.25	0.13	100.13
z34	1.03	0.08	10.72	9.78	2.63	5.75	65.89	1.25	2.31	0.29	0.19	<0.1	99.92
z35	0.6	<0.05	10.6	9.89	2.71	4.84	67.72	1.39	1.95	0.26	<0.1	0.2	100.19
z36	0.85	0.13	15.00	9.32	2.56	1.41	69.19	0.31	0.92	0.24	<0.1	<0.1	99.93
z37	1.01	0.12	12.31	9.34	2.55	3.14	68.58	1.03	1.89	0.25	0.25	<0.1	100.47
z38	0.76	0.1	14.41	9.4	2.73	2.03	69.55	0.48	0.99	0.07	<0.1	0.18	100.7

Примечание. Пробы из трубок: z7—z15 — Джо-северная (обр. кимберлита 90-63), z30—z38 — Джо-южная (обр. карбонатита 90-62). ZrO<sub>2</sub>, как правило, < 0.06 мас. %; HfO<sub>2</sub>, как правило, < 0.1 мас. %.

35 (см. рис. 3, ж, з; 7s; табл. 6s, 6, 8s). Пироклор находится в виде идиоморфных, иногда округло-угловатых обломков кристаллов октаэдрической формы размером от 0.2 до 1.5 мм серого, буровато-серого, красно-коричневого цвета. Бадделит образует пластинчатые кристаллы (чаще в виде их обломков) светло-коричневого, темно-бурого цвета размером от 0.3 до 2.0 мм. Апатит представлен идиоморфными и субидиоморфными бесцветными кристаллами вытянутой призматической формы размером от 0.1 до 0.8 мм. Составы минералов оказались типичными для карбонатитовых пород [Динс, 1969; Капустин,

1971; Terry, 1996; Зайцев и др., 2012]. Пироклор при существенном доминировании  $Nb_2O_5$  (66.0—69.9 мас. %) содержит изоморфные с CaO примеси SrO (0.7—5.7 мас. %) и PЗЭ (в основном La и Ce — 0.4—4.0 мас. %). Бадделлит с 95.3—98.0 %  $ZrO_2$  содержит примеси  $Nb_2O_5$  0.5—2.7 мас. % и  $HfO_2$  1.3—1.8 мас. % (табл. 8s). В макрокристаллах Ap наиболее высокие содержания изоморфных примесей отмечаются для SrO (0.3—2.3 мас. %) и  $Ce_2O_3$  (0.2—0.7 мас. %). Особенностью кристаллов пироклора является частая встречаемость включений апатита как одиночных, так и групповых, характеризующихся разной направленностью в отдельных доменах кристалла (см. рис. 3, ж, з). Включения Ap в макрокристаллах Pcl отличаются по составу высоким содержанием (мас. %) SrO (до 8.3) и редкоземельных элементов ( $La_2O_3$  до 2,  $Ce_2O_3$  до 4,  $Nd_2O_3$  до 1.3).

## ОБСУЖДЕНИЕ

P. Митчелл показал [Mitchell, 1986, 2007], что ни геологическая позиция пород, ни их минералогические особенности не позволяют усматривать генетическую связь между кимберлитами и карбонатами. Хотя для отдельных районов Сибирской и Южно-Африканской платформ установлена тесная пространственная связь кимберлитов и щелочно-ультраосновных карбонатитовых комплексов, в целом для них характерна пространственная разобщенность [Verwoerd, 1966; Бородин и др., 1976; Лапин, 1986]. С другой стороны, ряд исследователей [Bailey, 1993; Dalton, Presnall, 1998] полагают, что генетическая связь между этими двумя карбонатсодержащими типами пород существует. Авторы считают, что кимберлитовые и карбонатитовые магмы имеют один и тот же мантийный источник и произошли в результате плавления  $CO_2$ -содержащего гранатового лерцолита. Экспериментальные исследования [Gudfinnsson, Presnall, 2005] показали принципиальную возможность появления составов расплава при разных *P-T*-условиях, разных степенях плавления перидотита, которые отвечают последовательному становлению карбонатитового, кимберлитового, милилитового, базальтового, пикритового и коматитового расплавов, находящихся в равновесии с гранатовым перидотитом.

