
НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Геология и минералогия алмазоносных провинций

УДК 621.791:620.172

DOI 10.31242/2618-9712-2018-24-2-5-28

**Амфиболы карбонатитовых брекчий Орто-Ыаргинского поля,
Полярная Якутия. Петрологический аспект**

В.А. Минин*, А.В. Толстов**, С.М. Жмодик*, А.Л. Земнухов***

Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия,**Научно-исследовательское геологическое предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия*****ОАО «Алмазы Анабара», Якутск, Россия**minin@igm.nsc.ru*

Аннотация. Показано, что мезозойские трубчатые тела Орто-Ыаргинского поля относятся к лампрофир(айликиит)-карбонатитовому типу породных парагенезисов, в составе которых отсутствуют кимберлиты. Амфиболы, являющиеся непременной составной частью всех разновидностей пород поля, образуют эволюционный ряд: ферринибейт → магнезиотарамит + магнезиокатофорит → магнезиогастингсит. Появление натровых амфиболов на ранних стадиях кристаллизации обусловлено значительными количествами CO_2 в насыщенном SiO_2 исходном расплаве. Лампрофиры и карбонатиты образуются при фракционировании ферринибейта из расплава, состав которого ограничен следующими значениями концентраций основных оксидов: $\text{SiO}_2=40-42\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3=7-8\%$, $\text{MgO}=10\%$, $\text{CaO}=5-7\%$, $\text{Na}_2\text{O}\sim 1\%$, $\text{K}_2\text{O}=2-4\%$. Во всех разновидностях пород Орто-Ыаргинского поля Na-Ca- и Ca-амфиболы присутствуют в виде равновесных кристаллических фаз. Морфологические и химические характеристики этих амфиболов позволяют предполагать существование разрыва смесимости в изоморфном ряду магнезиокатофорит–магнезиогастингсит. Обзор литературных данных показывает, что становление лампрофир-карбонатитовых серий сопровождается синхронным по времени кимберлитовым магматизмом на сопредельных территориях. Можно, следовательно, предполагать наличие мезозойских (юрских) кимберлитов с продуктивными содержаниями алмазов в северном сегменте восточного склона Анабарского поднятия.

Ключевые слова: карбонатиты, лампрофиры, кимберлиты, ферринибейт, магнезиотарамит, магнезиокатофорит, магнезиогастингсит, CO_2 .

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного проекта № 0330-2016-0006 при частичной поддержке грантов РФФИ № 18-17-00120 (исследования карбонатитов) и РФФИ № 18-05-70109\18 (исследования лампрофиров).

DOI 10.31242/2618-9712-2018-24-2-5-28

**Amphiboles of carbonatite breccia of Orto-Yargiskoe field,
Polar Yakutia. Petrological aspect**

V.A. Minin*, A.V. Tolstov**, S.M. Zhmodik*, A.L. Zemnukhov***

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia,**Geo-Scientific Research Enterprise of «ALROSA» (PJSC), Mirny, Russia*****JSC «Almazy Anabara», Yakutsk, Russia**minin@igm.nsc.ru*

Abstract. *It is shown that Mesozoic pipes of the Orto-Yarginskoe field refer to the lamprophyre(aikyite)-carbonatite type of rock parageneses without kimberlites in their composition. Amphiboles are indispensable part of all field rocks varieties and form the following evolution series: ferrinyboite → magnesiotaramite + magnesiocatophorite → magnesiohastingsite. The occurrence of sodium amphiboles at the early stages of crystallization is conditioned by the significant amounts of CO₂ in SiO₂ saturated initial melt. Lamprophyres and carbonatites are formed during ferrinyboite fractionation from the melt, which composition is limited by the following values of basic oxides concentrations: SiO₂=40–42 %, Al₂O₃=7–8 %, MgO=10 %, CaO=5–7 %, Na₂O~1 %, K₂O=2–4 %. Na-Ca and Ca-amphiboles occur as equilibrium crystalline phases in all varieties of Ort-Yarginskoe field rocks. Morphological and chemical characteristics of these amphiboles suggest the miscibility gap in the isomorphous series magnesiocatophorite-magnesiohastingsite. Literature review demonstrates that formation of lamprophyre-carbonatite series is followed by kimberlite magmatism at the adjacent territories synchronous in time, it therefore suggests possible existence of Mesozoic (Jurassic) kimberlites with productive diamond contents in the northern segment of the eastern slope of the Anabar uplift.*

Key words: carbonatites, lamprophyres, kimberlites, ferrinyboite, magnesiotaramite, magnesiocatophorite, magnesiohastingsite, CO₂.

Acknowledgments. *The work was carried out within the framework of state project No. 0330-2016-0006 with partial support of grants of Russian Science Foundation (RSF) 18-17-00120 (studies of carbonatites) and Russian Foundation for Basic Research (RFBR) No. 18-05-70109/18 (studies of lamprophyres).*

Введение

Карбонатитовые брекчии на восточном склоне Анабарского щита в бассейнах рек Старая и Хара-Мас были открыты сотрудниками Амакинской геологоразведочной экспедиции А.О. Ефимовым, В.В. Ковальским, Е.Д. Черным и др. в 1964–1965 гг. Брекчиями выполнены многочисленные трубки взрыва, размером от 50 до 300 м по длинной оси, интродуцирующие кембрийские карбонатные отложения. Чуть позже в полях развития карбонатитов было диагностировано несколько кимберлитовых трубок [7]. Природа данной ассоциации трактуется по-разному. По мнению одних исследователей карбонатитовые брекчии, слагающие трубчатые тела, представляют собой апикальные части нескрытых эрозией карбонатитовых штоков, а с кимберлитовыми телами они просто совмещены в пространстве [11]. Другие относят карбонатитовые брекчии к продуктам глубокой карбонатизации исходных щелочных базальтоидов, ассоциирующих с кимберлитами [12]. Тематические работы последних лет показали, что породы некоторых трубок, ранее классифицированные как кимберлиты, принадлежат семейству лампрофиров [1]. Обнаружение лампрофиров диктует необходимость проведения работ по реидентификации породного состава трубчатых тел региона и, соответственно, пересмотру их серийной (формационной) принадлежности. Последнее позволит получить новую информацию не только по вопросам генезиса собственно карбонатитов, но и по соотношению их с кимберлитами, что имеет важное алмазопрогностическое значение [10].

Одним из возможных методов решения данной проблемы является исследование минералов и их эволюционных рядов в основных по-

родных разновидностях диатрем с последующим сопоставлением с аналогичными минералами массивов, формационная принадлежность которых не вызывает сомнений [13, 14]. В предлагаемой статье в таком контексте рассматриваются амфиболы, которые, как оказалось, являются непременной составляющей всех разновидностей пород Орто-Яргинского поля, а также слагают встречающиеся в них анхимономинеральные ксенолиты.

Геологическая характеристика и петрографическая идентификация пород Орто-Яргинского поля

Поле приурочено к восточному флангу Анабарской антеклизы – крупной тектонической структуры Сибирской платформы (рис. 1). В пределах антеклизы выделяются два структурных этажа: нижний – архейский, являющийся фундаментом платформы, и верхний, соответствующий осадочному чехлу. Глубина залегания фундамента в районе Орто-Яргинского поля составляет 1–2 км [20]. Верхний структурный этаж представлен карбонатными толщами кембрия и фрагментарно сохранившимися верхнемеловыми терригенными отложениями. Фундамент платформы формировался в течение длительного периода, начиная с 3,5 млрд. лет и заканчивая 1,9 млрд. лет. По геологическим и геохронологическим данным в составе фундамента Сибирской платформы выделяются гранит-зеленокаменные, тоналит-трондьемитогнейсовые и гранулитогнейсовые террейны с архейской, архейско-палеопротерозойской и палеопротерозойской корой. Орто-Яргинское поле локализовано в структурах Хапчанского палеопротерозойского гранулит-парагнейсового террейна и является крайним северным фраг-

АМФИБОЛЫ КАРБОНАТИТОВЫХ БРЕКЧИЙ ОРТО-ЫАРГИНСКОГО ПОЛЯ, ПОЛЯРНАЯ ЯКУТИЯ

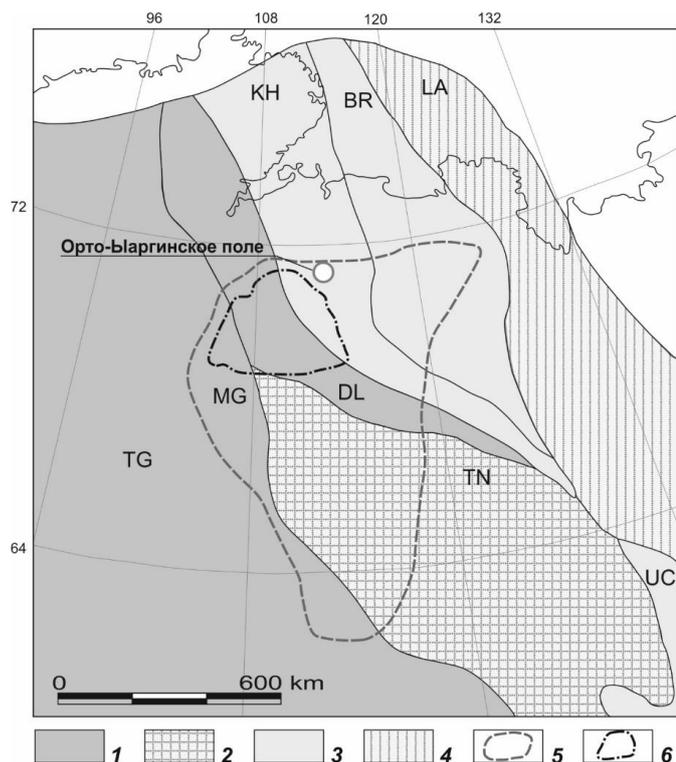


Рис. 1. Расположение Орто-Ыаргинского поля относительно структур фундамента Северо-Азиатского кратона [6]: 1 – архейские отложения; 2 – архейско-палеопротерозойские нерасчлененные; 3 – палеопротерозойские; 4 – мезопротерозойские; 5 – Якутская кимберлитовая провинция; 6 – Анабарский щит. Докембрийские террейны: Тунгусский (TG), Маганский (MG), Далдынский (DL), Тюнгский (TN), Учурский (UC), Хапчанский (KH), Биректинский (BR), Лено-Алданский (LA)

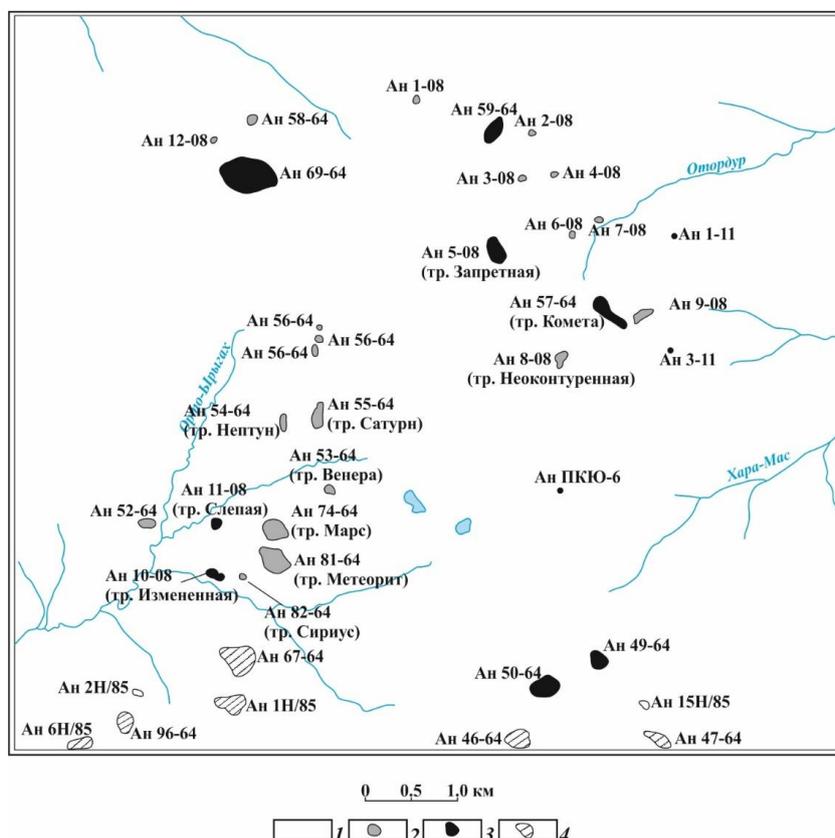
Fig. 1. Position of Orto-Yarginское field relatively to the North-Asian craton substructure [6]: 1 – archean sediments; 2 – archean-paleoproterozoic undifferentiated; 3 – paleoproterozoic; 4 – mesoproterozoic; 5 – Yakutian kimberlite province; 6 – Anabar schist. Precambrian terrain: Tunguski (TG), Maganski (MG), Daldynski (DL), Tyungski (TN), Uchurski (UC), Khapchanski (KH), Birektinski (BR), Leno-Aldanski (LA)

ментом в латеральной последовательности кимберлитового магматизма Сибирской платформы [6].

С начала 70-х годов прошлого столетия по настоящее время количество открытых трубчатых тел в Орто-Ыаргинском поле перевалило полторасотенный рубеж. Исследуемая коллекция охватывает 10 трубчатых тел: Ан-50/64, Ан-69/64, Ан-59/64, Ан-1/11, Ан-3/11, Ан-34/64, Ан-49/64, Ан-57/64, Ан-10/08, Ан-11/08. Породы, слагающие тела Ан-50/64, Ан-69/64 и Ан-59/64, предварительно были классифицированы как кимберлиты [11], остальные как карбонатиты. Все

Рис. 2. Карта-схема расположения трубчатых тел Орто-Ыаргинского поля (по материалам ОАО «Алмазы Анабара»): 1 – карбонатные породы среднего кембрия; 2 – трубчатые тела, обнаруженные при заверке геофизических аномалий; 3 – трубчатые тела, породы которых исследовались в рамках выполнения данного проекта; 4 – геофизические аномалии

Fig. 2. Location map of the Orto-Yarginское field pipes (by the materials of ОАО «Anabar Diamonds»): 1 – middle Cambrian carbonate rocks; 2 – pipes found during testing of geophysical anomalies; 3 – the pipes rocks were studied within the framework of the project; 4 – geophysical anomalies



перечисленные тела располагаются в северной части поля в бассейне рек Орто-Ыыргыч, Отордур и Хара-Мас (рис. 2). Каменный материал по этим объектам был получен специалистами ОАО «Алмазы Анабара» в процессе выполнения поисково-буровых работ при заверке геофизических аномалий на данной территории.

