



AMPHIBOLE-PHLOGOPITE XENOLITHS FROM KIMBERLITES AS EVIDENCE OF METASOMATIC PROCESSES IN THE LITHOSPHERIC MANTLE BENEATH KUOIKA FIELD

T.V. Kalashnikova ^{1,2}, S.I. Kostrovitsky ^{1,2}, A.M. Dymshits ²

¹ Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1a Favorsky St, Irkutsk 664033, Russia

² Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT. This paper devoted to the mantle xenoliths with evidence of modal metasomatic alteration from the Obnazhennaya kimberlite pipe (Kuoika kimberlite field). The first data presents for trace elements content in minerals from such rocks, and they are compared with xenoliths from this pipe having no evidence of modal metasomatism. Based on the trace elements content in clinopyroxene and amphibole, as well as $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of phlogopite, it was concluded that enriched in Nb+Ta and REE melt-fluids were formed beneath the Kuoika field in the Lower Proterozoic, which lead to the phlogopite-amphibole formation from pyroxene.

KEYWORDS: amphibole; phlogopite; lithospheric mantle; metasomatism; Siberian craton

FUNDING: This research was funded by the Russian Science Foundation (project 22-77-10073 "Reconstruction of the thermal state and composition of the lithospheric mantle beneath the kimberlite fields of the Siberian craton") (trace-element mineral composition).



EDN: WGKVZX

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Tatiana V. Kalashnikova, kalashnikova@igc.irk.ru

Received: July 20, 2024

Revised: August 13, 2024

Accepted: August 14, 2024

FOR CITATION: Kalashnikova T.V., Kostrovitsky S.I., Dymshits A.M., 2024. Amphibole-Phlogopite Xenoliths from Kimberlites as Evidence of Metasomatic Processes in the Lithospheric Mantle beneath Kuoika Field. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (5), 0779. doi:10.5800/GT-2024-15-5-0779

АМФИБОЛ-ФЛОГОПИТСОДЕРЖАЩИЕ КСЕНОЛИТЫ ИЗ КИМБЕРЛИТОВ КАК СВИДЕТЕЛЬСТВО МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛИТОСФЕРНОЙ МАНТИИ ПОД КУОЙКСКИМ КИМБЕРЛИТОВЫМ ПОЛЕМ

Т.В. Калашникова^{1,2}, С.И. Костровицкий^{1,2}, А.М. Дымшиц²

¹ Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

² Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе впервые приводятся данные по содержанию редких элементов в минералах из пород с признаками модальных метасоматических изменений из кимберлитовой трубки Обнаженной, которые сравниваются с ксенолитами из данной трубки без признаков модального метасоматоза. На основании содержания редких элементов в клинопироксене и амфиболе, а также $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования флогопита делается вывод о том, что в нижнем протерозое в литосферной мантии под Куойкским кимберлитовым полем образовывались расплавы-флюиды, обогащенные Nb+Ta, а также редкими землями, которые приводили к развитию флогопит-амфиболовой минерализации по пироксену.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: амфибол; флогопит; литосферная мантия; метасоматизм; Сибирский кратон

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 22-77-10073 «Реконструкция термального режима и состава литосферной мантии Сибирского кратона в районах проявления кимберлитового магматизма») (определены редкоэлементные составы минералов).

1. ВВЕДЕНИЕ

Метасоматические процессы, происходившие в литосферной мантии, рассматривались многочисленными исследователями начиная с 1970-х годов. Доминирующее положение получила гипотеза об образовании коматиитовых и базальтовых расплавов при высокой степени плавления примитивной мантии, а также комплементарных к ним деплетированных гарцбургитовых реститов [Griffin et al., 1999; и мн. др.]. В дальнейшем происходило изменение состава минералов реститов под воздействием флюидов либо расплавов карбонатного или силикатного состава [Griffin, O'Reilly, 2007; Agashev et al., 2013; Pokhilenko et al., 2015]. Однако данные метасоматические процессы не приводили к образованию новых фаз и поэтому были названы «скрытыми» [O'Reilly, Griffin, 2013].

Другой тип метасоматических процессов в мантийных ксенолитах проявился в развитии типичных метасоматических минералов (например, флогопит и амфибол), интенсивно замещающих первичный парагенезис, а также минералов, кристаллизовавшихся под воздействием расплавов (рутил, ильменит, графит, сульфиды). Данный тип метасоматоза был назван модальным (термин введен [Harte, 1983]) и изучался различными исследователями [Solov'eva et al., 1994, 2012; Van Achtebergh et al., 2004; и др.]. Перечисленные авторы исследовали химический состав и последовательность метасоматических реакций в перидотитах, приводящих к образованию флогопита и других парагенных минералов. Кроме того, исследовались флогопитсодержащие ксенолиты Куойкского поля [Garanin et al., 1985; Ukhanov et al., 1988; Solov'eva et al., 2015, 2017], был изучен состав их минералов. Авторы предположили, что источником калия и летучих компонентов

были флюиды неопределенных мантийных источников, а также флюиды, полученные из перемещающихся к поверхности расплавов протокимберлитов. Был сделан вывод, что флогопит может кристаллизоваться из метасоматизирующих расплавов и/или в результате низкотемпературных реакций. Флогопит-амфиболовая минерализация в ксенолитах и возраст их формирования также изучались С. Аульбах с соавторами, был сделан вывод о возможности формирования в литосферной мантии в палеопротерозойское время – 1290 млн лет [Aulbach et al., 2024]. Однако флогопит-ильменитовые и флогопит-амфиболсодержащие мантийные ксенолиты из литосферной мантии северо-востока Сибирского кратона по-прежнему остаются малоизученными по составу минералов и возрасту их образования.

В работе приводятся новые данные по петрографии и химическому составу минералов из амфибол-флогопитсодержащих глубинных ксенолитов из трубки Обнаженной (Куойкское поле). Впервые приводятся содержания редких элементов в минералах из данного типа пород для этого поля. Многие материалы статьи подготовлены на основе диссертационного исследования [Kalashnikova, 2017]. Полученные результаты позволили по-новому взглянуть на генезис данной группы пород, оценить состав метасоматизирующего агента и время его воздействия.

2. ПЕТРОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБРАЗЦОВ

Трубка Обнаженная расположена в Куойкском кимберлитовом поле, которое находится в бассейне р. Куойка, в среднем течении р. Оленек (Оленекское поднятие, Биректинский террейн – северо-восток Сибирского кратона). Петрографические исследования позволили

выделить три основные группы ксенолитов из данной трубки [Kalashnikova et al., 2015]:

1) шпинелевые, шпинель-гранатовые, гранатовые гарцбургиты, лерцолиты, шпинелевые, шпинель-гранатовые, гранат-оливиновые вебстериты и шпинелевые, шпинель-гранатовые, гранатовые вебстериты (серия, которая составляет около ~80 % общего количества ксенолитов в трубке Обнаженной);

2) эклогиты и близкие им по валовому химизму и химизму минералов гранатовые клинопироксениты (~10–15 % ксенолитов);

3) группа флогопит-ильменитовых пород с железистым составом минералов (~10 % ксенолитов).

В исследовании особое внимание было уделено образцам первой группы (так называемая магнезиальная), в которых проявлена мантийная метасоматическая флогопит-амфиболовая минерализация. Породы данной группы характеризуются средне- и крупнозернистой панидиоморфной структурой. Содержание оливина от 40 до 70 % и ортопироксена – 20 %. Оливин образует крупные зерна (до 2–5 мм), разбитые трещинами на блоки, иногда корродированные серпентином, а также небольшие округлые идиоморфные выделения (до 0.7 мм) в ортопироксене. Ортопироксен образует

зерна различного размера – от ксеноморфных округлых и вытянутых выделений до крупных зерен 2–3 мм. В нем иногда наблюдаются мелкие ламели структур распада клинопироксена шириной 0.05–0.10 мм. В лерцолитах и оливиновых вебстеритах наблюдаются зерна клинопироксена (от 5 до 20 %), который образует выделения размером 0.5–1.0 мм. Кроме того, в вебстеритах пироксены образуют мегакристаллы (2–8 см) со структурами распада, окруженные перекристаллизованной мелко- и среднезернистой матрицей из тех же минералов. Гранат наблюдается преимущественно в пироксенитах, в виде крупных выделений, иногда в сростании с сульфидами (рис. 1, а), а также в виде структур распада в клинопироксене (рис. 1, а).