Ранее был сделан вывод [Воробьев и др., 1978; Костровицкий, 1986], что и по содержанию щелочноземельных (Sr, Ba) и редкоземельных элементов карбонаты из кимберлитов не достигают уровня, устанавливаемого для кальцитов из карбонатитов, хотя в отдельных случаях и приближаются к нему. Заметные различия между кимберлитами и карбонатами обнаруживаются в особенностях распределения всех несовместимых элементов (и по уровню концентраций, и по форме кривых на спайдер-диаграммах), что было продемонстрировано на примере трубчатых тел, выполненных этими породами, на севере Якутской кимберлитовой провинции [Костровицкий и др., 2007].

Порода, выполняющая дайку тр. Айхал, как имеющая существенно карбонатный состав и содержащая акцессорные минералы Mnz, Vdu и Pcl, соответствует классическим карбонатитовым породам, но по ряду геохимических параметров, в частности по концентрации некогерентных элементов, не достигает их уровня (см. рис. 5). По сравнению с карбонатитовыми брекчиями из участка Номохтоох карбонатитоподобная порода из тр. Айхал отличается более низкой концентрацией PЗЭ (2090—2868 и 6548—10282 г/т соответственно, см. табл. 2). Существенное отличие карбонатитовых брекчий участка Номохтоох от карбонатитоподобной породы из тр. Айхал заключается и в относительно высоком содержании в брекчиях  $FeO_{\text{общ}}$  (среднее для брекчий 9.96 мас. %, для породы из тр. Айхал 3.6 мас. %) и низком содержании MgO (среднее для брекчий 9.7 мас. %, для породы из тр. Айхал 20 мас. %). Именно поэтому породу, выполняющую дайку тр. Айхал, мы называем карбонатитоподобной, хотя по формальным признакам такие породы иногда относят к карбонатам [Gaspar, Wyllie, 1984].

Природа первичных кимберлитовых расплавов до сих пор является предметом дискуссий. Многие исследователи считают, что кимберлиты с афанитовой текстурой и с повышенным содержанием  $CaCO_3$  характеризуются составами, наиболее близкими к первичным кимберлитовым расплавам [Shee, 1986; Edgar et al., 1988; Edgar, Charbonneau, 1993; Price et al., 2000; Kopylova et al., 2007]. Карбонатитоподобная порода из тр. Айхал, имеющая афанитовую текстуру, практически не содержит макрокристаллы Ol (или псевдоморфоз по оливину) и поэтому, если следовать логике перечисленных выше авторов, может претендовать на идеальную модель первичного кимберлитового расплава. Однако изотопные Sr-Nd параметры (табл. 5, 6) породы явно свидетельствуют о том, что в ее формировании заметную роль сыграли вторичные гидротермально-метасоматические процессы преобразования.

Описанные выше минералы (Vdu, Pcl, бетафит), встреченные в дайке, не свойственны кимберлитовым породам, но являются обычными акцессорными минералами в карбонатах [Капустин, 1971]. Впрочем, Vdu редко, но обнаруживается в кимберлитовых породах с высоким содержанием карбонатной компоненты, например, в силле Бенфонтейна, Южная Африка [Scatena-Wachel, Jones, 1984] в тр. Мбужи-Майи, Конго [Pivin et al., 2013]. Мы предполагаем, что образование карбонатитоподобной породы произошло на заключительном этапе процесса дифференциации кимберлитового расплава-флюида с отделившейся фазой существенно карбонатного состава при становлении тр. Айхал (возмож-

Таблица 5. Изотопный Rb-Sr состав кимберлитов и карбонатитоподобной породы из тр. Айхал и карбонатитовых брекчий из участка Номохтоох Староречинского поля

№ п/п	Образец	Трубка	Rb	Sr	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_T$
			г/г				
1	01-361	Айхал	27.22	748.5	$0.704652 \pm 14$	0.1052	0.704113
2	13-49	»	117.1	506.7	$0.709987 \pm 18$	0.6697	0.706555
3	05-480	»	105.5	982.8	$0.709102 \pm 20$	0.3106	0.707510
4	78-1565	Токио	25.64	2733	$0.703644 \pm 14$	0.0271	0.703575
5	90-67	Джо-северная	36.51	722.1	$0.703868 \pm 13$	0.1462	0.703494
6	78-1610	Ан-41п	33.79	741.2	$0.704593 \pm 13$	0.1319	0.704255

Примечание. Здесь и в табл. 6: данные изотопного состава для проб 1, 4-6 приведены из статьи [Костровицкий и др., 2007]; изотопный состав для проб 2, 3 — настоящая работа. Начальные изотопные характеристики Rb и Sr рассчитаны для проб из тр. Айхал (№ 1—3) на 360 млн лет, из участка Номохтоох — на 180 млн лет (№ 4—6).

