



3. Garan M.I. Upper Precambrian (Riphean): Stratigraphy. *Geology of the USSR. Moscow, Nedra Publ.*, 1969, v. 12. Perm, Sverdlovsk, Chelyabinsk and Kurgan regions. Part 1. *Geological description*, pp. 149–200. (In Russian)
4. *Geology and paleogeography of the western slope of the Urals*. Ed. Yu.D. Smirnov. Leningrad, Nedra Publ., 1977, 199 p. (In Russian)
5. Maslov A.V. *Lithology of the Upper Riphean deposits of the Bashkir meganticlinorium*. Moscow, Nauka Publ., 1988, 133 p. (In Russian).
6. Maslov A.V. *Sedimentary basins of the Riphean of the western slope of the Southern Urals (facies, lithological-facies complexes, paleogeography, evolutionary features)*. The dissertation for the degree of doctor of geol.-min. sci., v. I. Yekaterinburg: IGG UB RAS Publ., 1997, 496 p. (In Russian).
7. Maslov A.V., Erokhin Yu.V., Gerdes A., Ronkin Yu. L., Ivanov K.S. First Results of U–Pb LA–ICP–MS Isotope Dating of Detrital Zircons from Arkose Sandstone of the Biryán Subformation of Zilmerdak Formation (Upper Riphean, South Urals). *Dokl. Earth Sci.*, 2018, v. 482, part 2, pp. 1275–1277.
8. Maslov A.V., Kozina N.V., Klyuvitkin A.A., Novigatsky A.N., Filippov A.S., Kovach V.P., Shevchenko V.P., Ronkin Yu.L. Rare-earth element distribution and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ systematics in modern bottom sediments of the Caspian sea. *Dokl. Earth Sci.*, 2014, v. 459, part 1, pp. 1418–1422.
9. Maslov A.V., Krupenin M.T., Gareev E.Z., Anfimov L.V. *Riphean of the western slope of the Southern Urals (classical sections, sedimento- and lithogenesis, minerageny, geological monuments of nature)*. Yekaterinburg: IGG UB RAS, 2001, v. I, 351 p. (In Russian).
10. Maslov A.V., Nozhkin A.D., Podkovyrov V.N., Letnikova E.F., Turkina O.M., Ronkin Yu.L., Dmitrieva N.V., Gareev E.Z., Lepikhina O.P., Popova O.Yu. Riphean Fine-Grained Aluminosilicate Clastic Rocks in the Southern Urals, Uchur–Maya Area, and the Yenisei Kryazh: Principal Litho-Geochemical Characteristics. *Geochem. Int.*, 2008, v. 46, no. 11, pp. 1117–1144.
11. Maslov A.V., Shevchenko V.P. REE-Th systematics of the suspended particulate matter and bottom sediments from the mouth zones of the world rivers of different categories/classes and some large Russian Arctic rivers. *Geochem. Int.*, 2019, v. 57, no. 1, pp. 56–73.
12. *Riphean stratotype. Stratigraphy. Geochronology*. Ed. B.M. Keller, N.M. Chumakov. Moscow, Nauka Publ., 1983, 184 p. (In Russian).
13. Kholodov V.N. The role of sedimentary process geochemistry in the development of lithology. *Problems of lithology, geochemistry and sedimentary ore genesis*. Moscow, Nauka Publ., 2001, pp. 54–92. (In Russian)
14. Bartley J.K., Khan L.C., McWilliams J.L., Stagner A.F. Carbon isotope chemostratigraphy of the Middle Riphean type section (Avzyan Formation, Southern Urals, Russia): Signal recovery in a fold-and-thrust belt. *Chem. Geol.*, 2007, v. 237, no. 1–2, pp. 211–232.
15. Bayon G., Toucanne S., Skonieczny C., Andre L., Bermell S., Cheron S., Dennielou B., Etoubleau J., Freslon N., Gauchery T., Germain Y., Jorj S.J., Menot G., Monin L., Ponzevera E., Rouget M.-L., Tachikawa K., Barrat J.A. Rare earth elements and neodymium isotopes in world river sediments revisited. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2015, v. 170, pp. 17–38.
16. Goldstein S.J., Jacobsen S.B. Rare earth elements in river waters. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1988, v. 89, pp. 35–47.
17. Kamber B.S., Greig A., Collerson R.D. A new estimate for the composition of weathered young upper continental crust from alluvial sediments, Queensland, Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2005, v. 69, pp. 1041–1058.
18. Viers J., Dupre B., Gaillardet J. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: new insights from a new database. *Sci. Total Environ.*, 2009, v. 407, pp. 853–868