Мантийная метасоматическая флогопит-амфиболовая минерализация проявлена во всех петрографических типах пород магнезиальной серии и наблюдается приблизительно в 10 % ксенолитов. В мегакристаллических пироксенитах, состоящих из параллельных пластинок клино- и ортопироксена ± граната ± шпинели, метасоматический флогопит-амфибол развивается преимущественно по пироксену (рис. 1, а–б, рис. 2, а), что указывает на развитие метасоматоза после формирования мегакристаллов и последующего охлаждения

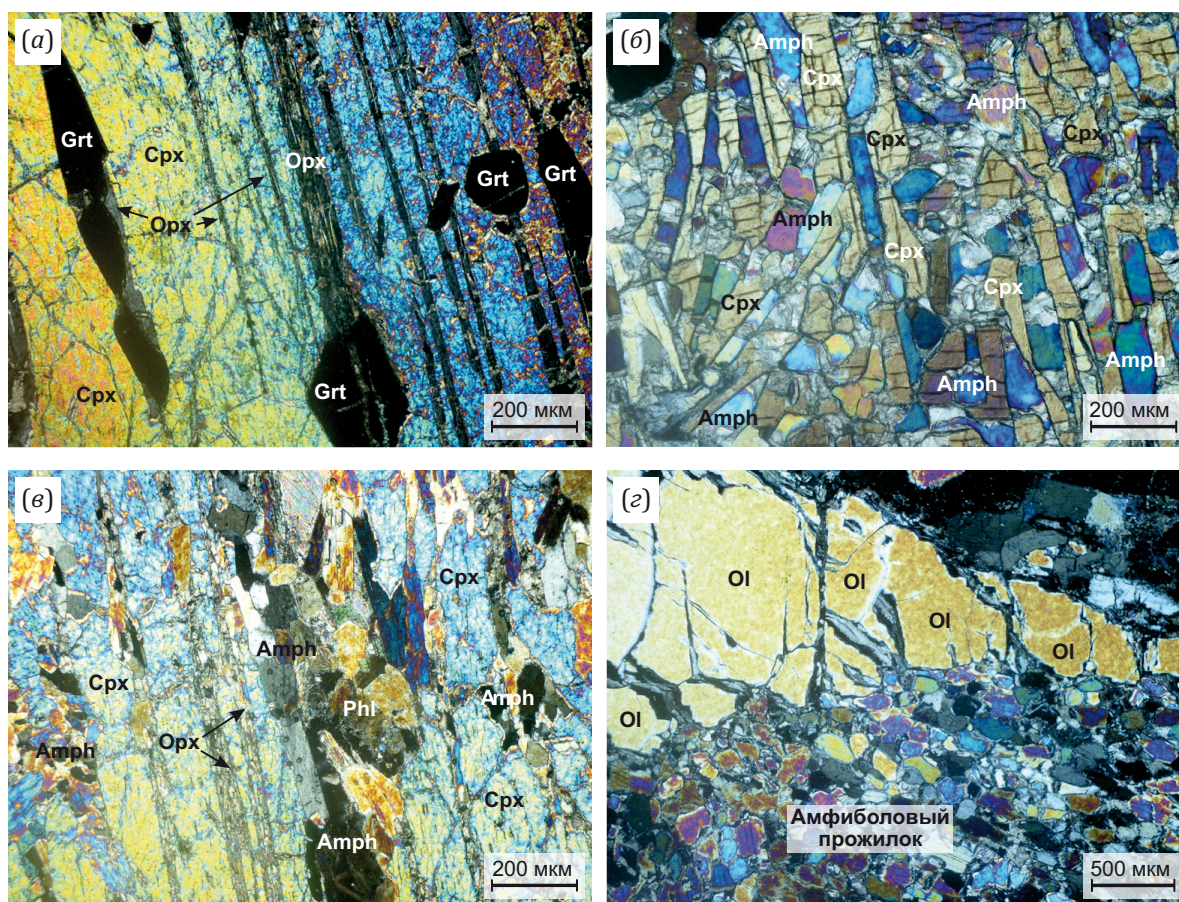


Рис. 1. Взаимоотношения породообразующих минералов, флогопита и амфибола в ксенолитах магнезиальной серии с признаками метасоматических изменений [Solov'eva et al., 2015].

(а) – пластинки распада граната и ортопироксена в мегакристалле клинопироксена (обр. 7-345); (б) – массовое развитие метасоматического амфибола в зернах клинопироксена (обр. 74-817); (в) – мелкозернистый агрегат Amph с редкими пластинками

Phl, развивающийся преимущественно по пластинкам распада ортопироксена (обр. 7-345); (з) – резорбция зерна оливина на контакте с амфиболовым прожилком (обр. 74-817). Названия минералов: Ol – оливин, Орх – ортопироксен, Срх – клинопироксен, Грт – гранат, Амф – амфибол, Флг – флогопит. Здесь и далее: микрофотографии шлифов, поляризаторы скрещены.

Fig. 1. Relationships between rock-forming minerals, phlogopite and amphibole in Mg-series xenoliths with signs of metasomatic alteration [Solov'eva et al., 2015].

(a) – garnet and orthopyroxene disintegration plates in a clinopyroxene megacryst (Sample 7-345); (б) – mass development of metasomatic amphibole in clinopyroxene grains (Sample 74-817); (в) – fine-grained Amph aggregate with rare Phl plates, developing mainly along orthopyroxene disintegration plates (Sample 7-345); (з) – resorption of olivine grain at the contact with amphibole veinlet (Sample 74-817). Mineral abbreviations: Ol – olivine, Opx – orthopyroxene, Cpx – clinopyroxene, Grt – garnet, Amph – amphibole, Phl – phlogopite. Here and further: photomicrographs of the thin sections, polarized nicols.

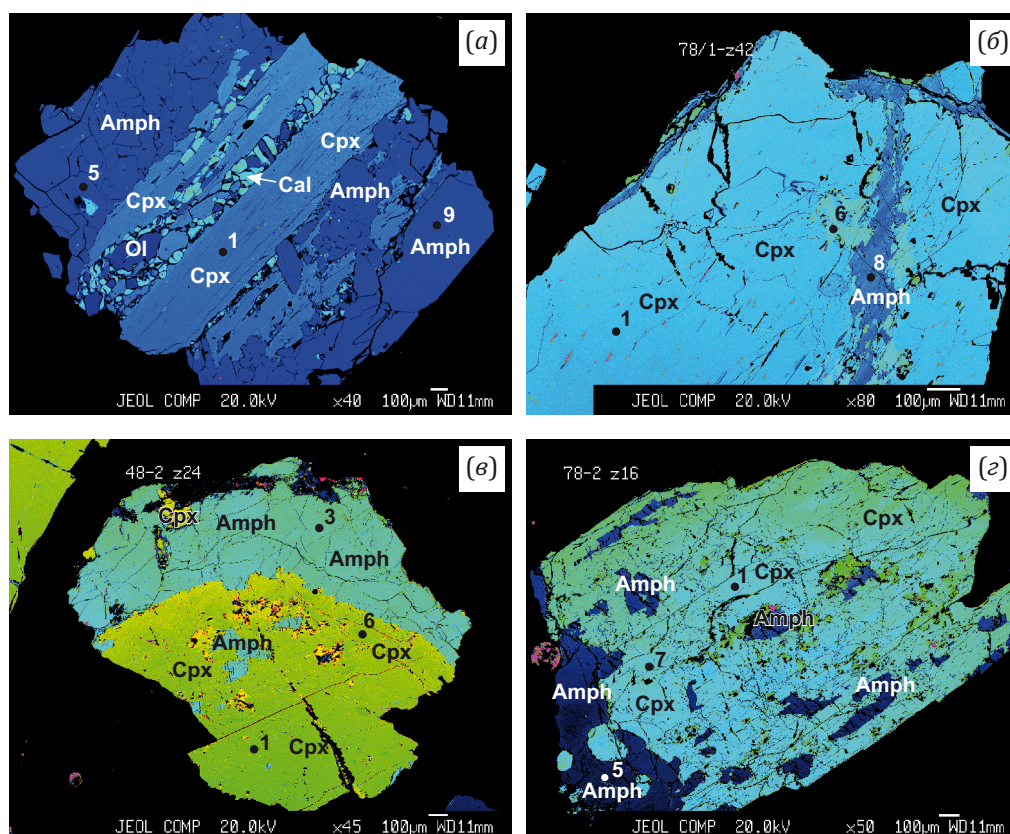


Рис. 2. Характер развития метасоматической минерализации амфибола и флогопита в мегакристаллических пироксенитах магнезиальной серии из трубки Обнаженной. Фото COMPO. Названия минералов соответствуют обозначениям на рис. 1. (а) – обр. 7-345; (б) – обр. 74-296; (в) – обр. 74-817; (з) – обр. Ол-169-74.