Таблица 6. Изотопный Sm-Nd состав кимберлитов и карбонатитоподобной породы из тр. Айхал и карбонатитовых брекчий из участка Номохтоох Староречинского поля

№	Образец	Трубка	Sm	Nd	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ( $\pm 2\sigma$ )	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$
			г/г				
1	01-361	Айхал	11.8	114.2	$0.512540 \pm 14$	0.06243	4.3
2	13-49	»	41.9	240	$0.512633 \pm 06$	0.0942	4.6
3	05-480	»	30.5	220	$0.512562 \pm 05$	0.0749	4.1
4	78-1565	Токио	104.9	913.2	$0.512663 \pm 14$	0.0695	3.4
5	90-67	Джо-северная	10.2	82.7	$0.512687 \pm 14$	0.0747	3.8
6	78-1610	Ан-41п	13.5	109.4	$0.512688 \pm 14$	0.0745	3.8

Примечание. Начальные изотопные характеристики Sm и Nd рассчитаны для проб из тр. Айхал (№ 1—3) на 360 млн лет, из участка Номохтоох — на 180 млн лет. Расчет  $\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$  производился с использованием современных значений в хондрите  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1967$  и  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638$  [Jacobsen, Wasserburg, 1984].

но, в результате процессов гравитационной отсадки барофильных минералов). Относительно высокая концентрация некогерентных элементов по сравнению с кимберлитами в остаточном флюиде предопределила кристаллизацию в дайке таких типоморфных для карбонатитовых пород минералов, как Mnz, Vdu, Pcl и бетафит. К подобным выводам пришли авторы работы [Smith et al., 2013], описав карбонатитовую интрузию в алмазонасной кимберлит-лампрофировой тр. Хадерпет (кратон Дхарвар, Индия) как поздний продукт фракционирования ультраосновной магмы.

Все трубчатые тела участка Номохтоох, представленные как карбонатитовыми, так и кимберлитовыми брекчиями [Маршинцев, 1974], содержат типичную карбонатитовую акцессорную минерализацию. Кимберлитовые брекчии отличаются от карбонатитовых: 1) более высоким содержанием MgO (обр. 90-67, трубка Джо-северная), обусловленным их насыщенностью макрокристаллами оливина (псевдоморфоз Sr по Ol); 2) более низким содержанием карбонатной компоненты и акцессорных типоморфных карбонатитовых минералов; 3) значительно более низкой концентрацией несовместимых элементов. Обсуждая вопрос существования генетической связи между кимберлитами и карбонатитами, следует отметить наличие четких различий в особенностях локализации этих вулканитов в южной алмазонасной и северной с убогой алмазонасностью субпровинциях ЯКП. Если в южной части ЯКП типичные карбонатитовые тела (массивы) отсутствуют, то северная часть, можно сказать, изобилует ими. Кимберлитовые поля Прианабарья окружены с востока и запада пятнадцатью формациями ультраосновных-щелочных пород и карбонатитов (УЩК) с крупными карбонатитовыми массивами [Фролов и др., 2003, рис. 1.3.4]. При этом один из массивов (Мальджангарский) находится в непосредственной близости Лучаканского и Берегендинского кимберлитовых полей. Предполагается [Маршинцев, 1974; Чернышева, Костровицкий, 1981], что под кимберлитовым участком Номохтоох Староречинского поля располагается не выходящий на поверхность карбонатитовый массив. Карбонатитовый материал, обнаруживаемый в трубчатых телах (в том числе и в кимберлитовых трубках), находится только в обломочном виде и был захвачен при формировании кимберлитового участка Номохтоох. О существовании карбонатитового массива, по мнению В.К. Маршинцева [1970], свидетельствуют также многочисленные ксенолиты фенитизированных кристаллических пород, обнаруживаемых в брекчиях. Наличие «сле-

пых» карбонатитовых массивов, сопровождающихся формированием надынтрузивных трубчатых структур, предполагается [Фролов и др., 2003] для многих провинций и, в частности, для Маймеча-Котуйской [Егоров, Богданов, 1991]. Таким образом, вопрос генетической связи между кимберлитами и карбонатитами, по-видимому, необходимо решать отдельно — для классических алмазоносных кимберлитов, получивших развитие в центральной части Сибирского кратона, и для неалмазоносных (или с убогой алмазоносностью) кимберлитов в северной окраине кратона.