Трубки интродуцируют известняки, глинистые известняки и доломиты среднекембрийского возраста и перекрываются маломощными (0–9 м, в среднем ~ 4 м) рыхлыми четвертичными отложениями. По морфологическим признакам среди них выделяются два повторяющихся на сопредельных территориях типа (рис. 3):

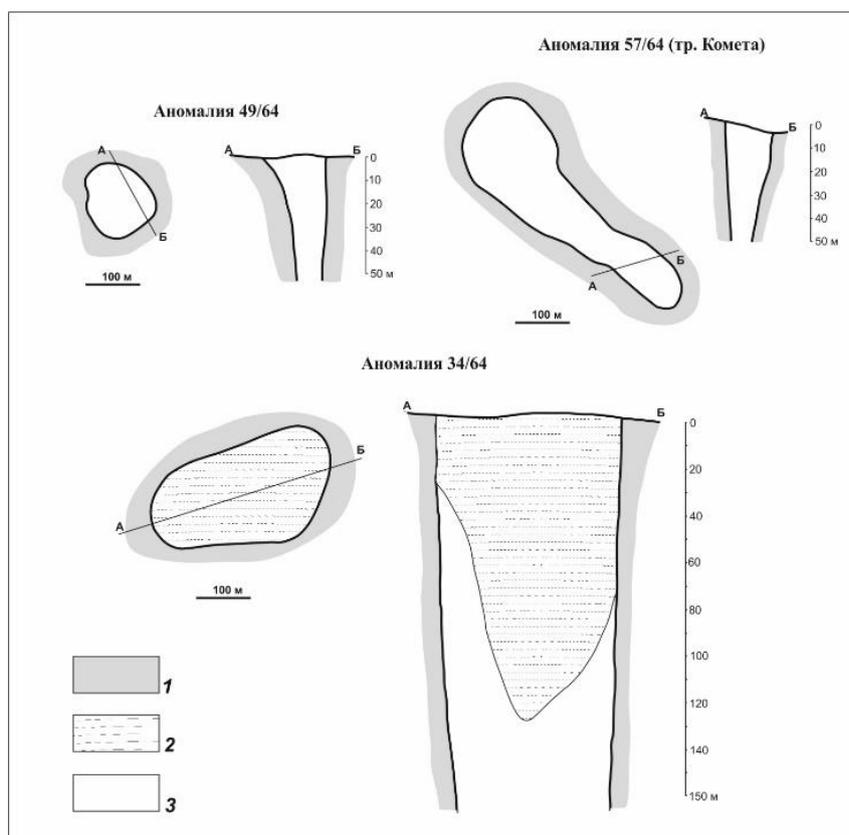


Рис. 3. Морфологические типы трубчатых тел Орто-Яргинского поля: 1 – вмещающие карбонатные породы среднего кембрия; 2 – пирокластические породы (туфы); 3 – карбонатитовые и силикатно-карбонатитовые брекчии

Fig. 3. Morphological types of Orto-Yargin field pipes: 1 – Middle Cambrian host rocks; 2 – pyroclastic rocks (tuffs); 3 – carbonate and silicate-carbonate breccias

1 – округлые, либо эллипсовидные в плане тела с незначительным расширением в приповерхностной части (Ан-49/64, Ан-11/08, Ан-1/11, Ан-3/11, Ан-69/64, Ан-50/64, Ан-59/64), в редких случаях в диатремах сохраняется кратерная часть, выполненная пирокластическими породами – туфами (Ан-34/64);

2 – вытянутые дайкообразные тела, нередко с одним или двумя раздувами (Ан-57/64, Ан-10/08).

По текстурно-структурным особенностям породы, слагающие трубчатые тела, относятся к массивным, мелко- и скрытокристаллическим порфиоровым разновидностям субвулканической фации глубинности с отчетливой брекчиевой текстурой за счет постоянного присутствия ксеногенного обломочного материала. Порфиоровые вкрапленники представлены кристаллами кальцита, доломита, амфибола, флогопита, оливина, пироксена, магнетита; ксенолиты – известняками, доломитистыми известняками (~98 % от общего количества), гнейсами (~2 %) и единичными фрагментами амфиболитов. Форма обломков угловатая, реже сглаженная, округлая,

размеры варьируют от 1–2 мм до 10–15 мм. Количество обломочного материала варьирует от 10 до 40 %, в среднем составляя 10–12 % от объема породы. Состав интрузивной порфиоровой массы, цементирующей ксеногенный материал, характеризуется преобладанием карбонатных минералов над силикатными, однако количественные соотношения тех и других варьируют в широких пределах.

Традиционно к карбонатитам относились эндогенные породы, содержащие более 50 об. % карбонатных минералов. В последнее время собственно карбонатитами предлагается считать породы, в составе которых несиликатные (карбонатные) минералы слагают более 90 об. % [17]. При снижении доли несиликатных минералов до 50–90 % карбонатиты переходят в группу силикатно-карбонатитовых пород. Поскольку количественное определение минерального состава экструзивных и субвулканических образований является процессом весьма трудоемким, для классификации исследуемых пород мы использовали содержание в них SiO_2 . Породы с содержаниями $\text{SiO}_2 < 20\%$ [37] относились

Средние химические составы карбонатитовых брекчий и амфиболовых ксенолитов трубчатых тел Орто-Ыаргинского поля
Average chemical compositions of carbonatite breccias and amphibole xenoliths of Orto-Yarginское field pipes

	Карбонатитовые брекчии					Карбонатит. туф	Силикатно-карбонатитовые брекчии					Амфиболовый ксенолит
	Ан-10/08	Ан-11/08	Ан-57/64	Ан-50/64	Ан-49/64	Ан-34/64	Ан-1/11	Ан-69/64	Ан-3/11	Ан-59/64	Ан-34/64	Ан-10/08
SiO ₂	8,71	11,24	14,21	15,15	18,64	17,18	32,03	34,79	35,06	37,48	26,41	43,35
TiO ₂	0,59	0,39	0,56	0,87	0,75	0,28	0,64	0,47	0,72	0,84	0,40	0,55
Al ₂ O ₃	2,78	3,52	3,47	3,44	4,20	4,33	6,23	5,14	5,92	6,52	6,27	11,74
Fe ₂ O ₃	9,58	6,37	8,62	9,63	8,40	6,94	5,47	7,19	6,44	6,63	8,28	12,61
MnO	0,18	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,14	0,14	0,14	0,15	0,17	0,18
MgO	4,64	11,87	12,89	11,61	11,57	10,72	11,21	18,42	14,10	14,76	11,19	6,41
CaO	36,17	27,22	24,87	25,98	24,60	26,29	18,04	10,70	13,84	12,71	17,58	9,70
Na ₂ O	0,00	0,00	0,20	0,05	0,13	0,17	0,62	0,82	0,62	0,87	0,29	3,88
K ₂ O	0,27	0,78	1,48	0,56	1,30	1,64	1,75	1,05	1,83	2,05	2,72	1,65
P ₂ O ₅	1,47	0,77	1,29	0,54	0,74	1,35	0,11	0,48	0,20	0,25	1,03	1,24
П.п.п.	33,96	36,97	32,12	31,97	29,69	30,42	23,70	20,97	21,29	17,94	25,38	8,55
Сумма	98,34	99,30	99,89	99,95	100,19	99,48	99,94	100,17	100,16	100,20	99,72	99,87
Кол-во анализов	7	1	11	6	10	9	3	8	1	5	14	5

Примечание. Анализы выполнены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН на рентгеновском анализаторе VRA 20 R производства К. Цейсс (Иена). Препараты для анализа готовились путем тщательного освобождения карбонатитовой матрицы от ксеногенного материала по методике, описанной в [2]. В качестве репера для разделения пород на карбонатитовые и силикатно-карбонатитовые разновидности использовалось 20-е % содержание в породе SiO₂ [37].

Note. The analyses are carried out in Analytical Center for multi-elemental and isotope research SB RAS. Carbonatite matrix has been carefully freed of xenogenic material by the method described in [2]. SiO₂ (20 %) content in the rock has been used as a reference point to differentiate rocks into carbonatite and silicate-carbonatite varieties [37].

к группе карбонатитов с большими значениями этого параметра, соответственно, к группе силикатно-карбонатитовых образований. Оказалось, что конкретные диатремы слагаются либо карбонатитовой (Ан-49/64, Ан-57/64, Ан-10/08, Ан-11/08, Ан-50/64), либо силикатно-карбонатитовой (Ан-1/11, Ан-3/11, Ан-59/64, Ан-69/64) брекчиями. Совмещение тех и других было установлено только в трубке Ан-34/64, где кратерная часть выполнена карбонатитовыми туфами, а собственно трубка – силикатно-карбонатитовой брекчией (табл. 1).

Карбонатитовые брекчии. В трубке Ан-49/64 (рис. 3) это однородные зеленовато-серые порфиновые породы с мелко- и среднезернистой основной массой. Фенокристы представлены ромбовидными кристаллами кальцита и доломита, призматическими кристаллами амфибола, таблитчатыми кристаллами флогопита, изометричными, бочонковидными кристаллами диопсида, редкими удлинёнными кристаллами энстатита, октаэдрами магнетита, округлыми кристаллами альмандина. Размер фенокристов варьирует от 0,2 мм до 3–5 мм, в среднем составляя 0,5–1,0 мм. Основная масса породы состоит из мелких (5–50 мкм) кристаллов доломита, кальцита, флогопита, калиевого полевого шпата, кварца, апати-

та, магнетита, ильменита, пирита, халькопирита, редких кристаллов пирохлора, бадделеита, монацита, погруженных в скрытокристаллический базис карбонат-хлоритового состава (рис. 4, 1). Модальные содержания породообразующих минералов укладываются в следующие интервалы: Fe-Mg-силикаты – 7–15 %, карбонатные минералы – 80–90 % (кальцит/доломит ~ 1/3), апатит – 1–2 %, магнетит – 1–2 %. Аналогичными характеристиками обладают карбонатитовые брекчии трубок Ан-50/64 и Ан-57/64.

Брекчии, слагающие трубку Слепая (Ан-11/08), характеризуются весьма близкими к описанным выше породам минеральным составом и структурно-текстурными особенностями. Отличие касается только количественного соотношения силикатных и карбонатных минералов. В породах трубки Ан-11/08 несколько повышено содержание последних, что, в частности, находит отражение в структурных особенностях основной массы. В ее сложении участвуют преимущественно мелкие (5–10 мкм) кристаллы доломита при практически полном отсутствии карбонат-хлоритового базиса (рис. 4, 2). Нередко в ядерных частях кристаллов доломита основной массы фиксируется сидерит. На отдельных фенокристаллах кальцита нарастают каймы доломита.

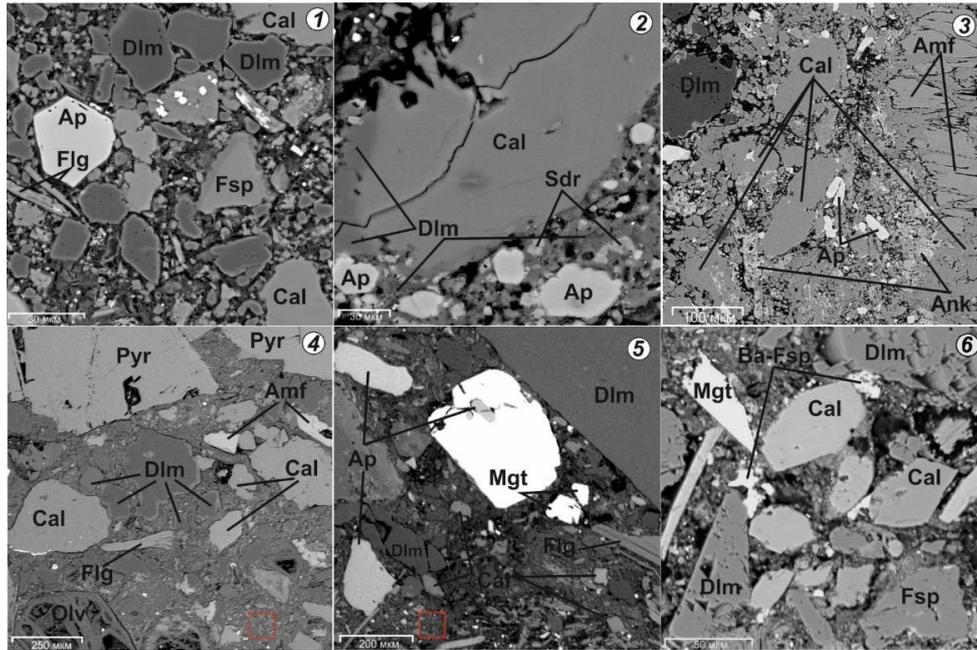


Рис. 4. Электронные изображения (BSE) фрагментов полированных поверхностей главных разновидностей пород трубчатых тел Орто-Яргинского поля: 1 – карбонатитовая брекчия, тело Ан-49/64 (обр. ПКЮ-15-10); 2 – карбонатитовая брекчия, тело Ан-11/08 (обр. 11/08-3-1); 3 – карбонатитовая брекчия, тело Ан-10/08 (обр. 10/08-Ц-3); 4 – силикатно-карбонатитовая брекчия, тело Ан-69/64 (обр. 69/641-3); 5 – силикатно-карбонатитовая брекчия, тело Ан-34/64 (обр. 34-Э-2М); 6 – карбонатитовый туф, тело Ан-34/64 (обр. 34-Э-12П). Ap – апатит, Dlm – доломит, Fsp – калиевый полевой шпат, Ba-Fsp – бариевый полевой шпат, Cal – кальцит, Sdr – сидерит, Ank – анкерит, Amf – амфибол, Pyr – пироксен, Olv – оливин, Mgt – магнетит

Fig. 4. Electron images (BSE) of the fragments of polished surfaces of main varieties of the rocks of Orto-Yarginskoe field pipes: 1 – carbonatite breccia, pipe An-49/64 (sample ПКЮ-15-10); 2 – carbonatite breccia, pipe An-11/08 (sample 11/08-3-1); 3 – carbonatite breccia, pipe An-10/08 (sample 10/08-Ц-3); 4 – silicate-carbonatite breccia, pipe An-69/64 (sample 69/641-3); 5 – silicate-carbonatite breccia, pipe An-34/64 (sample 34-Э-2М); 6 – carbonatite tuff, pipe An-34/64 (sample 34-Э-12П). Ap – apatite, Dlm – dolomite, Fsp – potassium feldspar, Ba-Fsp – barium feldspar, Cal – calcite, Sdr – siderite, Ank – ankerite, Amf – amphibole, Pyr – pyroxene, Olv – olivine, Mgt – magnetite

Еще меньшими количествами силикатной компоненты характеризуются карбонатитовые брекчии трубки Измененная (Ан-10/08), суммарные содержания амфибола, флогопита и алмадина в которых не превышают 5–7 %. Силикатными минералами сложены фенокристы (до 1,0–3,0 мм по длинной оси), погруженные в мелкокристаллический существенно кальцитовый базис. Структура самого базиса так же относится к разряду порфиридных – относительно крупные (80–100 мкм) кристаллы кальцита цементируются мелкими (10–20 мкм) кальцитовыми же индивидами (рис. 4, 3). По периферии мелких кристаллов кальцита развивается агрегат скелетных кристаллов анкерита-сидерита. Доломит встречается спорадически и не определяет структурный и минеральный облик породы. Аксессуары представлены апатитом, магнетитом, пиритом, бадделеитом, моноцитом.