УДК 553.81+552.323.6+549.641(480)

ОКСИДНЫЕ МИНЕРАЛЫ КИМБЕРЛИТОВ КААВИ (ФИНЛЯНДИЯ)*

Н.С. АЗАРОВА¹, А.В. БОВКУН¹, В.К. ГАРАНИН², Д.А. ВАРЛАМОВ³, Х.Л. ХОНГ⁴

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
1, Ленинские горы, г. Москва 119234, Россия
e-mail: nadiya-azarova@mail.ru, bovkun2004@mail.ru

²Минералогический музей имени А.Е.Ферсмана РАН
18, к. 2, Ленинский проспект, г. Москва 119071, Россия
e-mail: vgaranin@mail.ru

³ФГБУН Институт экспериментальной минералогии РАН
9, Лесная ул., Черноголовка, Московская область 1422432, Россия
e-mail: dima@iem.ac.ru

⁴The China University of Geosciences (Wuhan)
388, Лумолу ул., Ухань, Провинция Хубей 430074, Китай

Изучены минералогические и петрогеохимические особенности неопротерозойских кимберлитовых пород трубок Лахтоёки и Ниилонсуо кластера Каави (Каави-Куопио, Финляндия), выявлены отличия петрогеохимического состава, количественный и химический составы оксидных минералов глубинного (мантийного) и кимберлитового генезиса. Кимберлиты трубок относятся к умеренно-титанистым, но содержание TiO_2 в кимберлитах Ниилонсуо выше (2,11 мас. %), чем в кимберлитах из брекчии трубки Лахтоёки (1,07 мас. %). Кимберлиты трубки Ниилонсуо отличаются также более высокими концентрациями Fe_2O_3 , Ca, P, K, Rb, V, Nb, Ba, Th, U, Ta и REE. В кимберлитовых брекчиях трубки Лахтоёки основным минералом-концентратором TiO_2 является магнезиальный ильменит (13,3–15,2 мас. % MgO ; 0,5–4,4 мас. % Cr_2O_3), представлен макрокристаллами до 4 мм, в мелкозернистом матриксе пород присутствуют мелкие зёрна рутила, хромшпинелидов, Mn-ильменита, иногда титаномагнетита. В кимберлитах





трубки Ниилонсуо макрокристаллы магнезиального ильменита не обнаружены, главным минералом титана выступает перовскит, реже встречаются хромшпинелиды и титаномagnetит. Длительная кристаллизация сравнительно крупных (до 200 мкм) перовскитовых зёрен протекала, согласно оценкам с помощью Nb-Fe-перовскитового оксидбарометра, в условиях широкого диапазона значений фугитивности кислорода (f_{O_2}) кимберлитового расплава (ΔNNO от -3,8 до 5,1). Хромшпинелиды из связующей массы кимберлитовых пород трубок различаются по составу, но обладают одинаковым специфическим характером зональности — обогащение Al и Mg краевых зон кристаллов, что, возможно, обусловлено растворением вкрапленников флогопита в поднимающемся кимберлитовом расплаве. Помимо оксидных минералов в связующей массе кимберлитов трубки Ниилонсуо широко распространён джерфшерит, состав которого для пород тела описан впервые. Совокупность особенностей оксидной минерализации указывает на неблагоприятные для сохранности алмаза условия в процессе транспортировки кимберлитовым расплавом.