Наличие карбонатитоподобной породы (а по формальным признакам, карбонатита) в дайке тр. Айхал не может служить аргументом существования генетической связи между алмазоносными кимберлитами и карбонатитами. Во-первых, несмотря на высокую концентрацию некогерентных элементов в карбонатитоподобной породе, превышающую значения, характерные для кимберлитовых пород, она не достигает уровня, типичного для карбонатитовых пород (различие примерно на полпорядка). Во-вторых, обнаруженные в дайке минералы, типоморфные для карбонатитов, являются чрезвычайно мелкими и редкими аксессуориями. Главное же различие заключается в источнике некогерентных элементов. Если для карбонатитовых пород высокая концентрация некогерентными элементами обусловлена первичным составом мантийного источника, то для дайки тр. Айхал она обязана процессам дифференциации кимберлитового расплава-флюида. И таким образом, обнаружение самой дайки в кимберлитовой тр. Айхал отнюдь не опровергает выводы большинства исследователей об отсутствии между алмазоносными кимберлитами и карбонатитами генетической связи.

Вопрос наличия генетической связи с карбонатитами для кимберлитов северных полей ЯКП остается открытым. Был ли у предполагаемого «слепого» карбонатитового массива и кимберлитовых трубок участка Номохтоох один и тот же магматический очаг? Учитывая пространственную близость и сходство возрастных оценок формирования кимберлитовых и карбонатитовых трубок для Староречинского и соседнего с ним Орто-Иаргинского полей, выполненных U-Pb методом по перовскитам (все определения попадают в интервал 162—170 млн лет [Barton et al., 1995; Griffin et al., 1999; Sun et al., 2014], такое предположение вполне допустимо, хотя и остается дискуссионным. Остается объяснить контрастные (на порядок) различия в уровне концентрации некогерентных элементов, существенные отличия значений показательных отношений элементов для пород, выполняющих кимберлитовые и карбонатитовые трубки участка Номохтоох (сравнить составы по образцам 90-67 и 78-1558, 78-1565 соответственно, см. табл. 2), которые больше согласуются с выводом о разных мантийных источниках для кимберлитов и карбонатитов. Следует при этом отметить, что высокие концентрации несовместимых элементов и, прежде всего, P3Э в карбонатитовых брекчиях участка Номохтоох, превышающие максимальные концентрации в кимберлитовых породах [Илупин и др., 1978; Костровицкий и др., 2007] почти на порядок, являются типичными для карбонатитов [Rass, 1998; Hoernle et al., 2002; Al-Ani, Sarapää, 2013; Trofanenko et al., 2014; Moore et al., 2015; Edahbi et al., 2018].

Что касается вопроса, можно ли называть карбонатную составляющую кимберлитов карбонатитовой. Поскольку различия в концентрации некогерентных элементов в кимберлитовой составляющей и карбонатитах значительные, то, если согласиться с выводом об отсутствии генетической связи между породами, называть ее карбонатитовой, на взгляд авторов, означает вносить определенную терминологическую путаницу.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение химического, микроэлементного, минерального состава кимберлитов, карбонатитоподобной породы из тр. Айхал и карбонатитовых брекчий из трубок участка Номохтоох Староречинского поля позволило авторам прийти к следующим выводам:

1. Происхождение карбонатитоподобной породы из дайки тр. Айхал связано с заключительным этапом процесса дифференциации кимберлитового расплава-флюида при становлении трубки, с отделившейся фазой существенно карбонатного состава (возможно, в результате процесса гравитационной отсадки барофильных минералов).

2. Относительно высокая концентрация некогерентных элементов (P3Э, HFSE, Sr, Ba, P) по сравнению с кимберлитами в остаточном флюиде обусловила кристаллизацию в дайке тр. Айхал типоморфных для карбонатитовых пород минералов (Mnz, Vdy, Pcl и бетафит).

3. Концентрация некогерентных элементов в карбонатитоподобной породе из дайки тр. Айхал превышает таковые значения, характерные для кимберлитовых пород, но не достигает уровня, типичного для карбонатитовых пород (различие примерно на полпорядка).

4. Идиоморфная форма типоморфных для карбонатитовых брекчий участка Номохтоох минералов (Vdy, Pcl, Ap), взаимоотношения минералов друг с другом (наличие включений Ap в кристаллах Pcl) свидетельствуют о их близкой по времени кристаллизации при формировании карбонатитов, подвергнутых позднее процессам брекчирования.