Силикатно-карбонатитовые брекчии, слагающие самое крупное на рассматриваемой территории тело Ан-69/64 (рис. 3), содержат 10–20 % ксеногенного (известняки с примесью кварцевого песчаника, доломиты, гнейсы, обломки

кристаллов кварца) материала. Связующая масса брекчий характеризуется порфировой структурой и однородной массивной текстурой. Фенокристы, размер которых варьирует от 0,5 до 2,0 мм, представлены (в порядке убывания) кристаллами флогопита, амфибола, магнетита, оливина (полные серпентиновые псевдоморфозы), алмадина, пироксена (моноклинная и ромбическая разновидности). Основная масса сложена кристаллами (20–200 мкм) кальцита, доломита, магнетита, амфибола, флогопита, апатита, редко альбит-олигоклаза и кварца, погруженными в скрытокристаллический карбонат-хлорит-серпентиновый базис (рис. 4, 4). В акцессорных количествах в породах присутствуют монацит, бадделеит, нептунит, пирит, пентландит. Количество фенокристов варьирует в пределах 10–15 %, причем более 2/3 от этого количества приходится на силикатные минералы. В основной массе преобладающим распространением пользуются карбонатные минералы, слагая не менее 70 % объема породы, при этом доломит преобладает над кальцитом (кальцит/доломит~4/5). Близкими минеральными составами и структурно-

текстурными особенностями характеризуются породы тел Ан-59/64 и Ан-3/11.

Силикатно-карбонатитовые брекчии трубки Ан-34/64, в которой, как уже упоминалось, сохранились породы кратерной части, отличаются от рассмотренных ранее значительно большими количествами карбонатных минералов и флогопита, что нашло отражение в повышенных концентрациях в их составе К, Са и Fe (табл. 1). Структурный рисунок породы при этом практически не изменился. Фенокристы флогопита, амфибола, оливина (полные серпентиновые псевдоморфозы), пироксена, магнетита, доломита погружены в связующий базис, сложенный кальцитом, доломитом, флогопитом, апатитом, магнетитом, бариевым полевым шпатом группы цельзиана и скрытокристаллической карбонат-серпентин-хлоритовой массой. Акцессорные минералы представлены бадделитом, пирохлором, пиритом, пентландитом (рис. 4, 5). Аналогичными минеральными составами и структурно-текстурными особенностями характеризуются породы тела Ан-1/11.

По содержанию главных компонентов (табл. 1) силикатно-карбонатитовые брекчии находят себе аналоги среди щелочных пикритов, кимберлитов и ультраосновных лампрофиров. Главным фемическим минералом пикритов считается оливин в сочетании с клинопироксеном и флогопитом; амфибол встречается спорадически и практически отсутствует магматический карбонат. Типоморфными признаками кимберлита являются обязательное присутствие оливина, карбоната, хромистого пирропа, хромита, пикроильменита и полное отсутствие амфибола. В ультраосновных лампрофировых породах специфика породы подчеркивается главенством амфибола и флогопита (пироксена) при наличии/отсутствии карбоната, нефелина, щелочного полевого шпата [47]. Силикатно-карбонатитовые брекчии, как было показано выше, не обнаруживают в своем составе заметных количеств оливина, полностью лишены пирропа, хромита, пикроильменита, но содержат амфибол, флогопит, пироксен, карбонаты. Следовательно, по набору основных минералов они являются представителями семейства ультраосновных лампрофиров, более всего соответствуя айликитам.

Карбонатитовые туфы, выполняющие кратерную депрессию диатремы 34/64, представлены породами алевропсамитовой размерности с отчетливым слоистым строением. Ориентировка слоистости, по крайней мере в центральной части кратера, горизонтальная. Туфы сложены угловатыми обломками и целыми кристаллами кальцита, доломита, флогопита, пироксена, амфибола, магнетита, кварца, граната, альбита, Ваполевого шпата, кварца, единичными обломками вулканического стекла (рис. 4, 6).

Спорово-пыльцевые спектры, обнаруженные в отдельных образцах туфов, позволяют сделать заключение, что их образование происходило в раннеюрское время (материалы ОАО «Алмазы Анабара»). Формирование кратерной депрессии и ее заполнение туфогенным материалом происходило до внедрения силикатно-карбонатитовых брекчий. На такую последовательность событий однозначно указывают обломки туфов в брекчиях в зоне контакта тех и других в диатреме Ан-34/64. Изотопный возраст карбонатитов Орто-Ыаргинского поля укладывается в интервал 175–147 млн. лет, что так же соответствует юрскому времени [6].

И брекчии, и туфы обнаруживают в своем составе округлые обособления – лапилли, которые образуют самостоятельные тельца размером 5–30 мм, либо оболочки переменной мощности вокруг ксенолитов, кристаллов флогопита, амфибола. Как и вмещающие породы, они имеют мелко- и скрытокристаллическую порфиристую структуру. Большинство лапиллей характеризуются концентрически-зональным строением, выражающимся в ориентированном субтангенциальном расположении табличек флогопита и удлиненных кристаллов карбонатных минералов. Содержат повышенные в сравнении с вмещающей породой количества флогопита, амфибола, магнетита. Макроскопически это выражается в более темном цвете вещества лапилли.

Ксенолиты амфиболитов. В карбонатитовых брекчиях трубок Ан-57/64 и Ан-10/08 специалистами ОАО «Алмазы Анабара» были обнаружены редкие ксенолиты кристаллических пород, основным породообразующим минералом которых является амфибол. Подчеркнем, что подобные ксенолиты полностью отсутствуют в трубках некарбонатитового состава на сопредельных территориях.

Размеры ксенолитов не превышают 2–3 см в поперечнике. По минеральному составу они варьируют от амфибол-флогопит-альбит-карбонатных пород, в которых содержания фемических минералов составляют 50–60 %, до практически мономинеральных амфиболитов (за счет исчезновения альбита). Породы обладают среднезернистым сложением и отчетливо выраженными гипидиоморфными структурами. Структурный облик определяют призматические кристаллы амфибола и столбчатые кристаллы плагиоклаза. В большинстве случаев кристаллы названных минералов обнаруживают субпараллельную ориентировку. Размеры кристаллов варьируют от 0,1 до 1,5–2,0 мм. Промежутки между кристаллами амфибола и плагиоклаза выполняют карбонатные минералы и апатит. Доломит, как правило, представлен в мезостазице таблитча-

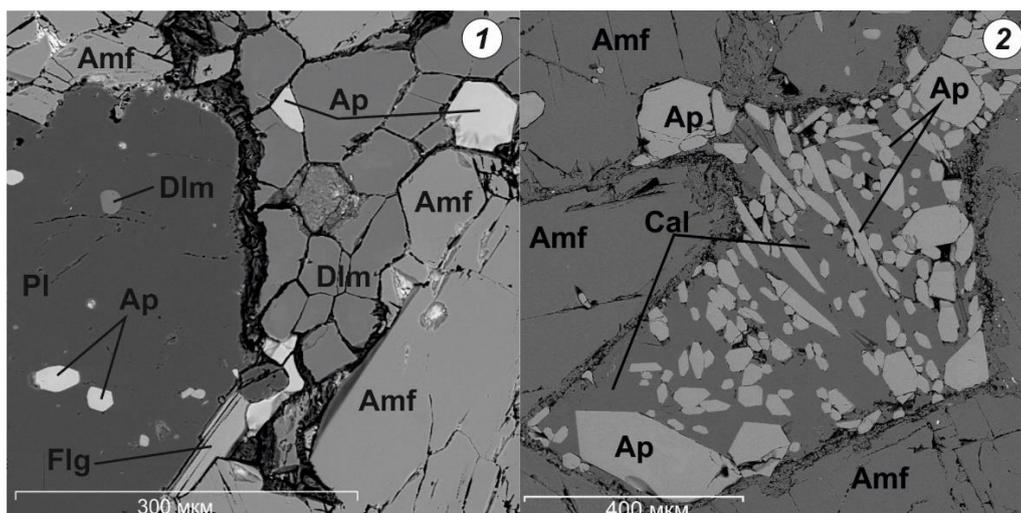


Рис. 5. Электронные изображения (BSE) фрагментов полированных поверхностей ксенолитов амфиболовых пород: 1 – плагиоклаз-амфиболовая порода, тело An-57/64 (обр. 908-C3-717). Агрегат таблитчатых кристаллов доломита и призм апатита выполняет промежутки между слагающими основной объем породы призматическими кристаллами амфибола (60–65 %) и плагиоклаза (35–40 %). Плагиоклаз представлен практически чистым альбитом; 2 – амфиболовая порода, тело An-10/08 (обр. 10/08-Ц-6). Промежутки между кристаллами амфибола выполнены кальцит-апатитовой массой

Fig. 5. Electron images (DSE) of the fragments of polished xenolith surfaces of amphibole rocks: 1 – plagioclase –amphibole rock, pipe An-57/64 (sample 908-C3-717). Aggregate of dolomite tabular crystals and apatite prisms fill interspaces between prismatic amphibole crystals (60–65 %), which make up the main rock volume and plagioclase (35–40 %). Plagioclase is represented by practically pure albite; 2 – amphibole rock, pipe An-10/08 (sample 10/08-Ц-6). Calcite-apatite mass makes up the interfaces between amphibole crystals

тыми изометричными кристаллами (рис. 5, 1), кальцит образует ойкокристаллы, включающие в себя призмы апатита (рис. 5, 2). Флогопит присутствует в породах в виде кристаллических агрегатов, располагающихся вдоль границ кристаллов амфибола и плагиоклаза. Он слагает 5–10 % объема породы, редко достигая значений 25–30 %. Акцессорные минералы представлены ильменитом, магнетитом, пироксеном, монацитом, сфалеритом. В существующих петрографических классификациях для этих пород не находится строго определенного места. Условно их можно сопоставить с горнблендитами габбро-ультрамафитовых комплексов Урало-Аляскинского типа [5], если представить, что в них роль плагиоклазовой компоненты играет альбит-доломит-кальцитовая ассоциация.

Рассмотрим, как соотносятся амфиболиты и вмещающие их карбонатитовые брекчии. Прежде всего подчеркнем близкий видовой состав основных породообразующих и акцессорных минералов тех и других: амфибол, флогопит, кальцит, апатит, ильменит, магнетит, пироксен, монацит. И карбонатиты и амфиболиты характеризуются магматическими гипидиоморфными структурами. В интеркумулясе амфиболитов мы фиксируем минеральные ассоциации, соответствующие карбонатитам либо карбонат-апатитовым рудам (рис. 5). Перечисленное позволяет

рассматривать амфиболиты не как ксенолиты, а как родственные карбонатитам кумулаты.

На петрохимических диаграммах все исследуемые породы Орто-Баргинского поля, включая амфиболовые ксенолиты, выстраиваются в единый вариационный ряд, обусловленный последовательным ростом содержания CaO , снижением суммарной щелочности и Al_2O_3 на фоне падения концентраций SiO_2 (рис. 6). Кимберлиты Якутской провинции не вписываются в этот вариационный ряд, отличаясь существенно более низкими содержаниями щелочей и алюминия.

Совокупность геологических, петрографических и петрохимических особенностей исследуемых пород, таким образом, позволяет сделать вывод о их принадлежности к самостоятельной, не связанной с кимберлитами лампрофир-карбонатитовой серии пород.

Амфиболы

Амфиболы, как было показано выше, присутствуют во всех разновидностях пород Орто-Баргинского поля, образуя отдельные короткопризматические кристаллы в брекчиях либо сплошные кристаллические массы в ксенолитах. Цвет амфиболов изменяется от буро-зеленого до темно-зеленого иногда с голубым оттенком. Оптическая зональность не выявлена, признаки

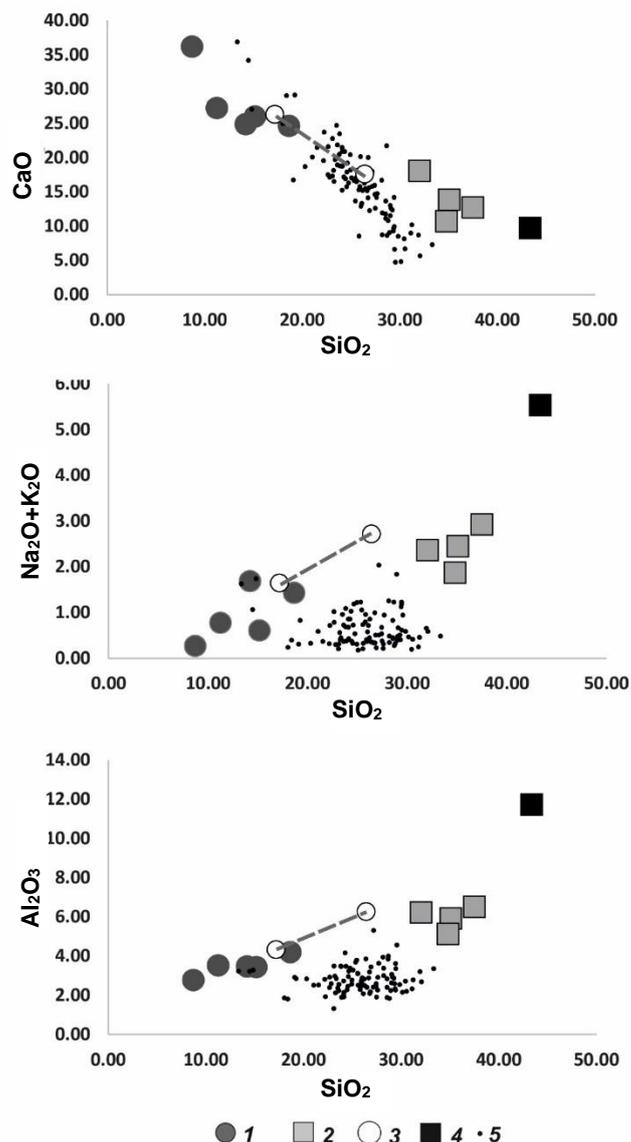


Рис. 6. Вариации содержаний (мас. %) CaO, Na₂O+K₂O, Al₂O₃ и SiO₂ в основных разновидностях пород трубчатых тел Орто-Ыаргинского поля: 1 – средние составы карбонатитовых брекчий (табл. 1); 2 – средние составы лампрофировых брекчий; 3 – средние составы карбонатитовых туфов и лампрофировых брекчий диатремы Ан-34/64; 4 – средний состав амфиболовых ксенолитов; 5 – средние (по трубкам) составы кимберлитов Якутской провинции [2]

Fig. 6. CaO, Na₂O+K₂O, Al₂O₃ and SiO₂ content variations (wt%) in the main rock varieties of Orto-Yarginskoe field pipes: 1 – average compositions of carbonatite breccias (table 1); 2 – average compositions of lamprophyre breccia; 3 – average compositions of carbonatite tuffs and lamprophyre breccias of An-34/64 diatreme; 4 – average compositions of amphibole xenoliths; 5 – average (pipes) compositions of kimberlites of Yakutian province [2]

изменения цвета отсутствуют даже в краевых частях кристаллов. По составу амфиболы варьируют от кальциевых до натриево-кальциевых и натриевых, соответствуя таким минеральным видам, как магнезиогастингситы, магнезиокатофориты, магнезиотарамиты и ферринибейты (табл. 2, рис. 7).