Fig. 2. Relationships between metasomatic mineralization of amphibole and phlogopite in megacrystalline pyroxenites of the Mg series from the Obnazhennaya pipe. COMPO photo. Mineral names see in Fig. 1. (a) – sample 7-345; (б) – sample 74-296; (в) – sample 74-817; (з) – sample Ol-169-74.

пород. Метасоматический амфибол (состав магнезиотарамит-магнезиокатофорит группы натриево-кальциевых амфиболов) может наблюдаться в виде мелких зерен с единой оптической ориентировкой внутри крупного зерна клинопироксена, обычно ориентированных по одному или двум кристаллографическим направлениям (см. рис. 1, б, в; рис. 2, г). На контакте ксенолита с включающим его кимберлитом нередко отмечается срезание зерен флогопита или амфибола, что указывает на развитие метасоматической флогопит-амфиболовой минерализации до попадания ксенолита в кимберлитовый расплав (см. рис. 1, г). Явный

метасоматический характер флогопит-амфиболовой минерализации в ксенолитах магнезиальной группы и ее развитие до захвата ксенолитов кимберлитовым расплавом целиком подтверждают мнение предшествовавших исследователей [Ukhanov et al., 1988], что этот процесс был связан с интенсивным мантийным метасоматозом литосферной мантии на северо-востоке Сибирского кратона.

Для исследования были отобраны четыре образца с наиболее характерными признаками метасоматических изменений. Описание образцов приведено в табл. 1. Взаимоотношения пироксена и амфибола в

Таблица 1. Описание образцов с развитием Phl-Amph минерализации**Table 1.** Description of xenolith with Phl-Amph metasomatic alteration from Obnazhennaya pipe

Образец	Описание	Содержание минералов, %				T, °C	P, ГПа
		Ol	Orx	Cpx	Grt		
7-345	Гранатовый мегакристаллический вебстерит – клинопироксенит с Phl+Amph	–	10	60	20	800	3.2
7-296	Гранатовый мегакристаллический ортопироксенит с прожилками Grt+Amph+Orx	–	20	40	30	935	4.0
74-817	Гранатовый вебстерит + прожилок Amph-Phl	5	20	30	15	1021	4.5
Ол-169-74	Гранатовый лерцолит с Phl+Amph	60	5	5	10	1125	5.1

некоторых проанализированных зернах приводятся на [рис. 1, 2](#). Представительные химические анализы минералов приведены в [Прил. 1, табл. 1.1](#).

3. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Детальные минералогические исследования ксенолитов выполнены в ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» (Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия). Содержание главных элементов в минералах определяли на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 LMN (Чехия) (аналитики Ю.Д. Щербаков, Л.А. Павлова). Зерна анализируемых минералов были залиты в эпоксидные шашки с полированной поверхностью. Из изученных зерен были отобраны наиболее чистые и крупные, для которых использовали метод РСМА (EPMA) на электронно-микронном анализаторе Jeol Superprobe JXA-8200 (Япония) (аналитик Л.Ф. Суворова). Использовался пятиволновой дисперсионный (WDX) спектрометр, ускоряющее напряжение пучка 20 кВ, ток пучка 20 кА, диаметр пучка 2–5 мкм. Набор природных и синтетических стандартов, используемых для калибровки, включал альбит (Na), пироп для Al, калиевый полевой шпат (K), диопсид (Si, Ca, Mg), оливин (Si, Mg, Fe), гранат (Si, Al, Fe, Mn), рутил (Ti), хромит (Cr, Fe). Время пикового и фонового измерения для каждого элемента составляло 10 с, а аналитические ошибки обычно находились в пределах от 0.01 мас. % (для второстепенных элементов с содержанием, близким к соответствующим уровням определения) до 0.1–0.2 мас. %. Предел обнаружения методом EPMA составлял 0.05–0.04 мас. %.

Концентрации редких элементов в минералах были получены методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) на микроанализаторе Cameca IMS 4f Ion probe в Центре коллективного пользования на научном оборудовании «Диагностика микро- и наноструктур» (ЦКП ДМНС, Ярославский филиал Физико-технического института РАН, г. Ярославль; аналитик С.Г. Симакин). Энергия первичного пучка ионов O^{2-} – приблизительно 14.5 кэВ, диаметр пучка – 20–30 мкм. Интенсивность тока бомбардирующих ионов составляла 2.53 нА. Настройки и режимы работы прибора регулярно контролировались посредством анализа стандартного образца NIST-610.

Датирование флогопита производилось $^{40}Ar/^{39}Ar$ методом в ИЗК СО РАН с использованием мультиколлекторного масс-спектрометра Argus VI с печью двойного вакуума, позволяющей осуществлять нагрев образца свыше 1700 °C (аналитик А.В. Иванов). Для датирования использовались навески флогопита массой 15–30 мг. Образцы, завернутые в алюминиевую фольгу, помещались в стеклянную ампулу вместе со стандартами BERN4M и затем облучались в исследовательском ядерном реакторе ВВР-К (г. Томск). Параметры облучения такие же, как в работе [\[Travin et al., 2009\]](#).

Оценки давлений и температур для ксенолитов производились в программе PTQuick (PTQuick) [\[Dymshits et al., 2023\]](#). В качестве термометра использовалось равновесие граната и клинопироксена [\[Nakamura, 2009\]](#), в качестве барометра – кондуктивная геотерма, определенная для Куойкского кимберлитового поля [\[Dymshits et al., 2023\]](#).

4. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МИНЕРАЛОВ

Оливины из ксенолитов магнезиальной серии из трубки Обнаженной характеризуются относительно узкими вариациями состава с величиной магнезиальности 91.2–93.5 и содержанием NiO 0.38–0.44 мас. %. Среди образцов из трубки Обнаженной более высокие значения магнезиальности при близких концентрациях NiO отмечаются для оливиновых вебстеритов и вебстеритов, по сравнению с лерцолитами. При этом оливины из метасоматизированных образцов совпадают по составу. Исключение составляет обр. 7-345 ([рис. 2, а](#)), который отличается повышенным содержанием железа, но данный факт можно объяснить диффузией элементов, перекристаллизованный оливин из матрицы данного образца соответствует по составу другим образцам магнезиальной группы.

Ортопироксены из пород разной литологии в магнезиальной серии трубки Обнаженной достаточно близки по химическому составу. Магнезиальность ортопироксенов (90.7–93.0) близка к сосуществующим с ними оливинам, что, наряду с петрографическими наблюдениями, подтверждает их совместную кристаллизацию. Ортопироксены из Grt, Sp-Grt лерцолитов содержат несколько более высокие концентрации Al_2O_3 , Cr_2O_3 и близки по магнезиальности к вебстеритам и

пироксенитам. При этом ортопироксены характеризуются сходными содержаниями Al_2O_3 .