5. Наличие карбонатитоподобной породы из дайки тр. Айхал не может служить аргументом существования генетической связи между алмазоносными кимберлитами и карбонатитами, поскольку различна природа высокой концентрации некогерентными элементами. Если для карбонатитовых пород высокая концентрация некогерентными элементами обусловлена первичным составом мантийного источника, то для дайки тр. Айхал она обязана процессам дифференциации кимберлитового расплава-флюида. И поэтому было бы неправильным называть карбонатную компоненту кимберлитовых пород карбонатитовой.

6. Вопрос наличия генетической связи с карбонатитами для кимберлитов северных полей ЯКП остается открытым.

Авторы благодарны АК АЛРОСА за предоставленные возможности проведения полевых работ на кимберлитовых трубках ЯКП, а также рецензентам О.Г. Сафронову и А.М. Агашеву за конструктивные замечания, позволившие улучшить содержание статьи и уточнить ее выводы.

Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по проекту IX.129.1.5. (№0350-2016-0030). Работа выполнена с использованием научного оборудования ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН.

#### ЛИТЕРАТУРА

**Бобриевич А.П., Илупин И.П., Козлов И.Т., Лебедева Л.И., Панкратов А.А., Смирнов Г.И., Харьков А.Д.** Петрография и минералогия кимберлитовых пород Якутии / Ред. В.С. Соболев. М., Недра, 1964, 192 с.

**Бородин Л.С., Лапин А.В., Пятенко И.К.** Петрология и геохимия даек щелочно-ультраосновных пород и кимберлитов. М., Наука, 1976, 244 с.

**Владимиров Б.М., Костровицкий С.И., Соловьева Л.В., Боткунов А.И., Фивейская Л.В., Егоров К.Н.** Классификация кимберлитов и внутреннее строение кимберлитовых трубок. М., Наука, 1981, 136 с.

**Воробьев Е.И., Костровицкий С.И., Владимирова Б.М., Арсенюк Л.И., Соловьева Л.В.** Стронций, барий и редкоземельные элементы в кальцитах из кимберлитов Якутии // Геохимия, 1978, № 9, с. 1343—1350.

**Геологический словарь** / Ред. А.Н. Криштофович. М., Недра, 1978, т. 1, 486 с.

**Динс Т.** Геолого-экономическая характеристика карбонатитов Африки // Карбонатиты. М., Мир, 1969, с. 328—355.

**Егоров К.Н., Богданов Г.В.** Монтичеллит из кимберлитов Якутии // Записки ВМО, 1991, № 2, с. 78—87.

**Зайцев А.Н., Вильямс С.Т., Волл Ф., Золотарев А.А.** Эволюция химического состава минералов группы пироклора из фоскоритов и карбонатитов из Хибинского щелочного массива // Геология рудных месторождений, 2012, т. 54, № 7, с. 503—515.

**Илупин И.П., Каминский Ф.В., Францессон Е.В.** Геохимия кимберлитов. М., Недра, 1978, 352 с.

**Капустин Ю.Л.** Минералогия карбонатитов. М., Наука, 1971, 288 с.

**Ковальский В.В.** Кимберлитовые породы Якутии и основные принципы их петрогенетической классификации. М., Изд-во АН СССР, 1963, 184 с.

**Ковальский В.В., Никишов К.Н., Егоров О.С.** Кимберлитовые и карбонатитовые образования восточного и юго-восточного склонов Анабарской антеклизы. М., Наука, 1969, 288 с.

**Костровицкий С.И.** Геохимические особенности минералов из кимберлитов. Новосибирск, Наука, 1986, 263 с.

**Костровицкий С.И., Морикио Т., Серов И.В., Яковлев Д.А., Амиржанов А.А.** Изотопно-геохимическая систематика кимберлитов Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2007, т. 48, № 3, с. 350—371.

**Лапин А.В.** Взаимоотношения карбонатитов и кимберлитов и некоторые проблемы магмообразования // Изв. АН СССР. Серия геол., 1986, № 12, с. 36—46.

**Лапин А.В., Маршинцев В.К.** Карбонатиты и кимберлитовые карбонатиты // Геология рудных месторождений, 1984, т. 26, № 3, с. 28—42.

**Мальков Б.А.** Карбонатитовые кимберлиты — новый тип алмазоносных пород // Докл. АН СССР, 1975, т. 221, № 5, с. 1170—1173.

**Маршинцев В.К.** О находке бадделеита в кимберлитовых породах Якутии // Геология, петрография и минералогия магматических образований северо-восточной части Сибирской платформы. М., Наука, 1970, с. 247—253.