Кальциевые и натриево-кальциевые амфиболы не образуют единого изоморфного ряда, формируя в координатах Al-Ti, Si-Na и Ca-K обособленные, не пересекающиеся друг с дру-

гом кристаллизационные тренды (рис. 8). При этом и в лампрофирах, и в карбонатитах обособившиеся на графиках Ca- и Na-Ca – разновидности амфиболов практически всегда находятся в совместной ассоциации, образуя самостоятельные кристаллы без признаков реакционного взаимодействия. На рис. 8 отчетливо видно, что в лампрофирах составы обеих групп амфиболов оказались сдвинутыми в область меньших содержаний Ca и Al, и, соответственно, больших Si и Na в сравнении с амфиболами карбо-

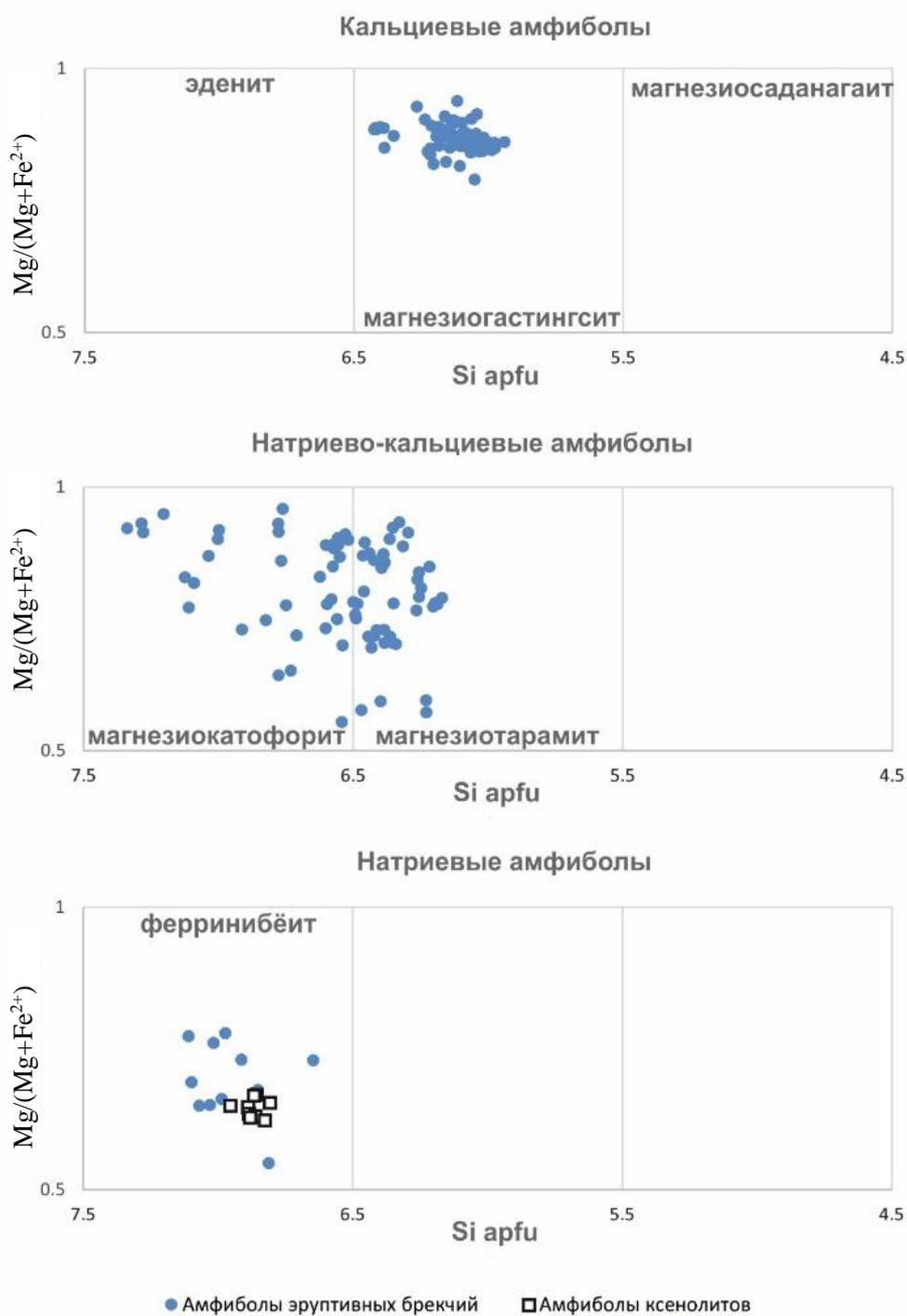


Рис. 7. Видовой состав амфиболов эруптивных брекчий Орто-Яргинского поля. Границы минеральных видов проведены в соответствии с [16]

Fig. 7. Species composition of amphiboles of eruptive breccias from Orto-Yarginskoe field. The limits of mineral species are presented according to [16]

Составы амфиболов основных разновидностей пород трубчатых тел Орто-Ыаргинского поля
The compositions of amphiboles of the main varieties of Ort-Yarginское field pipes

	Кальциевые амфиболы						
	Лампрофиры				Карбонатиты		
	Ан-69/64	Ан-3/11	Ан-1/11	Ан-34/64	Ан-50/64	Ан-57/64	Ан-49/64
SiO ₂	43,12	44,20	44,45	43,64	40,93	44,13	42,11
TiO ₂	2,26	2,46	2,29	0,92	3,35	3,21	3,46
Al ₂ O ₃	11,25	11,17	10,77	10,92	12,79	10,73	11,73
FeO	8,42	8,08	9,06	12,39	8,21	8,73	8,39
MnO	0,09	0,08	0,11	0,22	0,08	0,09	0,12
MgO	16,29	16,04	15,78	14,17	15,58	15,61	15,90
CaO	10,07	10,29	10,02	8,66	11,26	10,27	10,80
Na ₂ O	3,11	2,79	2,94	4,55	2,47	2,78	2,79
K ₂ O	1,59	1,55	1,45	0,76	2,00	1,49	1,67
Cr ₂ O ₃	0,16	0,29	0,06	0,08	0,37	0,04	0,13
Total	96,35	96,95	96,92	96,32	97,04	97,08	97,10
Si	6,265	6,388	6,416	6,383	6,000	6,386	6,126
Al ^{IV}	1,735	1,612	1,584	1,617	2,000	1,614	1,874
Al ^{VI}	0,192	0,290	0,249	0,266	0,210	0,216	0,138
Ti	0,247	0,267	0,249	0,101	0,369	0,349	0,379
Fe ³⁺	0,745	0,533	0,648	1,001	0,438	0,460	0,515
Fe ²⁺	0,277	0,443	0,446	0,515	0,568	0,597	0,506
Mn	0,011	0,010	0,013	0,027	0,010	0,011	0,014
Mg	3,527	3,456	3,396	3,090	3,405	3,367	3,448
Fe tot	1,023	0,977	1,094	1,515	1,006	1,056	1,021
Ca	1,567	1,593	1,550	1,357	1,769	1,592	1,683
Na	0,076	0,782	0,823	1,290	0,702	0,780	0,787
K	0,294	0,286	0,267	0,142	0,0374	0,275	0,310

Примечание. Составы амфиболов определялись в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН на электронном сканирующем микроскопе INCA Energy 450+ (Oxford instrumental Ltd) и на рентгеноспектральном микроанализаторе «JXA-8100».

Note. The compositions of amphiboles have been determined in Analytical Center for multielemental and isotope research SB RAS on scanning microscope MIRA 3 LMU (Tescan Ltd) plus INCA Energy 450+ (Oxford instrumental Ltd) and X-ray absorption analyzer «XA-8100»

натитов. Такая унаследованность составов минералов и породы позволяет рассматривать и Са- и Na-Са-амфиболы как продукты кристаллизации соответствующих порций эволюционирующего карбонатитового расплава.

В карбонатитах экструзивной фации (туфы диатремы Ан-34/64) амфиболы представлены только Na-Са-разновидностями – магнезиотарамитами и магнезиокатофоритами (рис. 9). Кальциевые амфиболы (магнезиогастингситы), являющиеся неотъемлемой составной частью карбонатитовых брекчий, в туфах отсутствуют полностью. Что могло препятствовать кристаллизации Са-амфиболов в туфах и способствовать этому процессу в брекчиях, если принять во внимание тождественность составов обеих пород (табл. 1)? Очевидно, различия в наборе кристаллических фаз следует связывать с раз-

личными физическими характеристиками процессов становления туфов и брекчий. Пирокластические породы, как известно, образуются в результате взрывных извержений высокоэнергетических порций расплава того или иного состава. Процесс разгрузки накопившейся энергии обеспечивает быстрый подъем расплава к дневной поверхности, его дезинтеграцию на различного размера частицы, перемешивание их с атмосферным воздухом и практически мгновенное охлаждение. По понятным причинам кристаллические фазы пирокластических пород представлены преимущественно ликвидусными минералами. В условиях субвулканических фаций глубинности временной интервал кристаллизации расплава расширяется, что приводит к появлению в породах всего спектра минеральных фаз от ликвидусных до субсолидусных.

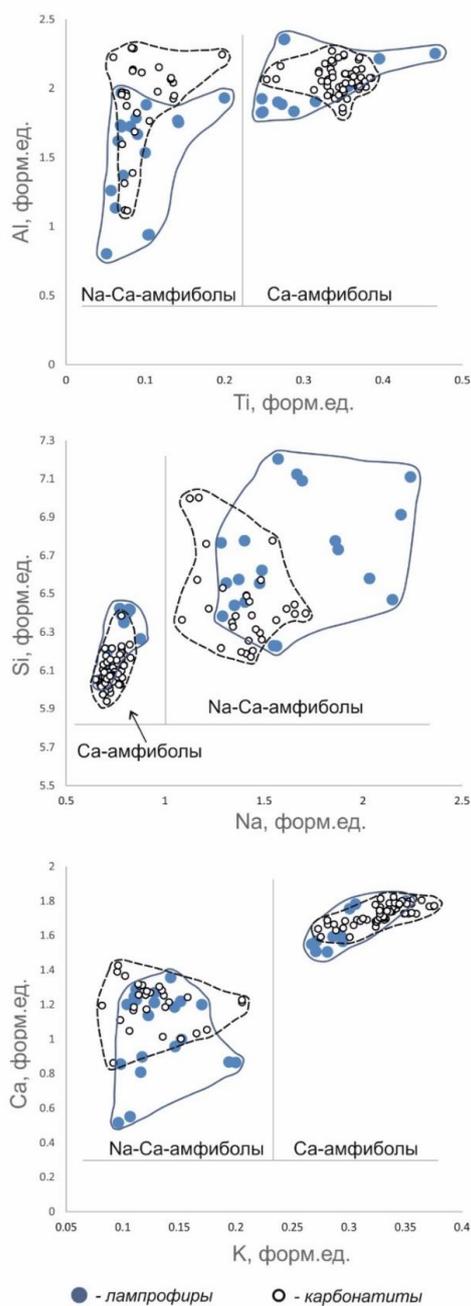


Рис. 8. Вариации главных компонентов в составе кальциевых и натриево-кальциевых амфиболов основных разновидностей лампрофиров и карбонатитов Орто-Ыаргинского поля

Fig. 8. The variations of the main components in the composition of calcium and sodium-calcium amphiboles, lamprophyres and carbonatites of Orto-Yarginskoe field

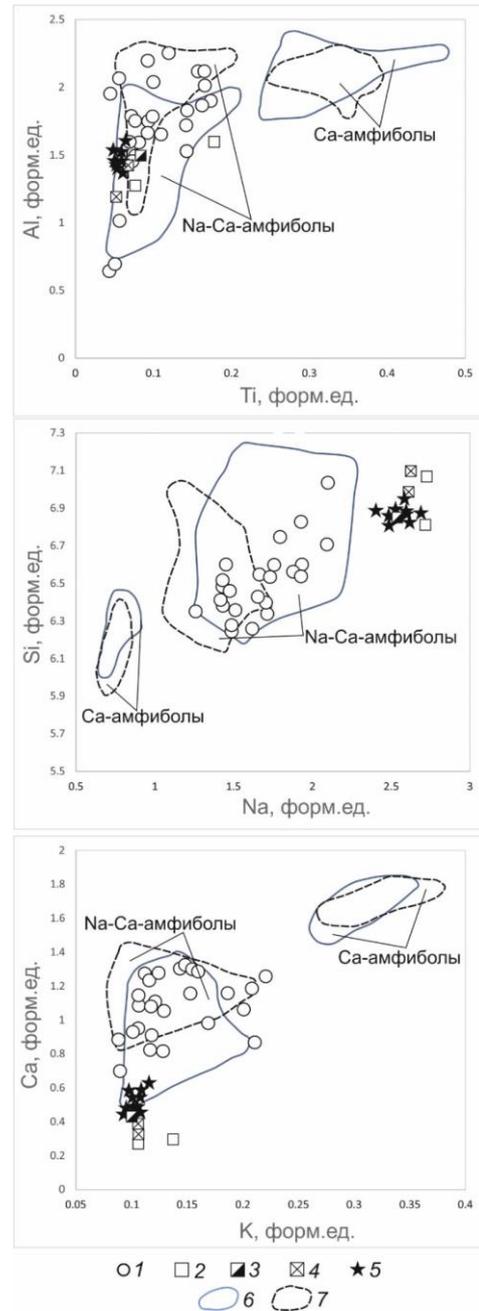


Рис. 9. Вариации главных компонентов в составе натриево-кальциевых и натриевых амфиболов основных разновидностей пород Орто-Ыаргинского поля: 1 – натриево-кальциевые амфиболы карбонатитовых туфов; 2 – ферринибеиты карбонатитовых туфов; 3 – ферринибеиты лампрофировых брекчий; 4 – ферринибеиты карбонатитовых брекчий; 5 – ферринибеиты ксенолитов; 6 – поля составов амфиболов лампрофировых брекчий (рис. 7); 7 – поля составов амфиболов карбонатитовых брекчий (рис. 7)

Fig. 9. Variations of the main components in the composition of sodium-calcium and potassium amphiboles of the main rock varieties of Orto-Yarginskoe field: 1 – sodium-calcium amphiboles of carbonatite tuffs; 2 – ferrinyboites of carbonatite tuffs; 3 – ferrinyboites of lamprophyre breccias; 4 – ferrinyboites of carbonatite breccias; 5 – ferrinyboites of xenoliths; 6 – fields of amphibole compositions of lamproite breccias (fig. 7); 7 – fields of amphibole compositions of carbonatite breccias (fig. 7)