Клинопироксены из Grt, Sp-Grt лерцолитов пород трубки Обнаженной характеризуются относительно высокими содержаниями Cr_2O_3 , более низкими концентрациями TiO_2 и Na_2O , чем вебстериты. В образцах с развитием амфиболовой минерализации в зональности клинопироксенов наблюдается снижение содержания хрома от центра к краю.

Гранаты из парагенезисов магнезиальной серии из трубки Обнаженной меняют последовательно свой состав в сторону уменьшения содержания Cr_2O_3 , CaO и

величины Mg# от Grt, Sp-Grt лерцолитов к Grt вебстеритам. На диаграмме Cr_2O_3 – CaO гранаты из магнезиальной группы пород трубки Обнаженной находятся в области лерцолитового парагенезиса. При этом гранаты из метасоматизированных образцов близки по составу к гранатам из аналогичных пород без развития Phl-Amph минерализации [Kalashnikova, 2017].

5. СОДЕРЖАНИЕ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В МИНЕРАЛАХ

На рис. 3, а, приведены все данные по составу клинопироксенов и амфиболов из изученных образцов.

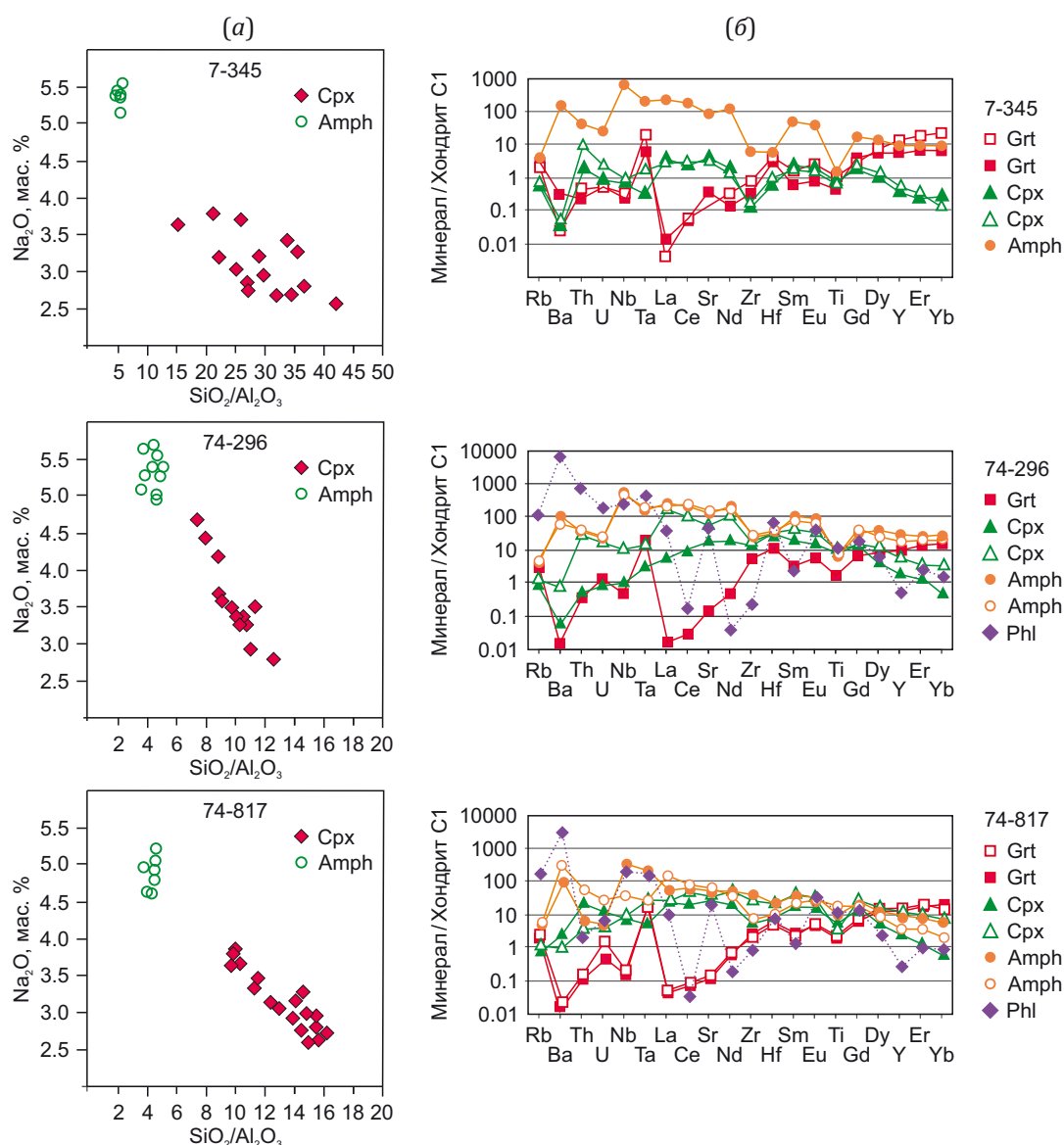


Рис. 3. Диаграммы $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ – Na_2O в пироксенах и амфиболов в метасоматизированных образцах ксенолитов (обр. 7-345, 74-296, 74-817) (а); содержание редких элементов в минералах из метасоматизированных образцов, нормированное к хондриту [McDonough, Sun, 1995] (б). Красные линии – изученные образцы из данной работы, зеленые линии – неизмененные образцы из работы [Kalashnikova et al., 2015]. Названия минералов соответствуют обозначениям на рис. 1.

Fig. 3. Diagrams of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ – Na_2O in pyroxenes and amphiboles in metasomatized altered xenolith samples from Obnazhennaya pipe (Samples 7-345, 74-296, 74-817) (а); trace elements distribution in minerals from metasomatized samples, normalized to chondrite [McDonough, Sun, 1995] (б). Red lines denote the samples studied in this work, green lines denote the unmodified samples [Kalashnikova et al., 2015]. Mineral names see in Fig. 1.

Предпочтение отдавалось зернам клинопироксена с наименьшим содержанием Na_2O (предположительно, испытавшим наименьшее метасоматическое воздействие) и амфиболам с наибольшим отношением $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Диаграммы распределения редких элементов в выбранных точках представлены на рис. 3, б.

На рис. 3, б, приведены содержания несовместимых редких элементов в минералах из исследованных метасоматизированных ксенолитов, нормированные к хондриту C1 [McDonough, Sun, 1995] (белые внутри значки), которые сравниваются с содержаниями редких элементов из неизмененных образцов (залитые значки) (неизмененные образцы по [Kalashnikova et al., 2015]). В целом, кривые распределения редких элементов в гранатах для пород магнезиальной серии из трубки Обнаженной подобны по форме и характеризуются узким диапазоном нормированных концентраций. Отмечается максимум по Ta, незначительный максимум по Zr и Hf, а также минимумы по La, Ti и Sr. Содержания редкоземельных элементов увеличиваются от легких к тяжелым (т.н. нормальное («normal») распределение [Burgess, Harte, 2004]). Кривые распределения в гранатах из образцов с признаками модалного метасоматоза в целом похожи на неизменные образцы. Таким образом, химический состав гранатов под влиянием метасоматических процессов изменялся незначительно.

На кривых распределения редких элементов в клинопироксене из магнезиальной серии трубки Обнаженной наблюдается небольшой максимум по Sr+Nd, а также минимумы Ba, Zr + Hf, Ti. Образцы с признаками метасоматических изменений демонстрируют более широкий разброс значений. Особенно отличается образец 7-345, низкие концентрации несовместимых

элементов в котором можно объяснить процессами перекристаллизации. В целом, подобный спектр распределения наблюдается в клинопироксенах из ксенолитов метасоматизированных перидотитов Кимберли [Grégoire et al., 2002], для которых предполагаются метасоматические преобразования под действием высокощелочных мафических силикатных расплавов по типу PIC ((флогопит) – ильменит – клинопироксен – рутил). При этом очень низкие содержания оксида титана во всех минералах данного образца, а также низкие концентрации калия в амфиболе плохо согласуются с воздействием расплавов типа PIC, но могут указывать на перекристаллизацию исходного перидотита под действием малоплотного флюида, обогащенного несовместимыми элементами [Witt, Seck, 1989]. Остальные метасоматизированные образцы в целом попадают в поле неизмененных, но демонстрируют более высокие содержания элементов группы HFSE. Привнос элементов группы HFSE и редких земель можно также проследить, проанализировав составы новообразующегося амфибола (рис. 3).