- Маршинцев В.К.** Карбонатитовые образования восточного склона Анабарского сводового поднятия. Якутск, Якут. кн. изд-во, 1974, 120 с.
- Милашев В.А.** Кимберлитовые провинции. Л., Недра, 1974, 238 с.
- Фролов А.А., Толстов А.В., Белов С.В.** Карбонатитовые месторождения России. М., НИИ-Природа, 2003, 403 с.
- Фролов А.А., Лапин А.В., Толстов А.В., Зинчук Н.Н., Белов С.В., Бурмистров А.А.** Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношение, минерогения, прогноз). М., НИИ-Природа, 2005, 540 с.
- Харькив А.Д.** Кимберлитовые жилы, сопряженные с трубками, как самостоятельная фаза кимберлитового магматизма // Докл. АН СССР, 1975, т. 224, № 1, с. 190—193.
- Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И.** Геолого-генетические основы шлихоминералогического метода поисков алмазных месторождений. М., Недра, 1995, 349 с.
- Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Зуев В.М.** История алмаза. М., Недра, 1997, 601 с.
- Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И.** Коренные месторождения алмазов мира. М., Недра, 1998, 556 с.
- Чернышева Е.А., Костровицкий С.И.** О природе карбонатитовых брекчий восточного склона Анабарской антеклизы // Докл. АН СССР, 1981, т. 257, № 5, с. 1211—1213.
- Чернышева Е.А., Костровицкий С.И.** Оливиновые мелилититы кимберлитовых и карбонатитовых формаций в дайках и диатремах Восточной Сибири // Геохимия, 1998, № 12, с. 1217—1225.
- Agashev A.M., Pokhilenko N.P., Takazawa E., McDonald J.A., Vavilov M.A., Watanabe T., Sobolev N.V.** Primary melting sequence of a deep (>250 km) lithospheric mantle as recorded in the geochemistry of kimberlite-carbonatite assemblages, Snap Lake dyke system, Canada // Chem. Geol., 2008, v. 255, p. 317—328.
- Al-Ani T., Sarapää O.** Geochemistry and mineral phases of REE in Jammi carbonatite veins and fenites, southern end of the Sokli complex, NE Finland // Geochem. Explor. Environ. Anal., 2013, v. 13, p. 217—224.
- Bailey D.K.** Carbonatite magmas // J. Geol. Soc. London, 1993, v. 150, p. 637—651.
- Barton E.S., Brakhfogel F.F., Williams I.S.** U-Pb zircon age for carbonate and alkali-picrite pipes, Ortovyrga field (Yakutia) // Extended abstracts of Sixth International Kimberlite Conference. Novosibirsk, 1995, p. 37.
- Bell Keith.** Carbonatites: genesis and evolution. London, Unwin Hyman, 1989, 618 p.
- Boctor N.Z., Boyd F.R.** Oxide minerals in a layered kimberlite-carbonatite sill from Benfontein, South Africa // Contrib. Mineral. Petrol., 1981, v. 76, p. 253—259.
- Dalton J.A., Presnall D.C.** The continuum of primary carbonatitic-kimberlitic melt compositions in equilibrium with lherzolite: data from the system CaO—MgO—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—SiO<sub>2</sub>—CO<sub>2</sub> at 6 GPa // J. Petrol., 1998, v. 39, p. 1953—1964.
- Dawson J.B., Hawthorne J.B.** Magmatic sedimentation and carbonatic differentiation in kimberlite sills at Benfontein, South Africa // J. Geol. Soc. London, 1973, v. 129, p. 61—85.
- Donnelly C.L., Griffin W.L., Yang J.-H., O'Reilly S.Y., Li Q.-L., Pearson N.J., Li X.-H.** In situ U—Pb Dating and Sr—Nd Isotopic Analysis of Perovskite: Constraints on the Age and Petrogenesis of the Kuruman Kimberlite Province, Kaapvaal Craton, South Africa // J. Petrol., 2012, v. 53 (12), p. 2497—2522, <https://doi.org/10.1093/petrology/egs057>.
- Edahbi M., Plante B., Benzaazoua M., Pelletier M.** Geochemistry of rare earth elements within waste rocks from the Montviel carbonatite deposit, Québec, Canada // Environ. Sci. Pollut. Res., 2018, v. 25, p. 10997—11010. doi:10.1007/s11356-018-1309-7.
- Edgar A.D., Charbonneau H.E.** Melting experiments on a SiO<sub>2</sub>-poor, CaO-rich aphanitic kimberlite from 5—10 GPa and their bearing on source of kimberlite magmas // Am. Mineral., 1993, v. 78, p. 132—142.
- Edgar A.D., Arima M., Baldwin D.K., Bell D.R., Shee S.R., Skinner E.M.W., Walker E.C.** High-pressure-high temperature melting experiments on SiO<sub>2</sub>-poor aphanitic kimberlite from Wesselton mine, Kimberley, South Africa // Am. Mineral., 1988, v. 73, p. 524—533.
- Gaspar J.C., Wyllie P.J.** The alleged kimberlite-carbonatite relationship — evidence from ilmenite and spinel from Premier and Wesselton Mines and the Benfontein Sill, South Africa // Contrib. Mineral. Petrol., 1984, v. 85, № 2, p. 133—140.
- Griffin W.L., Ryan C.G., Kaminsky F.V., O'Reilly S.Y., Natapov L.M., Win T.T., Kinny P.D., Ilupin I.P.** The Siberian lithosphere traverse: mantle terranes and the assembly of the Siberian Craton // Tectonophysics, 1999, v. 310, p. 1—35.
- Gudfinnsson G.H., Presnall D.C.** Continuous gradation among primary carbonatitic, kimberlitic, melilititic, basaltic, picritic, and komatiitic melts in equilibrium with garnet lherzolite at 3—8 GPa // J. Petrol., 2005, v. 46, p. 1645—1659.