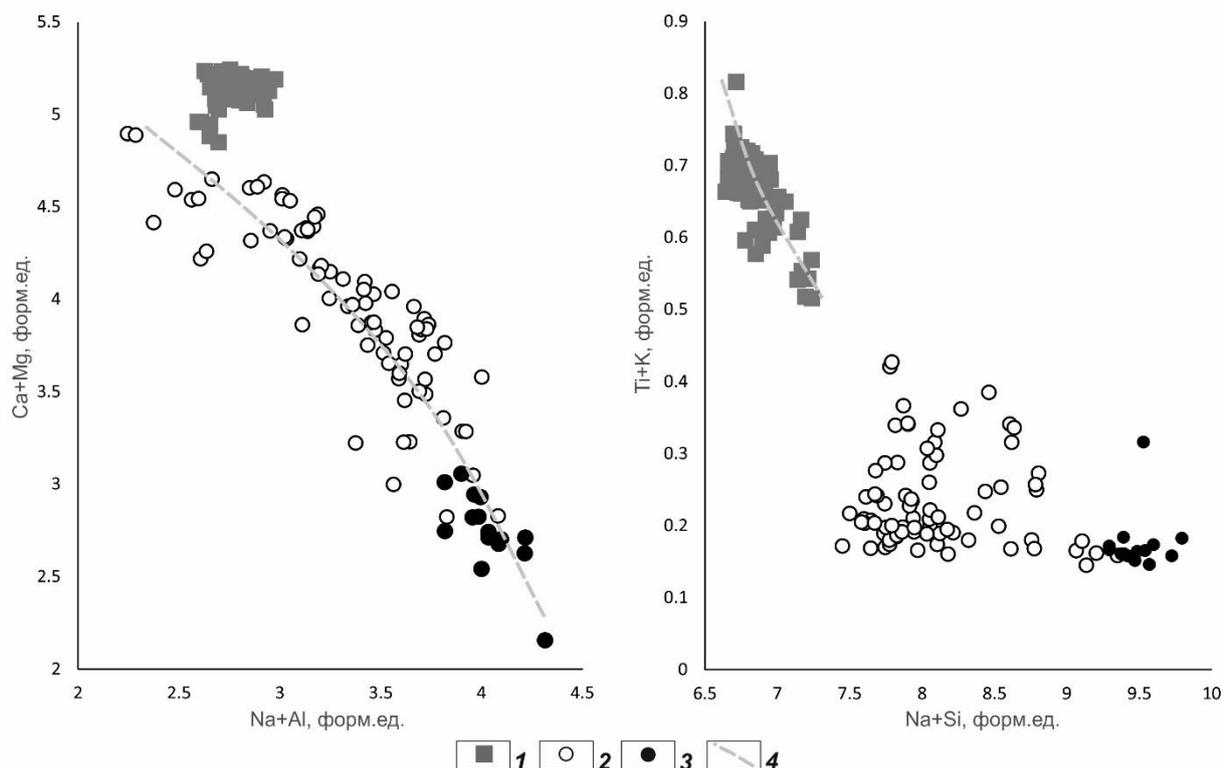


Рис. 10. Особенности изоморфных замещений в группе Са-амфиболов и в группе Na-Са- и Na-амфиболов Орто-Ыаргинского поля: 1 – Са-амфиболы; 2 – Na-Са-амфиболы; 3 – Na-амфиболы; 4 – кристаллизационные тренды

Fig. 10. The peculiarities of isomorphous substitutions in Ca-, Na-Ca- and Na-amphiboles of Ort-Yarginskoe field: 1 – Ca-amphiboles; 2 – Na-Ca-amphiboles; 3 – Na-amphiboles; 4 – crystallization trends

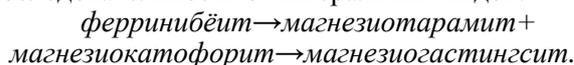
Следуя этой логике, можно предположить, что процесс образования кальциевых и натриево-кальциевых амфиболов в рассматриваемых породах разорван во времени – магнезиотарамиты и магнезиокатофориты кристаллизуются первыми, а магнезиогастингситы присоединяются к ним на следующих стадиях процесса.

Натриевые амфиболы (ферринибейты) являются главными породообразующими минералами ксенолитов, а в лампрофирах, карбонатитах и карбонатитовых туфах они встречаются редко, составляя не более 1% от общего количества амфиболов в породе. По соотношению главных компонентов ферринибейты комплементарны Na-Са-амфиболам (рис. 9). Анализ корреляционных связей между компонентами амфиболов показывает, что Na-амфиболы образуют единый изоморфный ряд с Na-Са-амфиболами в соответствии со схемой $NaAl \leftrightarrow CaMg$ в противовес Са-амфиболам, вариации химизма которых в значительной степени связаны с замещением $NaSi \leftrightarrow TiK$ (рис. 10).

Ксенолиты по определению образования более ранние, чем вмещающие их карбонатитовые брекчии, следовательно, можно предположить, что слагающие их ферринибейты также являют-

ся наиболее ранними членами установленного ассоциативного ряда. Целенаправленные исследования ксенолитов на электронном микроскопе позволили получить убедительные доказательства сделанного предположения. В амфибол-плагиоклазовой породе (обр. 908-СЗ-717) были обнаружены кристаллы Na-Са-амфибола, выполняющие пространство между ранее образовавшимися призматическими кристаллами породообразующего ферринибейта (рис. 11). На снимке отчетливо видно, что агрегат кристаллов Na-Са-амфиболов выполняет промежутки между ранее образовавшимися призматическими кристаллами Na-амфибола.

Таким образом, можно резюмировать, что амфиболы Орто-Ыаргинского поля образуют эволюционный ряд, представленный следующей последовательностью минеральных видов:



Обсуждение результатов

Амфиболы практически всегда присутствуют в карбонатитах и генетически связанных с ними интрузивных образованиях. Так в породах щелочно-ультраосновных с карбонатитами

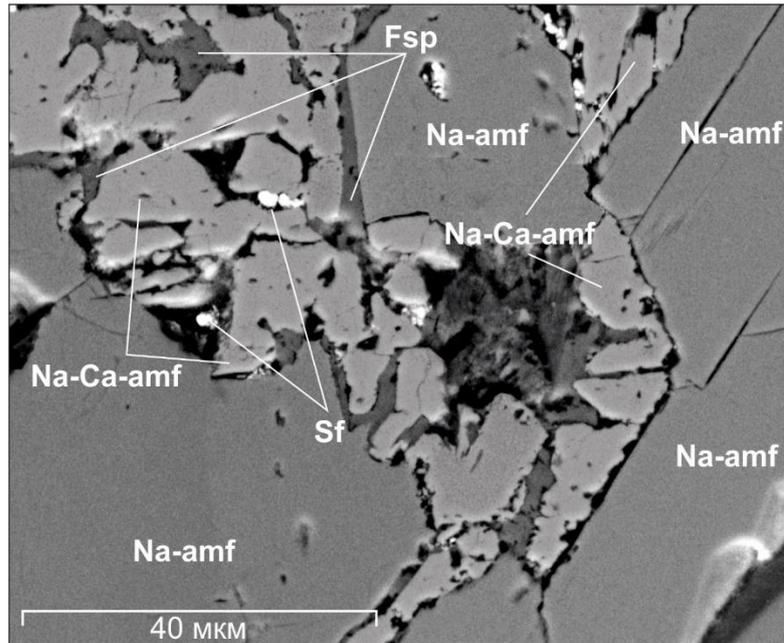


Рис. 11. Электронное изображение (BSE) фрагмента полированной поверхности ксенолита амфиболовой породы из трубки Ан-57/64 (обр. 908-С3-717)

Fig. 11. Electron image (BSE) of the fragment of polished surface of amphibole rock xenolith from the pipe An-57/64 (sample 908-С3-717)

массивов Кольского полуострова эволюционный тренд амфиболов представлен последовательностью: *Al-Ti-магнезиогастингсит* → *магнезокатофорит* → *рихтерит* → *магнезиоарфведсонит* [19, 24, 26]. Для лампрофир-нефелинит-карбонатитовой серии Амбра Донгар, Деккан, Индия установлен *керсутит* → *гастингсит* → *рибекитовый ряд амфиболов* [29]. В пироксенит (амфиболит)-карбонатитовом комплексе Аргор, Онтарио, Канада амфиболы эволюционируют от феррипаргасита-магнезиогастингсита до магнезиоарфведсонита [42]. В приведенных примерах вариации составов амфиболов, несмотря на различия в минеральных видах, связаны с последовательным замещением кальция натрием в их кристаллических решетках. В породах Орто-Благинского поля мы наблюдаем прямо противоположную картину – на ранних стадиях процесса появляются натриевые разновидности амфиболов, на заключительных – кальциевые. В чем причина появления такого реверсивного тренда?

Активность Na в щелочно-ультраосновных расплавах, как известно, во многом определяется уровнем насыщения системы SiO₂. В случае недостатка кремнекислоты и при соответствующих содержаниях Al₂O₃ натрия преимущественно входит в структуру нефелина в ущерб Fe-Mg-силикатам, что, в частности, приводит к появлению Ca-амфиболов (гастингситы, паргаситы, керсутиты) и кальциевых же пироксенов

геденбергитового ряда в щелочных пироксенитах, ийолитах, мельтейгитах, нефелиновых сиенитах [9, 50]. Кристаллизация нефелина практически не меняет соотношение Al и щелочей в остаточном расплаве поскольку (Na+K)/Al (мол. отношение) в нем примерно равно единице. Фемические минералы (гастингситы, геденбергиты) напротив некомпенсированно усваивают Al, что сдвигает остаточный расплав в область агпайтовых [(Na+K)>Al] составов, создавая благоприятные условия для кристаллизации Na-амфиболов и пироксенов. В «закрытой системе» результатом такого процесса являются каймы Na-амфиболов на Ca- и Na-Ca-амфиболов [24, 43]. В случае, когда фемическая фаза активно удаляется из кристаллизующегося расплава, остаточная жидкость эволюционирует в направлении лейкократового фойейта с эгирином и арфведсонитом [4].

В насыщенной SiO₂ щелочной системе потенциальными концентраторами Na являются фемические минералы (пироксены, амфиболы) и полевые шпаты. В общем случае, как показано еще Боуэном [23], полевой шпат, кристаллизующийся из силикатной системы, содержащей Ca, имеет состав плагиоклаза. Однако, в присутствии CO₂ в щелочных жидкостях могут проявиться реакции типа



[15, 21]. Будучи связанным в составе карбонатного комплекса Са не может входить в структуру плагиоклаза, что в конечном итоге приводит к появлению на ликвидусе чистого альбита. Отсутствие свободного кальция в магматической жидкости может также явиться и причиной ранней кристаллизации натровых амфиболов и/или пироксенов. Реализация такого сценария предполагает образование пород, по крайней мере на начальных стадиях процесса, в которых ранние, обладающие идиоморфным габитусом, кристаллические фазы представлены альбитом и Na-амфиболом/пироксеном, а поздние – ксеноморфными кристаллами карбонатных минералов. В породах Орто-Ыаргинского поля есть разности с такими структурно-вещественными характеристиками: амфибол-альбитовые и амфиболовые породы ксенолитов, являющиеся самыми ранними членами исследуемой ассоциации (рис. 5).

Структурные взаимоотношения между минералами ксенолитов не только свидетельствуют о ведущей роли CO_2 в экстракции Са и перераспределении Na в щелочном расплаве, но дают веские основания рассматривать ксенолиты как породы, возникшие в результате оседания кристаллов из магмы. В данном контексте Na-амфибол (ферринибейт) и альбит являются кумулюсными фазами, а карбонатные минералы и Na-Са-амфибол представляют собой посткумуляный парагенезис (рис. 5, 11). К посткумуляным фазам следует относить и апатит (рис. 5), однако наличие включений этого минерала в кристаллах альбита и ферринибейта свидетельствует о более широком диапазоне параметров его кристаллизации. Отсутствие зональности в кристаллах кумулюсного и посткумуляного парагенезисов указывает на близкие к равновесным и, следовательно, растянутые во времени условия кристаллизации породы в целом. Подобные процессы возможны в крупных, медленно остывающих интрузивах либо в небольших, но расположенных на достаточной для поддержания термостатического эффекта глубине камерах.

Кальцит, доломит, Na-Са-амфибол и апатит, слагающие посткумуляный парагенезис ксенолитов, являются основными породообразующими минералами лампрофиров и карбонатитовых брекчий. Можно предположить, что и лампрофиры и карбонатиты относятся к продуктам кристаллизации остаточных жидкостей, образовавшихся при фракционировании из исходного щелочного расплава минералов, слагающих ксенолиты – ферринибейта, альбита и флогопита. Для проверки этого предположения мы совместили средние составы лампрофиров и кар-

бонатитов Орто-Ыаргинского поля (табл. 1) на вариационных диаграммах (рис. 12). Тренды эволюции исследуемых пород проецируются на площадь треугольника, образованного минералами ксенолитов, что, как известно, является характерным признаком серий пород, связанных с процессами фракционирования в системе кристалл–расплав. Детальный анализ диаграмм позволяет также утверждать, что удалялись из расплава все три минерала одновременно, но при главенствующей роли ферринибейта.

Диаграммы (рис. 12) позволяют сделать некоторые замечания относительно параметров исходного расплава, кристаллизационная эволюция которого приводит к появлению исследуемой серии пород. В рамках обсуждаемой модели область составов исходных жидкостей должна располагаться на эволюционном тренде между карбонатитами и кумулюсными минералами ксенолитов. В интервал возможных составов, как видно, попадают сами лампрофиры и более кремнекислые жидкости, располагающиеся вблизи треугольника излучения. Петрографические особенности лампрофиров – порфирировая структура, значительные вариации количественных соотношений вкрапленников различных минералов, отсутствие вкрапленников ферринибейта – свидетельствуют о их довольно длительной кристаллизационной истории и, соответственно, не позволяют отождествлять их валовый состав с составом исходного расплава. Более приемлемой для этой роли выглядит область составов, располагающаяся на диаграммах между лампрофирами и треугольником излучения. Граничными значениями концентраций основных оксидов для этой области являются: $\text{SiO}_2=40-42\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3=7-8\%$, $\text{MgO}=10\%$, $\text{CaO}=5-7\%$, $\text{Na}_2\text{O}\sim 1\%$, $\text{K}_2\text{O}=2-4\%$.

Лампрофировые и карбонатитовые жидкости, образующиеся при фракционировании ферринибейта, флогопита и альбита из исходного проторасплава, отделяясь от кумулата, застывают в верхних слоях литосферы в виде трубок взрыва, но с равной степенью вероятности могут подвергаться кристаллизационной дифференциации в промежуточных камерах. Ликвидусными в данном случае, по всей видимости, будут минералы порфирировых вкрапленников – Na-Са-амфибол ряда магнезиотарамит–магнезиокатофорит, диопсид, оливин для первых и амфибол и диопсид для вторых. Реальность такого сценария иллюстрирует график варьирования Са и Mg в трубках исследуемого поля (рис. 13). Как видно, содержания оксидов и в карбонатитах, и в лампрофирах обнаруживают обратную корреляционную зависимость, хорошо вписываясь в модель фракционирования Fe-

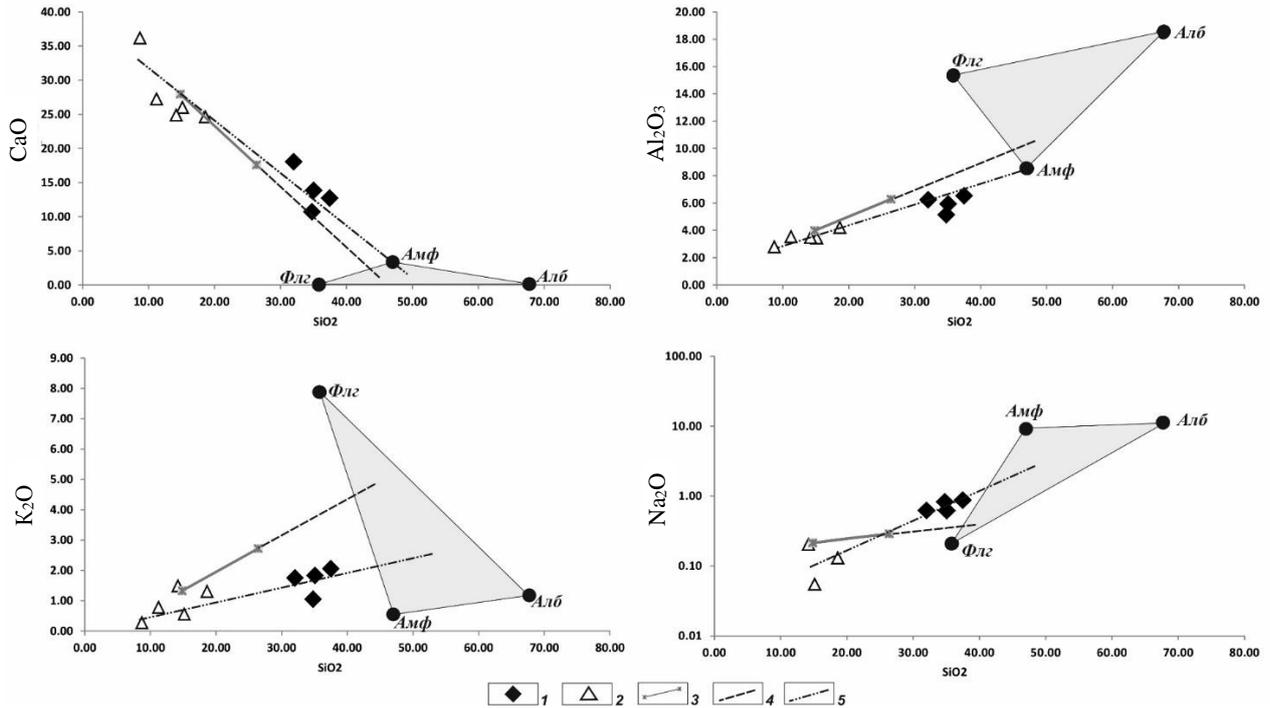


Рис. 12. Возможные пути кристаллизации гипотетического исходного расплава при условии, что из него кристаллизуется минеральный парагенезис амфиболовых ксенолитов: 1 – средние (по трубкам) составы лампрофиров; 2 – средние (по трубкам) составы карбонатитов; 3 – средние составы лампрофиров и карбонатитов диатремы Ан-34/64; 4 – линия эволюции расплава для поля в целом; 5 – линия эволюции расплава для поля в целом (in total). Точки составов минералов ксенолитов – ферринибейта (*Амф*), флогопита (*Флг*) и альбита (*Алб*) образуют так называемый треугольник извлечения