Относительно низкие содержания La в клинопироксенах и амфиболах (Прил. 1, табл. 1.1) позволяют предположить отсутствие карбонатитовой компоненты в расплавах. На диаграмме $[\text{La}/\text{Yb}]_n - \text{Ti}/\text{Eu}$ [Coltorti et al., 1999] (рис. 4) полученные нами данные попадают в область силикатного метасоматоза.

Таким образом, проанализировав состав минералов из образцов с признаками модалного метасоматоза, можно сделать вывод, что образовавшийся по пироксену амфибол, а также испытавший метасоматическое воздействие клинопироксен отличаются более высокими содержаниями таких элементов, как Nb, Ta, La, а также редкоземельных элементов.

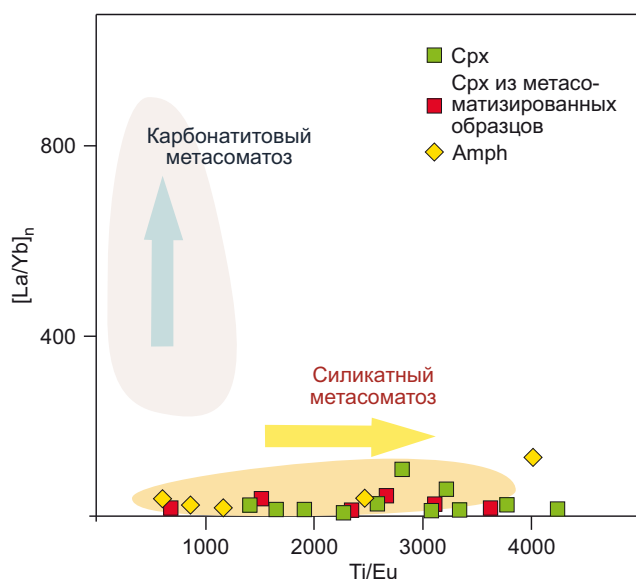


Рис. 4. Диаграмма $\text{Ti}/\text{Eu} - [\text{La}/\text{Yb}]_n$ в клинопироксенах и амфиболах [Coltorti et al., 1999] из Mg-серии ксенолитов трубки Обнаженной.

Fig 4. Diagram $\text{Ti}/\text{Eu} - [\text{La}/\text{Yb}]_n$ in clinopyroxenes and amphiboles following [Coltorti et al., 1999] from the Mg series of xenoliths from the Obnazhennaya pipe.

6. ДАТИРОВАНИЕ ФЛОГОПИТА

Авторами была также предпринята попытка датирования метасоматических процессов. Возраст полученного плато составляет 1639 ± 5 млн лет. Такой древний возраст соответствует древнему метасоматическому событию и согласуется с литературными данными для Сибирского кратона. Древние $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датировки флогопита из мантийных ксенолитов в трубке Удачной в центре Сибирского кратона были получены Л.Н. Похиленко [Pokhilenko et al., 2013]. Указанными авторами были исследованы гранатовый оливиновый клинопироксенит и гранат-ильменитовый перидотит из трубки Удачной. Датировка флогопита из клинопироксенита трубки Удачной (2336 ± 16 млн лет) отвечает крупному древнему метасоматическому событию и не связана с воздействием кимберлитовых расплавов. Также на окраине Сибирского кратона отмечается образование субдукционных и коллизионных гранитоидов, что было связано с его формированием как крупной структуры. Данный процесс происходил от ~ 2.05 – 1.95 до 1.90 – 1.88 млрд лет в разных частях кратона [Donskaya, 2020]. Последующий магматизм был постколлизионным и внутриплитным. Около 1.75 – 1.70 млрд лет назад происходило внедрение роев базитовых даек в период внутриплитного базитового магматизма [Ernst et al., 2016]. Также были продатированы метасоматические процессы под Восточно-Укуйским полем [Iudin et al., 2023], полученные данные близки к 1388 млн лет, второй этап соответствует 2665 млн лет. Возраст неизменных перидотитов из трубки Обнаженной, полученный Re-Os методом, составляет 3.51 – 1.68 млрд лет [Kalashnikova, 2017], что подтверждает развитие древних метасоматических процессов.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изучение глубинных ксенолитов из кимберлитов, содержащих флогопит и амфибол, позволяет судить о процессах, влияющих на эволюцию вещества мантийной литосферы древних кратонов. Такие особенности магнезиальной группы пород ксенолитов из трубки Обнаженной, как наличие эксклюзионных кристаллов пироксена, высокие (1125 – 900 °C) температуры начала кристаллизации эксклюзионных мегакристаллов пироксенов, присутствие глобулей сульфидов и другие, позволили рассматривать Mg-группу как магматическую серию. В дальнейшем данная группа пород испытала метасоматические преобразования, последний этап наиболее четко прослеживается с помощью модального Phl-Amph метасоматоза. На основании развития флогопита и амфибола по пироксенам в породах магнезиальной группы, химического состава минералов делается вывод о воздействии на перидотиты метасоматизирующих силикатных расплавов, обогащенных элементами группы HFSE и редкоземельными элементами. Возраст метасоматических преобразований по $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датировкам равняется ~ 1.7 млрд лет. Phl-Amph метасоматиты, развивающиеся в литосферной мантии под Куойским

кимберлитовым полем по перидотитовым и пироксенитовым породам ранней магматической Mg серии, маркируют этап крупного магматического события.

8. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность бывшей сотруднице ИЗК СО РАН Л.В. Соловьевой, определившей направление данных исследований, а также аналитикам Л.Ф. Суворовой и А.В. Иванову. Аналитические исследования выполнены в ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН и ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН.

9. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

10. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

11. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Agashev A.M., Ionov D.A., Pokhilenko N.P., Golovin A.V., Cherepanova Yu., Sharygin I.S., 2013. Metasomatism in Lithospheric Mantle Roots: Constraints from Whole-Rock and Mineral Chemical Composition of Deformed Peridotite Xenoliths from Kimberlite Pipe Udachnaya. *Lithos* 160–161, 201–215. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.11.014>.
- Aulbach S., Kuiper K., Tinguely C., Jacob D., Wijbrans J., Le Roex A., 2024. Origins and Timing of Amphibole and Phlogopite Formation in Kimberlite-Borne Eclogite and Pyroxenite Xenoliths. In: Extended Abstracts of the 12th International Kimberlite Conference (July 8–12, 2024, Yellowknife, Canada). <https://doi.org/10.29173/ikc4143>.
- Burgess S.R., Harte B., 2004. Tracing Lithosphere Evolution through the Analysis of Heterogeneous G9–G10 Garnets in Peridotite Xenoliths, II: REE Chemistry. *Journal of Petrology* 45 (3), 609–634. <https://doi.org/10.1093/petrology/egg095>.
- Coltorti M., Bonadiman C., Hinton R.W., Siena F., Upton B.G.J., 1999. Carbonatite Metasomatism of the Oceanic Upper Mantle: Evidence from Clinopyroxenes and Glasses in Ultramafic Xenoliths of Grande Comore, Indian Ocean. *Journal of Petrology* 40 (1), 133–165. <https://doi.org/10.1093/petrology/40.1.133>.
- Donskaya T.V., 2020. Assembly of the Siberian Craton: Constraints from Paleoproterozoic Granitoids. *Precambrian Research* 348, 105869. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105869>.
- Dymshits A.M., Muraveva E.A., Tychkov N.S., Kostrovitsky S.I., Sharygin I.S., Golovin A.V., Oleinikov O.B., 2023. Thermal State of the Siberian Craton Marginal Zone at the

Time of Mesozoic Kimberlitic Magmatism within the Kuoika Field (Yakutian Diamondiferous Province). *Lithosphere* 23 (4), 515–530 (in Russian) [Дымшиц А.М., Муравьева Е.А., Тычков Н.С., Костровицкий С.И., Шарыгин И.С., Головин А.В., Олейников О.Б., Термальное состояние краевой части Сибирского кратона в мезозойскую эру кимберлитового магматизма Куойкского поля (Якутская алмазоносная провинция) // Литосфера. 2023. Т. 23. № 4. С. 515–530]. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-515-530>.

Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U., Hanes J.A., Gladkochub D.P., Okrugin A.V., Kolotilina T., Mekhonoshin A.S. et al., 2016. Long-Lived Connection between Southern Siberia and Northern Laurentia in the Proterozoic. *Nature Geoscience* 9, 464–469. <https://doi.org/10.1038/ngeo2700>.

Garanin V.K., Kudryavtseva G.P., Kharkiv A.D., Chistyakova V.F., 1985. Mineralogy of Ilmenite Hypermafic Rocks from the Obnazhennaya Kimberlite Pipe. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Geological Series* 5, 85–101 (in Russian) [Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П., Харьков А.Д., Чистякова В.Ф. Минералогия ильменитовых гипербазитов из кимберлитовой трубки Обнаженная // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1985. Т. 5. С. 85–101].

Grégoire M., Bell D., Le Roex A., 2002. Trace Element Geochemistry of Phlogopite-Rich Mafic Mantle Xenoliths: Their Classification and Their Relationship to Phlogopite-Bearing Peridotites and Kimberlites Revisited. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 142, 603–625. <https://doi.org/10.1007/s00410-001-0315-8>.

Griffin W.L., O'Reilly S.Y., 2007. Cratonic Lithospheric Mantle: Is Anything Subducted? *Episodes* 30 (1), 43–53. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2007/v30i1/006>.

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., 1999. The Siberian Lithosphere Traverse: Mantle Terranes and the Assembly of the Siberian Craton. *Tectonophysics* 310 (1–4), 1–35. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00156-0).

Harte B., 1983. Mantle Peridotites and Processes: The Kimberlite Sample. In: C.J. Hawkesworth, M.J. Norry (Eds), *Continental Basalts and Their Xenoliths*. Shiva Publishing Limited, Nantwich, Cheshire, U.K., p. 46–91.

Iudin D., Ashchepkov I., Babushkina S., Oleinikov O., Medvedev N., 2023. Ancient Mantle Metasomatism in West Ykukite Field Northern Yakutia. In: *Abstracts of the General Assembly of the European Geoscience Union* (April 24–28, 2023, Vienna, Austria). EGU, EGU23-8651. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-8651>.

Kalashnikova T.V., 2017. Geochemical Characteristics and Petrogenesis of Mantle Xenoliths from the Obnazhennaya Kimberlite Pipe (Yakutian Kimberlite Province). PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Irkutsk, 254 p. (in Russian) [Калашникова Т.В. Геохимические характеристики и петрогенезис мантийных ксенолитов из кимберлитовой трубки Обнаженная (Якутская кимберлитовая провинция): Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 2017. 254 с.].

Kalashnikova T.V., Solovieva L.V., Kostrovitsky S.I., 2015. The Comparative Characteristics of the Mineral Composi-

tion of Minerals from Xenoliths of the Obnazhennaya and Udachnaya Kimberlite Pipes. *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences Russian Academy of Natural Sciences. Geology Prospecting and Exploration of Ore Deposits* 53 (4), 7–20 (in Russian) [Калашникова Т.В., Соловьева Л.В., Костровицкий С.И. Сравнительная характеристика состава минералов из ксенолитов кимберлитовых трубок «Обнаженная» и «Удачная» // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2015. Т. 53. № 4. С. 7–20].

McDonough W.F., Sun S.-S., 1995. The Composition of the Earth. *Chemical Geology* 120 (3–4), 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4).

Nakamura D., 2009. A New Formulation of Garnet-Clinopyroxene Geothermometer Based on Accumulation and Statistical Analysis of a Large Experimental Data Set. *Journal of Metamorphic Geology* 27 (7), 495–508. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2009.00828.x>.

O'Reilly S.Y., Griffin W.L., 2013. Mantle Metasomatism. In: D.E. Harlov, H. Austrheim (Eds), *Metasomatism and the Chemical Transformation of Rock. The Role of Fluids in Terrestrial and Extraterrestrial Processes*. Springer, p. 471–533. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28394-9_12.

Pokhilenko L.N., Alifirova T.A., Yudin D.S., 2013. ⁴⁰Ar/³⁹Ar Dating of Phlogopite from Mantle Xenoliths: Evidence of Ancient Deep Metasomatism of the Lithosphere of the Siberian Craton Lithosphere. *Doklady Earth Sciences*. 449, 309–312. <https://doi.org/10.1134/S1028334X13030057>.

Pokhilenko N.P., Agashev A.M., Litasov K.D., Pokhilenko L.N., 2015. Carbonatite Metasomatism of Peridotite Lithospheric Mantle: Implications for Diamond Formation and Carbonatite-Kimberlite Magmatism. *Russian Geology and Geophysics* 56 (1–2), 280–295. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.01.020>.

Solov'eva L.V., Kalashnikova T.V., Kostrovitsky S.I., Ivanov A.V., Matsuk S.S., Suvorova L.F., 2015. Metasomatic and Magmatic Processes in the Mantle Lithosphere of the Birekte Terrain of the Siberian Craton and Their Effect on the Lithosphere Evolution. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (3), 311–344 (in Russian) [Соловьева Л.В., Калашникова Т.В., Костровицкий С.И., Иванов А.В., Мацюк С.С., Суворова Л.Ф. Метасоматические и магматические процессы в мантийной литосфере Биректинского террейна Сибирского кратона и их влияние на эволюцию литосферы // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 3. С. 311–344]. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-3-0184>.

Solov'eva L.V., Kalashnikova T.V., Kostrovitsky S.I., Ivanov A.V., Matsuk S.S., Suvorova L.F., 2017. Phlogopite and Phlogopite-Amphibole Parageneses in the Lithospheric Mantle of the Birekte Terrane (Siberian Craton). *Doklady Earth Sciences* 475, 822–827. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17070273>.

Solov'eva L.V., Vladimirov B.M., Dneprovskaya L.V., Maslovskaya M.N., Brandt S.B., 1994. The Kimberlites and Kimberlite-Like Rocks: Material of Upper Mantle beneath Ancient Platforms. *Nauka, Novosibirsk*, 256 p. (in Russian)

[Соловьева Л.В., Владимиров Б.М., Днепровская Л.В., Масловская М.Н., Брандт С.Б. Кимберлиты и кимберлитоподобные породы. Вещество верхней мантии под древними платформами. Новосибирск: Наука, 1994. 256 с.]

Solov'eva L.V., Yasnygina T.A., Egorov K.N., 2012. Metasomatic Parageneses in Deep-Seated Xenoliths from Pipes Udachnaya and Komsomol'skaya-Magnitnaya as Indicators of Fluid Transfer through the Mantle Lithosphere of the Siberian Craton. *Russian Geology and Geophysics* 53 (12), 1304–1323. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.10.004>.

Travin A.V., Yudin D.S., Vladimirov A.G., Khromykh S.V., Volkova N.I., Mekhonoshin A.S., Kolotilina T.B., 2009. Thermochronology of the Chernorud Granulite Zone, Ol'khon Region, Western Baikal Area. *Geochemistry International* 47, 1107–1124. <https://doi.org/10.1134/S0016702909110068>.

Ukhanov A.V., Ryabchikov I.D., Kharkiv A.D., 1988. The Lithosphere Mantle of Yakutian Kimberlite Province. Nauka, Moscow, 298 p. (in Russian) [Уханов А.В., Рябчиков И.Д., Харьков А.Д. Литосферная мантия Якутской кимберлитовой провинции. М.: Наука, 1988. 286 с.]