**Hoernle K., Tilton G., Le Bas M., Duggen S., Garbe-Schönberg D.** Geochemistry of oceanic carbonatites compared with continental carbonatites: mantle recycling of oceanic crustal carbonate // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2002, v. 142, № 5, p. 520—542.

**Jacobsen S.B., Wasserburg G.J.** Sm-Nd evolution of chondrites and achondrites // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1984, v. 67, p. 137—150.

**Kamenetsky V.S., Yaxley G.M.** Carbonate-silicate liquid immiscibility in the mantle propels kimberlite magma ascent // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2015, v. 158, p. 48—56.

**Kopylova M.G., Matveev S., Raudsepp M.** Searching for parental kimberlite melt // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2007, v. 71, p. 3616—3629.

**Mitchell R.H.** Kimberlites and related rocks — A critical reappraisal // *J. Geol.*, 1970, v. 78, p. 686—704.

**Mitchell R.H.** The alleged kimberlite-carbonatite relationship: additional contrary mineralogical evidence // *Am. J. Sci.*, 1979, v. 279, p. 570—589.

**Mitchell R.H.** Kimberlites: mineralogy, geochemistry and petrology. New York, Plenum Press, 1986, 442 p.

**Mitchell R.H.** Carbonatites and carbonatites and carbonatites // *Can. Mineral.*, 2007, v. 43, № 6, p. 2049—2068.

**Moore M., Chakhmouradian A., Mariano A., Sidhu R.K.** Evolution of rare-earth mineralization in the Bear Lodge carbonatite, Wyoming: Mineralogical and isotopic evidence // *Ore Geol. Rev.*, 2015, v. 64, p. 499—521.

**Nowell G.M., Pearson D.G., Bell D.R., Carlson R.W., Smith C.B., Kempton P.D., Noble S.R.** Hf Isotope Systematics of Kimberlites and their Megacrysts: New Constraints on their Source Regions // *J. Petrol.*, 2004, v. 45 (8), p. 1583—1612, <https://doi.org/10.1093/petrology/egh024>.

**Pin C., Zalduogui J.F.S.** Sequential separation of light rare-earth elements, thorium and uranium by miniaturized extraction chromatography: Application to isotopic analyses of silicate rocks // *Anal. Chim. Acta*, 1997, v. 339, p. 79—89.

**Pivin M., Debaille V., Mattielli N., Demaiffe D.** Nd-Hf isotope systematics of megacrysts from the Mbuji-Mayi kimberlites, D. R. Congo: Evidence for a metasomatic origin related to kimberlite interaction with the cratonic lithospheric mantle // *Proceedings of 10th International Kimberlite Conference*, v. 1. Special Issue of the *Journal of the Geological Society of India*, 2013, p. 123—136.

**Price S.E., Russell J.K., Kopylova M.G.** Primitive magma from the Jericho pipe, N.W.T., Canada: Constraints on primary kimberlite melt chemistry // *J. Petrol.*, 2000, v. 41, № 6, p. 789—808.