Fig. 12. Possible ways of crystallization of hypothetical initial melt provided that mineral paragenesis of amphibole xenoliths crystallizes from it: 1 – average (pipes) compositions of lamprophyres; 2 – average (pipes) compositions of carbonatites; 3 – average compositions of lamprophyres and carbonatites of An-34/64 diatreme; 4 – the evolution line of An-34/64 diatreme melt; 5 – the evolution line of the melt for the field on the whole (in total). The dots of compositions of xenoliths minerals – ferrinyboite (*Amf*), phlogopite (*Phl*) and albite (*Alb*) form the so called extraction triangle

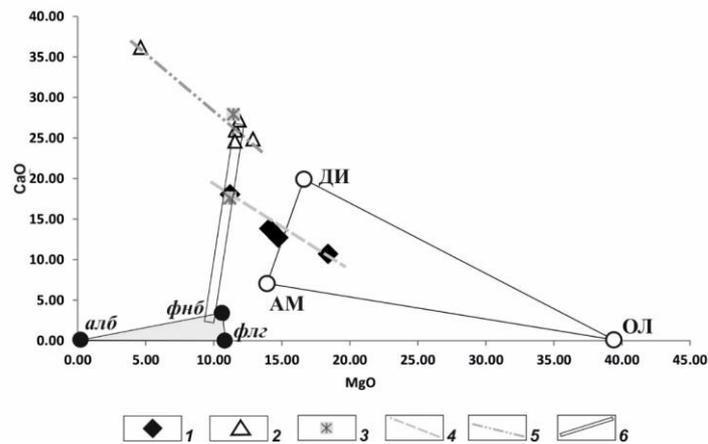


Рис. 13. Вариации содержаний CaO и MgO (мас. %) в породах Орто-Яргинского поля: 1 – средние (по трубкам) составы лампрофиров; 2 – средние (по трубкам) составы карбонатитов; 3 – средние составы лампрофиров и карбонатитов диатремы Ан-34/64; 4 – линия эволюции составов лампрофировых трубок; 5 – линия эволюции составов карбонатитовых трубок; 6 – линия эволюции исходного расплава, из которого экстрагировались минералы кумулюсного парагенезиса – ферринибейт (*фиб*), флогопит (*флг*) и альбит (*алб*). Заглавными буквами обозначены точки составов ликвидусных минералов лампрофиров – Na-Ca-амфибол ряда магнезиотарамит–магнезиокатофорит (АМ), диопсид (ДИ), оливин (ОЛ)

Fig. 13. Variations of CaO and MgO (wt%) contents in the rocks of Orto-Yarginskoe field: 1 – average composition (pipes) of lamprophyres; 2 – average (pipes) composition s of carbonatites; 3 – average compositions of lamprophyres and carbonatites of An 34/64 diatreme; 4 – the evolution line of the lamprophyre pipes compositions; 5 – the evolution line of carbonatite pipes compositions; 6 – the evolution line of the initial melt from which the minerals of cumulus paragenesis were extracted – ferrinyboite (*phnb*), phlogopite (*phl*) and albite (*alb*). Capital letters are the compositions of liquidus lamprophyre minerals – Na-Ca-amphibole of magnesiотарамит – magnesiocataphorite (AM), diopside (DI), olivine (OL) series

Mg-силикатов. Особо следует подчеркнуть разобщенность в пространстве кристаллизационных трендов карбонатитов и лампрофиров, что лишний раз подтверждает тезис о существовании двух самостоятельных порций расплава карбонатитового и лампрофирового составов, способных эволюционировать независимо друг от друга.

Практически во всех разновидностях пород Орто-Ыаргинского поля устанавливается совместное присутствие Na-Ca- и Ca-амфиболов, образующих не пересекающиеся в признаковом пространстве кристаллизационные тренды (рис. 10). Что это – свидетельство существования разрыва смесимости в изоморфном ряду составов или отражение кинетических особенностей кристаллизации пород данной ассоциации?

В лампрофирах и карбонатитах Ca- и Na-Ca-амфиболы присутствуют в виде дискретных однородных идиоморфных кристаллов с четкими прямолинейными гранями. Такие морфологические признаки скорее свидетельствуют в пользу одновременной кристаллизации этих минеральных видов, нежели последовательного их образования в процессе фракционирования. Поскольку составы рассматриваемых Ca- и Na-Ca-амфиболов незначительно сдвигаются относительно коноды магнезиокатофорит–магнезиогастингсит (рис. 14), можно сделать вывод, что основным вектором, на котором располагается

область разрыва смесимости, является Na-Ca-Si-ось замещения.

Разрыв смесимости в ряду Na-Ca- и Ca-амфиболов предполагает их равновесную кристаллизацию, что должно сопровождаться равновесным же распределением Fe^{2+} -Mg и Fe^{3+} -Al между магнезиогастингситами и магнезиокатофоритами. Параметры распределения величин $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ и $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Al^{VI})$ в амфиболах трубчатых тел Ан-3/11, Ан-50/64 и Ан-49/64 подтверждают сказанное – на вариационных диаграммах амфиболы обоих видов образуют субпараллельные коноды, комплементарные конодам Na-Ca- и Ca-амфиболов с разрывом смесимости из других породных парагенезисов (рис. 15, А).

В породах трубчатых тел Ан-34/64 и Ан-57/64 сосуществующие амфиболы обнаружили иной характер распределения Fe^{2+} -Mg и Fe^{3+} -Al, что выразилось в противоположной ориентировке конод (рис. 15, Б). Эта особенность, как оказалось, коррелируется с повышенной калиевостью самих пород Ан-34/64 и Ан-57/64 (табл. 1), а также с пониженными барическими показателями входящих в их состав Ca-амфиболов (табл. 3). Перечисленное без сомнения свидетельствует о длительной истории дифференциации магматических субстратов, выразившейся в обогащении остаточных порций расплава К и их

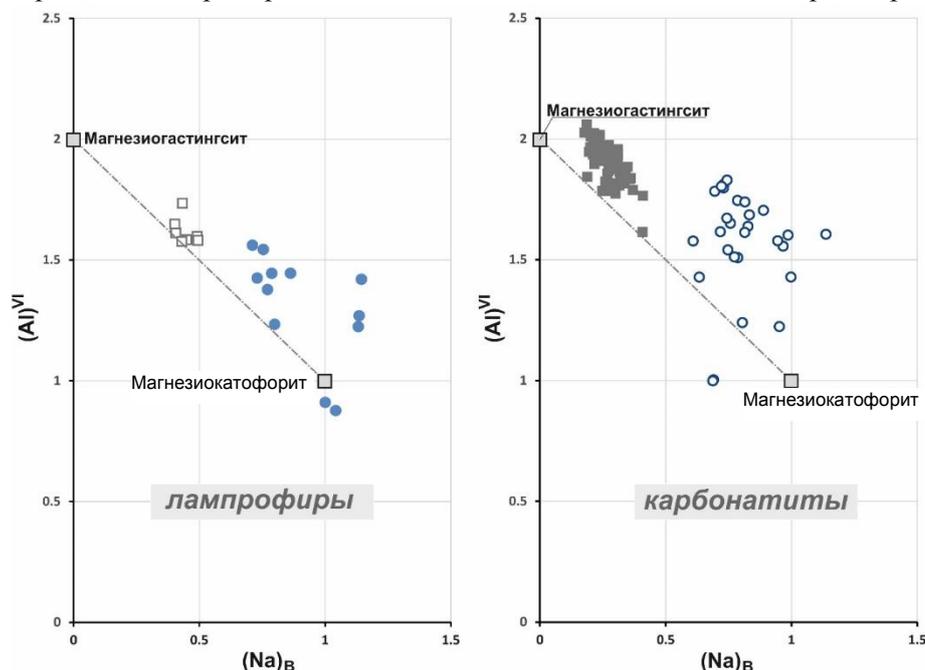


Рис. 14. Вариации параметров $Na(B)$ и Al^{VI} в сосуществующих Na-Ca- и Ca-амфиболах лампрофиров и карбонатитов Орто-Ыаргинского поля

Fig. 14. Variations of $Na(B)$ and Al^{VI} parameters in coexisting Na-Ca- and Ca-amphiboles from lamprophyres and carbonatites of Ort-Yarginskoe field

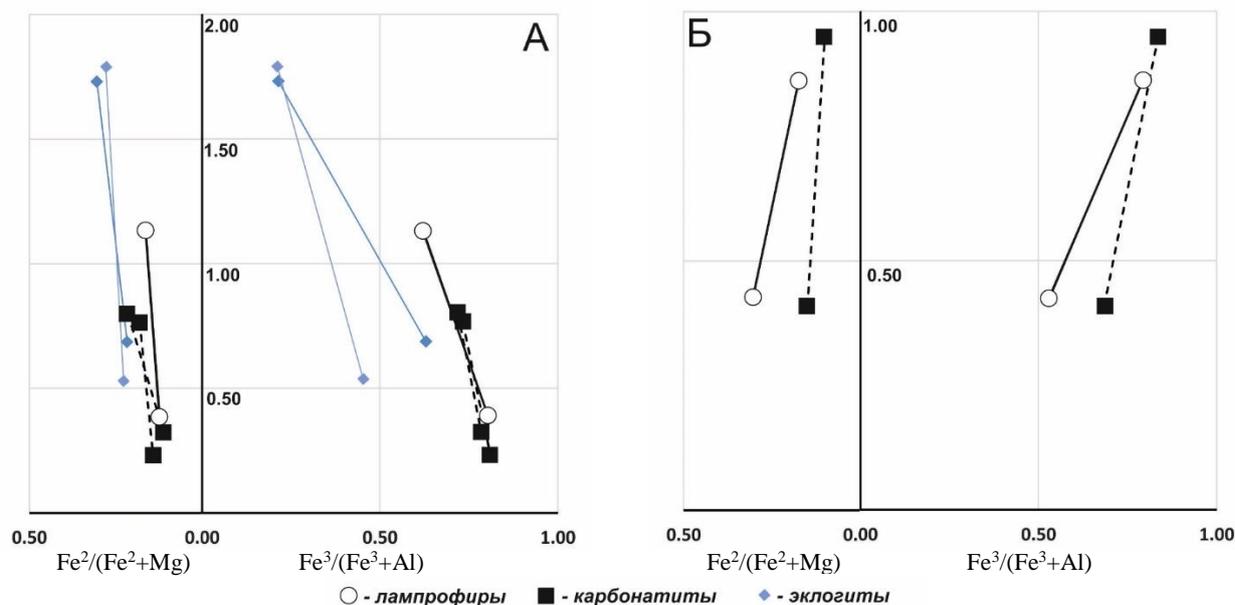


Рис. 15. Вариации параметров Na(B), $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ и $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Al^{VI})$ в сосуществующих Na-Ca- и Ca-амфиболах: А – средние составы амфиболов лампрофиров тела Ан-3/11 и карбонатитов тел Ан-50/64 и Ан-49/64. Для сравнения показаны средние составы сосуществующих Na- и Ca-амфиболов эклогитов [41, 45, 46]; Б – средние составы амфиболов лампрофиров тела Ан-34/64 и карбонатитов тела Ан-57/64

Fig. 15. Variations of Na(B), $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ and $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Al^{VI})$ parameters in the coexisting Na-Ca-amphiboles. A – average compositions of amphiboles from lamprophyres of An-3/11 pipe, and carbonatites of An-50/64 and An-49/64 pipe. Average compositions of coexisting Na- and Ca-amphiboles from eclogites [41, 45, 46] are shown for comparison; B – average compositions of amphiboles from lamprophyres of An-34/64 pipe and carbonatites of An-57/64 pipe

Т а б л и ц а 3

**Бимодальные лампрофир-карбонатитовые комплексы мира
Bimodal lamprophyre-carbonatite complex of the world**

Порода	Тело	[30]	[31]	[34]	[44]
Лампрофир	Ан-3/11	6,41	6,40	4,91	6,41
Карбонатит	Ан-49/64	6,58	6,60	5,06	6,58
Карбонатит	Ан-50/64	7,08	7,19	5,50	7,08
Лампрофир	Ан-34/64	5,95	5,86	4,50	5,95
Карбонатит	Ан-57/64	5,90	5,80	4,46	5,90

подъеме на субвулканический приповерхностный уровень. При таком развитии событий сосуществующие Na-Ca- и Ca-амфиболы в породах рассматриваемых тел скорее являются составными частями ликвидусного и солидусного парагенезисов, нежели свидетельством разрыва смешимости. Косвенным подтверждением сказанному является уже обсуждавшийся факт отсутствия Ca-амфиболов в карбонатитовых туфах.

Бимодальные, сложенные исключительно породами лампрофирного и карбонатитового семейства, комплексы пользуются весьма ограниченным распространением в геологических структурах. Согласно [52], на их долю приходится около 3,5 % от общего числа карбонатитовых проявлений (18 из 527). Если отбросить

комплексы, в породах которых присутствуют модальные нефелин и/или мелилит (минералы, отсутствующие в Орто-Бургинском поле), их количество сокращается до 1,5 % (8 из 527). Лампрофир-карбонатитовые комплексы обнаружены в стабильных структурах практически всех континентов, время их формирования охватывает интервал от протерозоя до мела включительно (табл. 4). Примечательно, что в большинстве случаев лампрофир-карбонатиты синхронны кимберлитам, в том числе продуктивным, локализованным на сопредельных территориях.