Van Achterbergh E., Griffin W.L., Ryan C.G., O'Reilly S.Y., Pearson N.J., Kivi K., Doyle B.J., 2004. Melt Inclusions from the Deep Slave Lithosphere: Implication for the Origin and Evolution of Mantle Derived Carbonatite and Kimberlite. *Lithos* 76 (1–4), 461–474. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.007>.

Witt G., Seck H.A., 1989. Origin of Amphibole in Recrystallized and Porphyroclastic Mantle Xenoliths from the Rhenish Massif: Implications for the Nature of Mantle Metasomatism. *Earth and Planetary Science Letters* 91 (3–4), 327–340. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(89\)90007-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(89)90007-1).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

Таблица 1.1. Представительные химические составы минералов из образцов с развитием Phl-Amph минерализации (7-345, 7-296, 74-817, Ол-169-74)**Table 1.1.** Chemical compositions of minerals from samples with Phl-Amph metasomatic alteration (7-345, 7-296, 74-817, Ol-169-74)

Образец	7-345									
Минерал	Ol	Оpx	Grt	Grt	Cpx	Cpx	Cpx	Amph	Amph	Phl
Номер анализа	2А-5				2А-1			2А-9		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	39.91	57.03	42.13	40.31	53.57	54.54	54.06	48.13	47.98	40.91
TiO ₂	<0.04	<0.04	0.05	0.048	0.05	0.06	0.05	0.07	0.08	0.62
Al ₂ O ₃	<0.05	1.79	23.03	23.48	1.99	1.64	2.67	8.39	9.22	13.14
Cr ₂ O ₃	<0.05	0.27	1.16	0.66	0.63	1.15	1.53	1.17	1.22	0.96
FeO	9.27	5.11	7.65	12.71	1.51	3.30	2.60	3.34	3.48	4.44
MnO	0.22	0.07	0.26	0.53	0.04	0.10	0.11	0.07	0.10	0.03
MgO	50.93	35.21	20.98	18.34	16.93	16.28	15.71	20.91	20.42	25.05
CaO	<0.04	0.45	5.41	4.11	23.43	21.22	20.33	9.93	9.93	0.01
Na ₂ O	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	1.05	2.09	2.64	5.12	5.00	0.66
K ₂ O	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	0.03	0.00	1.23	1.17	10.02
Сумма	100.54	100.11	100.38	100.34	99.30	100.46	99.74	98.64	98.76	96.50
NiO	0.18	0.14	–	–	0.07	–	–	0.05	0.08	0.11
BaO	–	–	–	0.05	–	–	–	0.06	–	0.13
SrO	–	–	–	–	–	–	–	<0.04	–	0.13
F	–	–	–	–	–	–	–	0.11	–	0.40
Rb	–	–	5.39	7.95	1.42	1.51	–	9.39	–	6.65
Ba	–	–	0.07	1.14	0.08	0.04	–	394.33	–	278.09
Th	–	–	0.01	0.01	0.07	0.29	–	1.34	–	0.93
U	–	–	0.01	0.03	0.01	0.02	–	0.19	–	0.14
Nb	–	–	0.07	0.64	0.18	0.23	–	189.17	–	141.53
Ta	–	–	0.29	0.10	0.01	0.03	–	3.06	–	2.54
La	–	–	0.01	0.04	1.04	0.82	–	55.76	–	35.06
Ce	–	–	0.03	0.10	1.68	1.33	–	116.46	–	86.07
Sr	–	–	3.06	2.74	30.15	25.61	–	686.92	–	511.77
Nd	–	–	0.14	0.25	0.84	0.67	–	57.26	–	35.37
Zr	–	–	2.79	2.51	0.51	0.66	–	25.83	–	26.79
Hf	–	–	0.41	0.20	0.06	0.10	–	0.70	–	0.70
Sm	–	–	0.23	0.41	0.32	0.27	–	7.46	–	5.41
Eu	–	–	0.15	0.20	0.10	0.13	–	2.31	–	1.43
Ti	–	–	373.91	297.84	305.35	329.02	–	575.66	–	537.46
Gd	–	–	0.75	0.80	0.40	0.49	–	3.74	–	4.43
Dy	–	–	2.06	0.92	0.26	0.30	–	3.32	–	2.53
Y	–	–	18.95	4.06	0.60	0.84	–	16.56	–	11.00
Er	–	–	2.82	0.76	0.04	0.06	–	1.43	–	1.35
Yb	–	–	3.68	0.89	0.04	0.02	–	1.38	–	0.69

Таблица 1.1 (продолжение)

Table 1.1 (continued)

Образец	7-296								
Минерал	Оpx	Grt	Grt	Cpx	Cpx	Cpx	Amph	Amph	Phl
Номер анализа				2Б-1	2Б-6		2Б-8		
	11	12	13	14	15	16	17	18	19
SiO ₂	56.13	42.67	41.99	53.50	53.69	53.50	48.26	47.27	40.48
TiO ₂	<0.04	0.06	0.10	0.44	0.40	0.44	0.47	0.43	0.57
Al ₂ O ₃	0.67	22.48	22.33	6.05	4.27	6.05	10.04	10.59	14.63
Cr ₂ O ₃	0.20	1.39	1.52	1.17	1.03	1.17	1.64	1.66	1.00
FeO	5.68	8.87	8.74	1.93	3.03	1.93	3.73	3.62	2.93
MnO	0.12	0.30	0.28	<0.04	0.06	0.02	0.06	0.08	0.04
MgO	36.82	20.59	20.79	14.44	14.43	14.44	20.79	20.83	25.99
CaO	0.13	4.20	4.32	19.44	20.05	19.44	8.31	8.54	<0.04
Na ₂ O	<0.04	0.06	0.00	4.18	3.29	4.18	5.79	5.89	2.65
K ₂ O	<0.04	<0.04	0.00	<0.04	<0.04	<0.04	0.46	0.41	7.33
Сумма	99.93	100.67	100.12	100.29	100.32	100.19	99.81	99.70	97.80
NiO	0.08	–	–	0.06	0.04	0.06	0.11	0.12	0.18
BaO	<0.04	–	–	–	–	–	0.10	0.14	0.20
SrO	–	–	–	–	–	–	<0.04	<0.04	1.67
F	–	–	–	–	–	–	<0.04	<0.04	0.09
Rb	–	7.08	9.99	2.68	3.10	2.12	6.44	5.17	244.79
Ba	–	0.02	0.11	0.25	4.16	0.15	143.00	242.35	21022.62
Th	–	0.01	0.00	0.03	0.67	0.02	1.03	1.05	22.21
U	–	0.01	0.01	0.03	0.10	0.01	0.16	0.16	1.34
Nb	–	0.12	0.11	0.69	1.56	0.27	130.45	136.39	61.73
Ta	–	0.27	0.37	0.06	0.17	0.04	2.25	2.41	5.80
La	–	0.01	0.00	2.19	12.21	1.42	59.73	54.91	10.01
Ce	–	0.01	0.03	7.26	38.37	6.48	148.71	132.02	0.06
Sr	–	1.02	5.83	160.68	234.14	144.14	935.16	929.98	833.62
Nd	–	0.22	0.28	11.47	25.22	9.59	73.65	93.24	0.02
Zr	–	21.02	34.77	71.49	71.50	65.89	90.38	87.66	0.88
Hf	–	1.12	1.63	3.58	3.42	3.22	2.82	4.14	6.84
Sm	–	0.42	0.69	3.33	5.66	3.15	12.71	15.79	0.35
Eu	–	0.32	0.43	1.13	1.51	0.93	3.46	4.95	2.91
Ti	–	662.61	883.00	4043.76	2950.46	3440.31	3118.48	3229.56	3503.78
Gd	–	1.39	2.06	2.35	3.72	2.66	8.97	7.65	0.01
Dy	–	2.32	3.45	1.11	1.85	1.06	6.53	9.87	2.53
Y	–	16.26	20.97	2.98	5.49	2.99	30.08	45.72	0.73
Er	–	2.19	2.47	0.22	0.48	0.23	3.32	4.29	0.43
Yb	–	2.59	2.36	0.07	0.25	0.08	3.05	4.60	0.25

Таблица 1.1 (продолжение)