**Rass I.T.** Geochemical features of carbonatite indicative of the composition, evolution, and differentiation of their mantle magmas // *Geochem. Int.*, 1998, v. 36, p. 107—116.

**Russell J.K., Porritt L.A., Lavalleye Yan, Dingwell D.B.** Kimberlite ascent by assimilation-fuelled buoyancy // *Nature*, 2012, v. 481, № 19, p. 352—356.

**Safonov O.G., Kamenetsky V.S., Perchuk L.L.** Links between carbonatite and kimberlite melts in chloride carbonate-silicate systems: experiments and application to natural assemblages // *J. Petrol.*, 2011, v. 52, p. 1307—1331.

**Scatena-Wachel D.E., Jones A.P.** Primary baddeleyite (ZrO<sub>2</sub>) in kimberlite from Benfontein, South Africa // *Mineral. Mag.*, 1984, v. 48, p. 257—261.

**Shee S.R.** The petrogenesis of the Wesselton mine kimberlites, Kimberley, South Africa. Ph.D. Thesis, University of Cape Town, 1986, 137 p.

**Skinner E.M.W., Clement C.R.** Kimberlites, diatremes, and diamonds: their geology, petrology, and geochemistry // *Proceedings of the Second International Kimberlite Conference* / Eds. F.R. Boyd, H.O.A. Meyer. Washington, American Geophysical Union, 1979, v. 1, p. 129—139.

**Smith C.B.** Pb, Sr and Nd isotopic evidence for sources of African Cretaceous kimberlite // *Nature*, 1983, v. 304, p. 51—54.

**Smith C.B., Haggerty S.E., Chatterjee B., Beard A., Townend R.** Kimberlite, lamproite, ultramafic lamprophyre, and carbonatite relationships on the Dharwar Craton, India; an example from the Khaderpet pipe, a diamondiferous ultramafic with associated carbonatite intrusion // *Lithos*, 2013, v. 182—183, p. 102—113.

**Sun J., Liu C.-Z., Tappe S., Kostrovitsky S.I., Wu Fu-Yuan, Yakovlev D., Yang Yue-Heng, Yang Jin-Hui.** Repeated kimberlite magmatism beneath Yakutia and its relationship to Siberian flood volcanism: insights from in situ U-Pb and Sr-Nd perovskite isotope analysis // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2014, v. 404, p. 283—295.

**Sun J., Tappe S., Kostrovitsky S.I., Liu C.-Z., Skuzovatov S.Yu., Wu F.-Y.** Mantle sources of kimberlites through time: A U-Pb and Lu-Hf isotope study of zircon megacrysts from the Siberian diamond fields // *Chem. Geol.*, 2018, v. 479, p. 228—240.

**Tainton K.M., McKenzie D.** The generation of kimberlites, lamproites, and their source rocks // *J. Petrol.*, 1994, v. 35, p. 787—817.

**Tappe S., Pearson G., Prelević D.** Kimberlite, carbonatite, and potassic magmatism as part of the geochemical cycle // *Chem. Geol.*, 2013, v. 353, p. 1—3, doi:10.1002/chin.201349218.

**Terry W.C.** The occurrence of niobian zirconolite, pyrochlore and baddeleyite in the Kovdor carbonatite complex, Kola Peninsula, Russia // *Mineral. Mag.*, 1996, v. 60, № 401, p. 639—646.

**Trofanenko J., Williams-Jones A., Simandl G.** The nature and origin of the carbonatite-hosted Wicheeda rare earth elements deposit, British Columbia. Geological fieldwork 2013 // British Columbia Ministry of Energy and Mines, British Columbia Geological Survey Paper, 2014, p. 213—225.

**Verwoerd W.J.** South Africa carbonatites and their probable mode of origin // *Ann. Univ. Van Stellenbosch*, 1966, v. 41, Ser. A, № 2, p. 116—233.

**Von Eckermann H.** A comparison of Swedish, African and Russian kimberlites // *Ultramafic and related rocks*. New York, Wiley, 1967, p. 302—312.

**Weiss Y., Griffin W.L., Bell D.R., Navon O.** High-Mg carbonatitic melts in diamonds, kimberlites and the sub-continental lithosphere // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2009, v. 309, p. 337—347.

**Whitney D.L., Evans B.W.** Abbreviations for names of rock-forming minerals // *Am. Mineral.*, 2010, v. 95, p. 185—187.

*Рекомендована  
Н.П. Похиленко*

*Поступила в редакцию 31 мая 2019 г.,  
принята в печать 6 марта 2020 г.*