Так к северу от комплекса Бруккарос располагается кимберлитовое поле Гибсон мелового же (71,5 млн. лет) возраста [36]. Кимберлиты не алмазоносные, однако, содержат пурпурный

Бимодальные лампрофир-карбонатитовые комплексы мира
Bimodal lamprophyre-carbonatite complexes of the world

№ п/п	Массив (комплекс)	Страна, структура	Возраст, млн. лет	Геолого-петрографическая характеристика	Литература
1	Бруккарос	Намибия, Южно-Африканский кратон	75	Комплекс радиально расположенных даек (~100) и диатрем (74) карбонатитов и силикокарбонатитов (лампрофиров). В южной части комплекса располагается карбонатит-лампрофирный лаколит Блю Хиллс	[8, 38]
2	Валлоувэй	Австралия, кратон Гаулер	170	Пять даек и два штока, сложенные лампрофирами и карбонатитами. Породы на 50–80 % состоят из карбонатных минералов, силикатная часть (20 %) представлена флогопитом, оливином, пироксеном	[49]
3	Кандалакша	Россия, Восточно-Европейский кратон	368–360	Дайки и трубки взрыва лампрофиров и карбонатитов на островах Еловый, Олений и Телячий. Фемические минералы лампрофиров – диопсид, флогопит, оливин, редко амфибол, карбонатитов – диопсид, редко амфибол и флогопит	[22]
4	Арвида	Канада, кратон Супериор	546	Дайки от нескольких см до 1 м мощностью и протяженностью несколько десятков метров. Сложены либо лампрофирами (первоначально классифицированы как кимберлиты), либо карбонатитами. Силикатная часть представлена оливином (тальковые псевдоморфозы), флогопитом, акцессории – апатит, магнетит	[28]
5	Торнгат	Канада, кратон Супериор	584–550	Дайковый комплекс, в составе которого преобладают ультраосновные породы оливин-флогопитовой серии, содержащие различные количества первичного карбоната. По соотношению этих компонентов выделяются айликитовые, мелалаайликитовые и карбонатитовые разности	[46]
6	Айлик Бэй	Канада, Северо-Атлантический кратон	590–555	Дайки лампрофиров и карбонатитов локализованы на площади 30x30 км вокруг залива Айлик Бэй. В отдельных дайках фиксируются переходы от лампрофиров к карбонатитам. Фемические минералы лампрофиров – флогопит и оливин, карбонатитов – флогопит, оливин, диопсид	[48]
7	Сарфарток	Гренландия, Северо-Атлантический кратон	600	Комплекс состоит из центрального ядра (~15 км ²), сложенного флогопит- и амфиболсодержащими магнезиокарбонатитами и окружающего его роя конических тел и даек карбонатитов и лампрофиров	[39]
8	Кайликс	Швеция, Балтийский щит	1142	Рой даек (~100 штук) меридионального простирания, мощностью 5–20 см редко до 1 м, варьирующих по составу от лампрофиров до карбонатитов. Минеральный состав – доломит, кальцит, флогопит, пироксен, амфибол, серпентин (по оливину)	[35]
9	Магнет Хейтс	ЮАР, Южно-Африканский кратон	1359–1150	Одна карбонатитовая дайка и пять диатрем лампрофирного состава	[51]

пироп, пикроильменит и хромит [40]. Лампрофир-карбонатиты Валлоувэй в северном и западном направлениях сменяются разновозрастными (170 млн. лет) кимберлитовыми дайками Оррорро. Во всех дайках обнаружены алмазы, но не в промышленных концентрациях [32, 33]. Восточнее лампрофиров и карбонатитов Кандалакшского залива, на Терском берегу, найдены слабоалмазоносные кимберлиты (Ермаковская группа трубок) возрастом 360–340 млн. лет [18]. Венд-кембрийских кимберлитов в Гренландии

пока не обнаружено, но в русловых отложениях р. Сарфарток было найдено несколько тысяч алмазов, один из которых размером 2,5 карата долгое время являлся крупнейшим алмазом Гренландии [53]. В 2008 г. в этом же районе в дайке, состав которой не уточняется, обнаружен алмаз ювелирного качества массой около 4,0 карат [3]. На восточном побережье Канады в районе распространения лампрофир-карбонатитовых комплексов алмазы были найдены в ультрамафических дайках фьорда Абловиак, что

позволило [25] высказать предположение о существовании кембрийской алмазоносной провинции на северо-востоке североамериканского континента. В ЮАР к западу от лампрофиров и карбонатитов Магнет Хейтс располагаются кимберлиты поля Претория (трубка Премьер), имеющие возраст около 1250–1200 млн. лет [27]. Природа такой «удаленной» связи пока не ясна, однако, сам факт ее существования позволяет предполагать наличие мезозойских (юрских) кимберлитов с продуктивными содержаниями алмазов на сопредельных с Орто-Бяргинским полем территориях.

Выводы

1. Детальное изучение петрографии и минералогии пород десяти наиболее типичных трубчатых тел Орто-Бяргинского поля показало, что они относятся к лампрофир(айлики)-карбонатитовому типу породных парагенезисов, в составе которых отсутствуют кимберлиты.

2. Амфиболы, являющиеся непрременной составляющей всех разновидностей пород поля, а также встречающихся в них ксенолитов, образуют эволюционный ряд, представленный следующей последовательностью минеральных видов: *ферринибейт* → *магнезиотарамит* + *магнезиокатофорит* → *магнезиогастингсит*. Появление натровых амфиболов на ранних стадиях кристаллизации обусловлено значительными количествами CO₂ в насыщенном SiO₂ исходном расплаве.

3. Лампрофиры и карбонатиты являются продуктами кристаллизации остаточных жидкостей, образующихся при фракционировании ферринибейта из исходного щелочного расплава. Состав исходного расплава ограничен следующими значениями концентраций основных оксидов: SiO₂=40–42 %, Al₂O₃=7–8 %, MgO=10 %, CaO=5–7 %, Na₂O~1 %, K₂O=2–4 %.

4. Во всех разновидностях пород Орто-Бяргинского поля устанавливается совместное присутствие Na-Ca- и Ca-амфиболов, образующих не пересекающиеся в признаковом пространстве кристаллизационные тренды. Морфологические и химические характеристики этих амфиболов позволяют предполагать существование разрыва смесимости в изоморфном ряду магнезиокатофорит–магнезиогастингсит.

5. Становление лампрофир-карбонатитовых серий, как правило, сопровождается синхронным по времени кимберлитовым магматизмом на сопредельных территориях, что позволяет предполагать наличие мезозойских (юрских) кимберлитов с продуктивными содержаниями алмазов в северном сегменте восточного склона Анабарского поднятия.

Литература

1. Бабушкина С.А., Алтухова З.А., Зайцев А.И. Вещественный состав и изотопия пород трубки Запретная, Орто-Бяргинское поле Якутской алмазоносной провинции // Руды и металлы. 2012. № 5. С. 63–67.
2. Василенко В.Б., Зинчук Н.Н., Кузнецова Л.Г., Минин В.А., Холодова Л.Д. Средние составы кимберлитовых тел Вилуйской субпровинции как основа для формационной идентификации кимберлитов // Вестник ВГУ. 2006. № 2. С. 126–140.
3. Волков А.В., Галямов А.Л. Перспективы горнодобывающей промышленности в Гренландии // Арктика: экология и экономика. 2016. № 2 (22). С. 24–34.
4. Гиттинс Дж. Фельдшпатоидные щелочные породы // Эволюция изверженных пород (ред. Йодер Х.). М.: Мир, 1983. С. 344–381.
5. Готтам И.А., Пушкарев Е.В. Геологические данные о магматической природе горнблендитов в габбро-ультрамафитовых комплексах Урало-Аляскинского типа // Литосфера. 2009. № 2. С. 78–86.
6. Зайцев А.И., Смелов А.П. Изотопная геохронология пород кимберлитовой формации Якутской провинции / ИГАБМ СО РАН. Якутск, 2010. 108 с.
7. Ковальский В.В., Никишов К.Н., Егоров О.С. Кимберлитовые и карбонатитовые образования восточного и юго-восточного склонов Анабарской антеклизы. М.: Наука, 1969. 268 с.
8. Курцилаукис С., Франц Л. Петрология, геохимия и эволюция ультраосновного карбонатитового комплекса Блю Хиллс (Южная Намибия) // Геология и геофизика. 1997. Т. 38, №1. С. 51–66.
9. Кухаренко А.А., Орлова М.П., Булах А.Г. и др. Каледонский комплекс ультраосновных щелочных пород и карбонатитов Кольского полуострова и Северной Карелии. М.: Недра, 1965. 550 с.
10. Лелюх М.И., Стаднюк В.Д., Минченко Г.В. К вопросу о поисках коренных источников в северной части Якутской алмазоносной провинции // Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов. Мирный, 1998. С. 264–266.
11. Маршинцев В.К. Карбонатитовые образования восточного склона Анабарского сводного поднятия. Якутск, 1974. 120 с.
12. Милашев В.А. Трубки взрыва. Л.: Недра, 1984. 268 с.
13. Минин В.А. Особенности состава пироксенов габбро и уртитов Кия-Шалтырского массива (Кузнецкий Алатау) // Геология и геофизика. 1991. 37. С. 92–99.

14. Минин В.А., Гринев О.М. Распределение РЗЭ в нефелинах и некоторые вопросы генезиса нефелинсодержащих пород Саяно-Алтайской горной области // Вопросы геологии и палеонтологии Сибири. Томск: изд. НТЛ, 1997. С. 149–154.
15. Мюллер Р., Саксена С. Химическая петрология. М.: Мир, 1980. 520 с.
16. Номенклатура амфиболов: Доклад подкомитета по амфиболам и названиям минералов Международной минералогической ассоциации (КНММ ММА) // Записки ВМО. 1997. № 6. С. 82–102.
17. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. 200 с.
18. Поляков И.В., Калинин М.М. Алмазы и минералы-спутники в кимберлитах и рыхлых отложениях Терского берега Кольского полуострова // Записки ВМО. 1993. Ч. 122, вып. 1. С. 96–101.
19. Самойлов В.С., Гормашева Г.С. Щелочные амфиболы карбонатитов и генетически связанных с ними пород // Записки ВМО. 1975. Вып. 2. С. 145–159.
20. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Ред. Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин. М.: Наука / Интерпериодика, 2001. 571 с.
21. Уайли П. Дж., Тампл О.Ф. Система CaO–CO₂–H₂O и происхождение карбонатитов // Вопросы теоретической и экспериментальной петрологии. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. С. 66–148.
22. Beard A.D., Downes H., Vetrin V., Kempton P.D., Maluski H. Petrogenesis of Devonian lamprophyre and carbonatite minor intrusions, Kandalaksha Gulf (Kola Peninsula, Russia) // Lithos. 1996. 39. P. 93–119.
23. Bowen N.L. Phase equilibria bearing on the origin and differentiation of alkaline rocks // Am. J. Sci. 1945. 243A. P. 75–89.
24. Chakhmouradian A.R., Zaitsev A.N. Calcite-amphibole-clinopyroxene rock from the Afrikanda complex, Kola Peninsula (Russia): mineralogy and a possible link to carbonatites. III. Silicate minerals // Canadian Mineralogist. 2002. V. 40. P. 1347–1374.
25. Digonnet S., Goulet N., Bourne J., Stevenson R., Archibald D. Petrology of the Abloviak aillikite dykes, New Quebec: evidence for a Cambrian diamondiferous alkaline province in northeastern North America // Canadian Journal of Earth Sciences. 2000. 37. P. 517–533.
26. Dunworth E.A., Bell K. The Turiy Massif, Kola Peninsula, Russia: mineral chemistry of an ultramafic-alkaline-carbonatite intrusion // Mineral. Mag. 2003. V. 67(3). P. 423–451.
27. Field M., Stiefenhofer J., Robey J., Kurszlauskis S. Kimberlite-hosted diamond deposits of southern Africa: a review // Ore Geology Reviews. 2008. V. 34, N ½. P. 33–75.
28. Gittins J., Hewins R.H., Laurin A.F. Kimberlitic-carbonatitic dikes of the Saguenay River Valley, Quebec, Canada // Physics and Chemistry of the Earth. 1978. V. 9. P. 137–148.
29. Gwalani L.G., Rock N.M.S., Chang W.-J., Fernandez S., Allegre C.J., Prinzhofer A. Alkaline rocks and carbonatites of Ambra Dongar and adjacent areas, Deccan igneous province, Gujarat, India: 1. Geology, petrography and petrochemistry // Mineral. Petrol. 1993. 47. P. 219–253.
30. Hammarstrom J.M., Zen E. Aluminum in hornblende: an empirical igneous geobarometer // American Mineralogist. 1986. 71. P. 1297–1313.
31. Hollister L.S., Grissom G.C., Peters E.K., Stowell H.H., Sisson V.B. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons // American Mineralogist. 1987. V. 72. P. 231–239.
32. Jaques A.L. 2002. Australian diamond deposits, kimberlites, and related rocks. 1:5 million map. Geoscience Australia. www.ga.gov.au/pdf/RR0114.pdf.
33. Jaques A.L., Milligan P.R. Patterns and controls on the distribution of diamondiferous intrusions in Australia // Lithos. V. 77, iss. 1–4. P. 783–802 (September 2004) Selected Papers from the Eighth International Kimberlite Conference. V. 2: The J. Barry Hawthorne Volume.
34. Johnson M.C., Rutherford M.J. Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks // Geology. 1989. V. 17. P. 837–841.
35. Kresten P., A^ohman E. & Brunfelt A.O. Alkaline ultramafic lamprophyres and associated carbonatite dykes from the Kalix area, northern Sweden // Geologische Rundschau. 1981. 70. P. 1215–1231.
36. Kurszlauskis S., Franz L. and Lorenz V. On the volcanology of the Gibeon Kimberlite Field, Namibia // J. Volcanol. geotherm. Res. 1998. 84. P. 257–272.
37. Le Maitre RW Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2002. 236 p.
38. Lorenz V., Stachel T., Kurszlauskis S., Stanistreet I.G. Volcanology of the Gross Brukkaros Field, southern Namibia // Commun. geol. Surv. Namibia, 2000. 12. P. 395–401.
39. Mitchell R.H., Scott Smith B.H., Larsen L.M. Mineralogy of Ultramafic Dikes from Sarfartoq,

Sisimiut and Maniitsoq Areas, West Greenland. In: Proc VII Intern Kimb Conf. (eds) Gurney J.J., Gurney J.L., Pascoe M.D. and Richardson S.H. (Cape Town: Red Roof Design), 1999. P. 574–583.

40. *Nguno A.K.* Kimberlite indicator minerals of the Gibeon Kimberlite Province (GKP), southern Namibia: Their character and distribution in kimberlite intrusions and fluvial sediments // *Communs geol. Surv. Namibia*. 2004. 13. P. 33–42.

41. *Reynard B., Balleve M.* Coexisting amphiboles in an eclogite from the Western Alps: new constraints on the miscibility gap between sodic and calcic amphiboles // *J. Metamorph. Geol.* 1988. V. 6. P. 333–350.

42. *Sage R.P.* Geology of Carbonatite - Alkalic Rock Complexes in Ontario: Argor Carbonatite Complex, District of Cochrane; Ontario Geological Survey, 1988, Study 41. 90 p.

43. *Secher K., Larsen L.M.* Geology and mineralogy of the Sarfartôq carbonatite complex, southern West Greenland // *Lithos*. 1980. 13. P. 199–212.

44. *Schmidt M.W.* Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: An experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer // *Contrib. Mineral. and Petrol.* 1992. V. 110. P. 304–310.

45. *Smelik E.A., Veblen D.R.* Exsolution of Ca-amphibole from Gln and the miscibility gap between sodic and calcic amphiboles // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1992. V. 112. P. 178–195.