Table 1.1 (continued)

Образец	74-817									
Минерал	Орх	Grt	Grt	Cpx	Cpx	Cpx	Amph	Amph	Phl	Phl
Номер анализа	2B-1		2B-6		2B-3					
	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
SiO ₂	57.42	42.09	41.84	54.42	53.45	54.16	47.37	47.45	39.31	40.40
TiO ₂	0.06	0.14	0.09	0.36	0.18	0.19	0.55	0.98	0.46	1.13
Al ₂ O ₃	0.74	22.50	23.52	5.37	3.60	3.57	9.96	10.13	14.89	14.33
Cr ₂ O ₃	0.12	1.15	0.88	0.79	0.86	0.89	1.01	0.60	0.69	0.22
FeO	4.69	8.01	7.42	1.90	2.59	2.71	3.45	2.92	3.14	2.69
MnO	0.09	0.34	0.32	0.04	0.06	0.08	0.09	0.04	0.04	0.01
MgO	36.07	21.63	22.26	14.55	15.62	15.41	20.32	20.37	25.31	25.05
CaO	0.23	4.33	4.01	19.10	20.02	19.97	9.24	9.08	<0.04	0.00
Na ₂ O	0.07	0.07	0.05	3.69	2.78	3.06	5.36	5.08	1.09	1.16
K ₂ O	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	1.00	1.34	9.52	9.06
Сумма	99.65	100.36	100.61	100.31	99.24	100.07	98.51	98.33	95.38	95.98
NiO	0.09	–	–	0.06	0.04	–	0.05	–	0.12	0.26
BaO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
SrO	–	–	–	–	–	–	–	0.79	0.76	1.41
F	–	0.13	–	–	0.08	–	0.14	0.20	0.06	0.37
Rb	–	5.37	6.07	1.72	2.56	14.41	11.08	7.03	368.48	407.65
Ba	–	0.02	0.02	5.53	2.45	250.61	223.58	697.49	6694.33	5994.90
Th	–	0.01	0.00	0.68	0.11	0.19	0.18	1.49	0.06	0.07
U	–	0.02	0.01	0.09	0.03	0.06	0.03	0.18	0.05	0.03
Nb	–	0.03	0.06	1.67	2.00	81.53	78.54	8.83	46.30	41.45
Ta	–	0.27	0.31	0.07	0.35	5.45	2.75	0.28	2.75	2.48
La	–	0.001	0.00	5.79	6.11	11.09	11.27	29.40	2.39	6.74
Ce	–	0.03	0.02	12.53	27.46	35.98	35.07	43.95	0.09	0.02
Sr	–	0.29	0.59	208.39	221.58	316.37	294.85	424.37	165.25	129.28
Nd	–	0.27	0.29	9.18	23.23	28.29	24.54	18.76	0.06	0.00
Zr	–	10.67	9.91	19.45	92.55	132.66	122.86	28.46	3.59	2.75
Hf	–	0.73	0.67	0.89	2.01	2.42	1.95	1.27	1.85	1.59
Sm	–	0.37	0.37	2.70	6.36	5.77	5.64	2.92	0.09	0.20
Eu	–	0.27	0.27	0.83	1.89	1.76	1.52	1.36	1.79	2.03
Ti	–	799.16	821.85	2382.29	1158.96	4124.41	3990.28	7535.10	3430.55	3293.27
Gd	–	1.33	1.32	2.65	4.61	5.02	4.14	3.03	0.10	0.13
Dy	–	2.57	2.94	1.21	3.27	3.36	2.73	1.86	0.90	0.59
Y	–	19.84	20.64	3.86	13.00	12.15	11.32	5.56	0.18	0.31
Er	–	2.78	2.80	0.21	1.51	1.37	1.30	0.57	0.08	0.19
Yb	–	3.01	3.03	0.09	1.09	1.04	0.87	0.30	0.12	0.10

Таблица 1.1 (продолжение)

Table 1.1 (continued)

Образец	Ол-169-74									
Минерал	Grt	Grt	Cpx	Cpx	Cpx	Amph	Amph	Amph	Phl	Phl
Номер анализа			2Г-1	2Г-7			2Г-5			
	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
SiO ₂	41.51	41.85	53.62	54.44	54.02	46.20	48.18	49.08	39.62	40.03
TiO ₂	0.18	0.05	0.16	0.23	0.27	0.30	0.36	0.45	0.33	0.34
Al ₂ O ₃	21.24	22.23	3.51	3.90	4.04	10.72	8.96	9.13	14.82	15.20
Cr ₂ O ₃	3.74	2.18	2.94	2.91	3.04	2.06	1.57	2.01	1.02	0.83
FeO	7.67	7.68	2.16	2.25	2.25	3.04	2.73	2.75	2.62	2.68
MnO	0.40	0.44	0.08	0.05	0.10	0.08	0.06	0.03	<0.04	0.05
MgO	21.22	21.57	14.77	14.00	14.00	19.57	20.73	20.08	25.19	25.78
CaO	4.52	4.01	18.70	17.97	17.99	8.99	8.83	8.79	<0.04	0.00
Na ₂ O	<0.04	0.07	3.80	4.18	4.37	5.37	5.08	5.61	1.06	1.30
K ₂ O	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	0.00	0.93	1.34	1.05	9.64	9.37
Сумма	100.51	100.23	99.94	100.05	100.04	97.51	98.07	99.28	95.28	96.57
NiO	–	–	0.04	0.05	0.05	0.07	0.08	0.10	0.15	0.16
BaO	–	–	–	–	–	<0.04	–	0.04	<0.04	0.06
SrO	<0.04	–	–	0.04	–	0.02	0.05	0.05	0.54	0.51
F	0.142	–	0.04	–	–	0.15	0.11	0.28	0.39	0.44
Rb	6.33	5.98	2.90	2.59	2.96	6.11	8.40	15.57	198.82	294.82
Ba	0.10	0.16	10.34	0.23	5.95	147.36	77.62	225.79	6971	6592
Th	0.01	0.02	1.03	0.30	0.65	0.73	0.08	0.54	0.60	0.17
U	0.01	0.05	0.14	0.09	0.06	0.11	0.06	0.14	0.05	0.06
Nb	0.19	0.33	4.47	2.24	4.77	72.94	51.86	61.33	40.71	44.79
Ta	0.15	0.72	0.32	0.17	0.40	2.71	2.41	2.80	3.09	3.21
La	0.01	0.01	23.73	6.81	13.41	18.58	5.48	16.97	4.84	2.84
Ce	0.05	0.15	61.34	23.45	43.69	52.15	19.09	37.59	0.14	0.10
Sr	0.99	3.80	414.83	215.43	337.64	418.73	223.22	285.19	173.59	162.29
Nd	0.35	0.91	38.52	16.29	33.57	40.33	18.15	36.62	0.02	0.10
Zr	7.70	32.18	107.88	33.92	138.28	154.96	140.79	162.93	3.57	3.64
Hf	0.34	1.24	2.36	0.65	3.63	3.73	3.19	4.00	2.31	2.11
Sm	0.45	0.84	7.24	3.21	6.71	8.00	4.45	7.83	0.21	0.11
Eu	0.26	0.54	2.08	1.01	2.08	2.44	1.36	2.47	0.35	1.73
Ti	813.76	491.22	1158.56	2427.27	820.21	2019.76	2099.09	2043.38	2237.05	2269.18
Gd	0.78	2.42	4.94	2.19	5.97	8.18	4.08	6.49	0.15	0.12
Dy	1.05	5.14	3.14	1.09	3.47	3.97	2.06	4.09	0.86	0.81
Y	8.29	50.81	11.08	4.10	11.60	15.24	7.37	16.21	0.26	0.18
Er	0.95	7.02	1.15	0.42	1.23	1.81	0.75	1.82	0.27	0.03
Yb	1.53	12.72	0.81	0.39	0.83	0.60	0.45	1.33	0.10	0.14

Примечание. Номера анализов соответствуют точкам на рис. 2.

Note. The analysis numbers correspond to the points in Fig. 2.