46. *Tappe S., Jenner G. A., Foley S. F., Heaman L. M., Besserer D., Kjarsgaard B. A., Ryan B.* Torngat ultramafic lamprophyres and their relation to the North Atlantic Alkaline Province // *Lithos*. 2004. 76. P. 491–518.

47. *Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Kjarsgaard B.A.* Integrating ultramafic lamprophyres into the IUGS classification of igneous rocks: rationale and implications // *J. Petrol.* 2005. V. 46, № 9. P. 1893–1900.

48. *Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Heaman L.M., Kjarsgaard B.A., Romer R.L., Stracke A., Joyce N., Hoefs J.* Genesis of Ultramafic Lamprophyres and Carbonatites at Aillik Bay, Labrador: a Consequence of Incipient Lithospheric Thinning beneath the North Atlantic Craton // *J. Petrol.* 2006. V. 47, № 7. P. 1261–1315.

49. *Tucker D. H., Collerson K. D.* Lamprophyric intrusions of probable carbonatitic affinity from South Australia // *Journal of the Geological Society of Australia*. 1972. 19:3. P. 387–391.

50. *Ulbrich H.H.G.J., Gomes C.B.* Alkaline rocks from Continental Brazil // *Earth-Science Reviews*. 1981. 17. P. 135–154.

51. *Verwoerd W.J.* Update on carbonatites of South Africa and Namibia // *S.Afr.J.Geol.* 1993. 96(3). P. 75–95.

52. *Woolley A.R., Kjarsgaard B.A.* Carbonatite Occurrences of the World: Map and Database / Geological Survey of Canada, Open File 5796, 1 CD-ROM + 1 map. 2008.

53. <https://zolotodb.ru/articles/foreign/10780>.

References

1. *Babushkina S.A., Altuhova Z.A., Zajcev A.I.* Veshchestvennyj sostav i izotopiya porod trubki Zapretnaya, Orto-Yarginskoe pole Yakutskoj amazonosnoj provincii // *Rudy i metally*. 2012. № 5. P. 63–67.

2. *Vasilenko V.B., Zinchuk N.N., Kuznecova L.G., Minin V.A., Holodova L.D.* Srednie sostavy kimberlitovyh tel Vilyujskoj subprovincii kak osnova dlya formacionnoj identifikacii kimberlitov // *Vestnik VGU*. 2006. № 2. P. 126–140.

3. *Volkov A.V., Galyamov A.L.* Perspektivy gornodobyvayushchej promyshlennosti v Grenlan-dii // *Arktika: ehkologiya i ehkonomika*. 2016. № 2 (22). P. 24–34.

4. *Gittins Dzh.* Fel'dshpatoidnye shchelochnye porodny. Evolyuciya izverzhenykh porod [Evolution of extrusive bodies]. M.: Mir Publ., 1983. P. 344–381.

5. *Gottam I.A., Pushkarev E.V.* Litosfera [Lithosphere]. 2009. № 2. P. 78–86.

6. *Zajcev A.I., Smelov A.P.* Izotopnaja geohronologija porod kimberlitovoj formacii Jakutskoj provincii [Isotopic geochronology of kimberlite formation rocks of Yakutia province] / IGABM SO RAN Publ. Yakutsk, 2010. 108 p.

7. *Koval'skij V.V., Nikishov K.N., Egorov O.S.* Kimberlitovye i karbonatitovye obrazovaniya vostochnogo i jugo-vostochnogo sklonov Anabarskoj anteklizy [Kimberlites and carbonatites of east and south-east slopes of Anabar antecline]. M.: Nauka Publ., 1969. 268 p.

8. *Kursclaukis S., Franc L.* Geologija i geofizika [Geology and Geophysics]. 1997. 38, № 1. P. 51–66.

9. *Kuharenko A.A., Orlova M.P., Bulah A.G. i dr.* Kaledonskij kompleks ul'traosnovnyh welochnykh porod i karbonatitov Kol'skogo poluostrova i Severnoj Karelii [The Caledonian complex of ultrabasic alkaline rocks and carbonatites of Kola Peninsula and Northern Karelia]. M.: Nedra, 1965. 550 p.

10. *Leljuh M.I., Stadnjuk V.D., Minchenko G.V.* Geologija, zakonomernosti razmeweniya, metody prognozirovaniya i poiskov mestorozhdenijalmazov [Geology, emplacement, prognosis and prospecting methods diamond deposits]. Mirny, 1998. P. 264–266.

11. *Marshincev V.K.* Karbonatitovye obrazovaniya vostochnogo sklona Anabarskogo svodnogo podnjatija [The carbonatites of east slope Anabar raising]. Yakutsk, 1974. 120 p.

12. *Milashev V.A.* Trubki vzryva [The explosion pipes]. L.: Nedra Publ., 1984. 268 p.
13. *Minin V.A.* Geologija i geofizika [Geology and Geophysics]. 1991. 37. P. 92–99.
14. *Minin V.A., Grinev O.M.* Voprosy geologii i paleontologii Sibiri [Geology and paleontology issues of Siberia]. Tomsk, 1997. P. 149–154.
15. *Mjuller R., Saksena S.* Himicheskaja petrologija [Chemical petrology]. M.: Mir, 1980. 520 p.
16. *Nomenklatura* amfibolov: Doklad podkomiteta po amfibolam i nazvaniyam mineralov mezhdunarodnoj mineralogicheskoy asociacii // Zapiski VMO. 1997. № 6. P. 82–102.
17. *Petrograficheskij* kodeks Rossii. Magmaticheskie, metamorficheskie, metasomaticheskie, impactnye obrazovaniya [Petrography code of Russia: igneous, metamorphic, metasomatic and impact rocks]. Saint-Petersburg: VSEGEI Publ., 2009. 200 p.
18. *Poljakov I.V., Kalinkin M.M.* Almazы i mineraly-sputniki v kimberlitah i ryhlyh otlozheniyah Terskogo berega Kol'skogo poluostrova // Zapiski VMO. 1993. № 122. Ch. 1. P. 96–101.
19. *Samojlov V.S., Gormasheva G.S.* Shchelochnye amfiboly karbonatitov i geneticheski svyazannyh s nimi porod // Zapiski VMO. 1975. № 2. P. 145–159.
20. *Tektonika*, geodinamika i metallogenija territorii Respubliki Saha (Yakutia) [Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Saha Republic (Yakutia)]. M.: Nauka/Interperiodika Publ., 2001. 571 p.
21. *Wyllie P.J., Tattl O.F.* Voprosy teoreticheskoy i jeksperimental'noj petrologii [Theoretical and experimental issues of petrology]. M.: Foreign Literature Press., 1963. P. 66–148.
22. *Beard A.D., Downes H., Vetrin V., Kempton P.D., Maluski H.* Petrogenesis of Devonian lamprophyre and carbonatite minor intrusions, Kandalaksha Gulf (Kola Peninsula, Russia) // Lithos. 1996. 39. P. 93–119.
23. *Bowen N.L.* Phase equilibria bearing on the origin and differentiation of alkaline rocks // Am. J. Sci. 1945. 243A. P. 75–89.
24. *Chakhmouradian A.R., Zaitsev A.N.* Calcite-amphibole-clinopyroxene rock from the Afrikanda complex, Kola Peninsula (Russia): mineralogy and a possible link to carbonatites. III. Silicate minerals // Canadian Mineralogist. 2002. V. 40. P. 1347–1374.
25. *Digonnet S., Goulet N., Bourne J., Stevenson R., Archibald D.* Petrology of the Ablviak aillikite dykes, New Que'bec: evidence for a Cambrian diamondiferous alkaline province in northeastern North America // Canadian Journal of Earth Sciences. 2000. 37. P. 517–533.
26. *Dunworth E.A., Bell K.* The Turiy Massif, Kola Peninsula, Russia: mineral chemistry of an ultramafic-alkaline-carbonatite intrusion // Mineral. Mag. 2003. V. 67(3). P. 423–451.
27. *Field M., Stiefenhofer J., Robey J., Kurszlauskis S.* Kimberlite-hosted diamond deposits of southern Africa: a review // Ore Geology Reviews. 2008. V. 34, N ½. P. 33–75.
28. *Gittins J., Hewins R.H., Laurin A.F.* Kimberlitic-carbonatitic dikes of the Saguenay River Valley, Quebec, Canada // Physics and Chemistry of the Earth. 1978. V. 9. P. 137–148.
29. *Gwalani L.G., Rock N.M.S., Chang W.-J., Fernandez S., Allegre C.J., Prinzhofer A.* Alkaline rocks and carbonatites of Ambra Dongar and adjacent areas, Deccan igneous province, Gujarat, India: 1. Geology, petrography and ptochemistry // Mineral. Petrol. 1993. 47. P. 219–253.
30. *Hammarstrom J.M., Zen E.* Aluminum in hornblende: an empirical igneous geobarometer // American Mineralogist. 1986. 71. P. 1297–1313.
31. *Hollister L.S., Grissom G.C., Peters E.K., Stowell H.H., Sisson V.B.* Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons // American Mineralogist. 1987. V. 72. P. 231–239.
32. *Jaques A.L.* 2002. Australian diamond deposits, kimberlites, and related rocks. 1:5 million map. Geoscience Australia. www.ga.gov.au/pdf/RR0114.pdf.
33. *Jaques A.L., Milligan P.R.* Patterns and controls on the distribution of diamondiferous intrusions in Australia // Lithos. V. 77, iss. 1–4. P. 783–802 (September 2004) Selected Papers from the Eighth International Kimberlite Conference. V. 2: The J. Barry Hawthorne Volume.
34. *Johnson M.C., Rutherford M.J.* Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks // Geology. 1989. V. 17. P. 837–841.
35. *Kresten P., A'hman E. & Brunfelt A.O.* Alkaline ultramafic lamprophyres and associated carbonatite dykes from the Kalix area, northern Sweden // Geologische Rundschau. 1981. 70. P. 1215–1231.
36. *Kurszlauskis S., Franz L. and Lorenz V.* On the volcanology of the Gibeon Kimberlite Field, Namibia // J. Volcanol. geotherm. Res. 1998. 84. P. 257–272.
37. *Le Maitre RW* Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2002. 236 p.
38. *Lorenz V., Stachel T., Kurszlauskis S., Stanistreet I.G.* Volcanology of the Gross Brukkaros Field, southern Namibia // Commun. geol. Surv. Namibia, 2000. 12. P. 395–401.
39. *Mitchell R.H., Scott Smith B.H., Larsen L.M.* Mineralogy of Ultramafic Dikes from Sarfartoq, Sisimiut and Maniitsoq Areas, West Greenland. In: Proc VII Intern Kimb Conf. (eds) Gurney J.J., Gurney J.L., Pascoe M.D. and Richardson S.H. (Cape Town: Red Roof Design), 1999. P. 574–583.

40. *Nguno A.K.* Kimberlite indicator minerals of the Gibeon Kimberlite Province (GKP), southern Namibia: Their character and distribution in kimberlite intrusions and fluvial sediments // *Communs geol. Surv. Namibia*. 2004. 13. P. 33–42.
41. *Reynard B., Ballevre M.* Coexisting amphiboles in an eclogite from the Western Alps: new constraints on the miscibility gap between sodic and calcic amphiboles // *J. Metamorph. Geol.* 1988. V. 6. P. 333–350.
42. *Sage R.P.* Geology of Carbonatite - Alkaline Rock Complexes in Ontario: Argor Carbonatite Complex, District of Cochrane; Ontario Geological Survey, 1988, Study 41. 90 p.
43. *Secher K., Larsen L.M.* Geology and mineralogy of the Sarfartôq carbonatite complex, southern West Greenland // *Lithos*. 1980. 13. P. 199–212.
44. *Schmidt M.W.* Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: An experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer // *Contrib. Mineral. and Petrol.* 1992. V. 110. P. 304–310.
45. *Smelik E.A., Veblen D.R.* Exsolution of Ca-amphibole from Gln and the miscibility gap between sodic and calcic amphiboles // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1992. V. 112. P. 178–195.
46. *Tappe S., Jenner G. A., Foley S. F., Heaman L. M., Besserer D., Kjarsgaard B. A., Ryan B.* Torngat ultramafic lamprophyres and their relation to the North Atlantic Alkaline Province // *Lithos*. 2004. 76. P. 491–518.
47. *Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Kjarsgaard B.A.* Integrating ultramafic lamprophyres into the IUGS classification of igneous rocks: rationale and implications // *J. Petrol.* 2005. V. 46, № 9. P. 1893–1900.
48. *Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Heaman L.M., Kjarsgaard B.A., Romer R.L., Stracke A., Joyce N., Hoefs J.* Genesis of Ultramafic Lamprophyres and Carbonatites at Aillik Bay, Labrador: a Consequence of Incipient Lithospheric Thinning beneath the North Atlantic Craton // *J. Petrol.* 2006. V. 47, № 7. P. 1261–1315.
49. *Tucker D. H., Collerson K. D.* Lamprophyric intrusions of probable carbonatitic affinity from South Australia // *Journal of the Geological Society of Australia*. 1972. 19:3. P. 387–391.
50. *Ulbrich H.H.G.J., Gomes C.B.* Alkaline rocks from Continental Brazil // *Earth-Science Reviews*. 1981. 17. P. 135–154.
51. *Verwoerd W.J.* Update on carbonatites of South Africa and Namibia // *S.Afr.J.Geol.* 1993. 96(3). P. 75–95.
52. *Woolley A.R., Kjarsgaard B.A.* Carbonatite Occurrences of the World: Map and Database / Geological Survey of Canada, Open File 5796, 1 CD-ROM + 1 map. 2008.
53. <https://zolotodb.ru/articles/foreign/10780>.

Поступила в редакцию 17.06.2018

Об авторах

МИНИН Владимир Алексеевич, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, <http://orcid.org/0000-0002-0438-2144>, minin@igm.nsc.ru;

ТОЛСТОВ Александр Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, директор, Научно-исследовательское геологическое предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО), 678170, Мирный, Чернышевское шоссе, 16, <http://orcid.org/0000-0002-6057-5987>, tolstovAV@alrosa.ru;

ЖМОДИК Сергей Михайлович, доктор геолого-минералогических наук, зав. лабораторией, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, <http://orcid.org/0000-0001-8095-4485>, zhmodik@igm.nsc.ru;

ЗЕМНУХОВ Алексей Леонидович, зам. главного геолога, ОАО «Алмазы Анабара», 677000, Якутск, ул. Кирова, 18, корпус "Б", zemnuchoval@alanab.ru.

About the Authors

MININ Vladimir Alekseevich, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Research Scientist, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3 Pr. Akademika Koptuyuga, Novosibirsk, 630090, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-0438-2144>, minin@igm.nsc.ru;

TOLSTOV Aleksandr Vasil'evich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Director, Geo-Scientific Research Enterprise of «ALROSA» (PJSC), 16 Chernyshevskoe highway, Mirny, 678170, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-6057-5987>, tolstovAV@alrosa.ru;

ZHMODIK Sergej Mikhajlovich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Laboratory, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3 Pr. Akademika Koptuyuga, Novosibirsk, 630090, Russia, <http://orcid.org/0000-0001-8095-4485>, zhmodik@igm.nsc.ru;

ZEMNUKHOV Aleksey Leonidovich, Deputy Chief Geologist, JSC «Almazy Anabara», Block "B", 18 Kirov St., Yakutsk, 677000, Russia, zemnuchoval@alanab.ru.