Ключевые слова: Финляндия; Каави-Куопио; кимберлит; связующая масса; минералогия; перовскит; шпинелиды; ильменит; рутил; джерфшерит.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-5-36-49

OXIDE MINERALS OF KAAVI KIMBERLITES (FINLAND)

N.S. AZAROVA¹, A.V. BOVKUN¹, V.K. GARANIN², D.A. VARLAMOV³, H.L. HONG⁴

¹Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia
e-mail: nadiya-azarova@mail.ru, bovkun2004@mail.ru

²Fersman Mineralogical Museum RAS
building 2, 18, Leninsky Prospect, Moscow 119071, Russia
e-mail: vgaranin@mail.ru,

³Institute of Experimental Mineralogy RAS
9, Lesnaya street, Chernogolovka 1422432, Moscow region, Russia
e-mail: dima@iem.ac.ru,

⁴The China University of Geosciences (Wuhan)
No. 388 Lumo Road, Wuhan 430074, Hubei, P.R. China

The mineralogical and petrogeochemical features of the Neoproterozoic kimberlite rocks of the Lahtojoki and Niilonsuo pipes of the Kaavi cluster (Kaavi-Kuopio, Finland) have been studied, differences in their petrogeochemical composition, quantitative and chemical composition of oxide minerals of deep (mantle) and kimberlite genesis have been revealed. The kimberlites of the pipes are moderately titanic, but the TiO_2 content in the kimberlites of Niilonsuo is higher (2.11 wt.%) than in the kimberlites from the breccia of the Lahtojoki pipe (1.07 wt.%). The kimberlites of the Niilonsuo pipe also differ in higher concentrations of Fe_2O_3 , Ca, P, K, Rb, V, Nb, Ba, Th, U, Ta and REE. In the Lahtojoki kimberlite breccias the main TiO_2 concentrator mineral is magnesian ilmenite (13.3–15.2 wt.% MgO ; 0.5–4.4 wt.% Cr_2O_3), (macrocrysts up to 4 mm); the fine-grained matrix of rocks contains small grains of rutile, chromspinelides, Mn-ilmenite and sometimes titanomagnetite. Macrocrystals of magnesian ilmenite have been not found in the kimberlites of the Niilonsuo pipe, perovskite acts as the main mineral of titanium, and chromspinelids and titanomagnetite are less common. Long-term crystallization of relatively large (up to 200 μm) perovskite grains proceeded according to estimates using an Nb-Fe-perovskite oxybarometer under a wide range of oxygen fugacity (f_{O_2}) of the kimberlite melt (NNO from -3.8 to 5.1). Chromspinelids from the groundmass of kimberlite pipe rocks differ in composition, but have the same specific zonality — enrichment of Al and Mg in the edge zones of crystals, which is possibly due to the dissolution of phlogopite phenocrysts in the rising kimberlite melt. In addition to oxide minerals, djerfsherite is widely distributed in the groundmass of kimberlites of the Niilonsuo pipe, the composition of which for the rocks of the body has been described for the first time. The combination of features of oxide mineralization indicates unfavorable conditions for the preservation of diamonds during their transportation by kimberlite melt.

Keywords: Finland; Kaavi-Kuopio; kimberlites; mineralogy; perovskite; spinel; ilmenite; djerfsherite; rutile; groundmass.

Оксидные минералы (шпинелиды, ильменит, рутил и др.) в том или ином количестве присутствуют в виде макро- и микрозёрен в кимберлитах всех известных тел, встречаются в ксенолитах мантийных пород и во включениях в алмазах [5]. Некоторые из них (хромит, ильменит) входят в число важнейших индикаторных минералов кимберлитов, использующихся при поисках месторождений алмаза шлихоминералогическим методом.

Макро- и мегазёрна этих минералов образуются в мантийных условиях и позволяют оценить глубину магматических очагов и особенности строения литосферной мантии.

В свою очередь оксидные минералы, кристаллизующиеся из кимберлитового расплава и возникающие при его взаимодействии с ранее образованными глубинными минералами, несут важную информацию о характере эволюции, динамике



подъёма кимберлитовых расплавов, изменении химизма и окислительной обстановки по мере их продвижения к поверхности, коррелирующую с данными о степени сохранности кристаллов алмаза в процессе транспортировки [5]. Размер зёрен таких оксидов, как правило, не превышает 100 мкм.

В работе приведены результаты исследования количественного соотношения, химического и фазового составов оксидных минералов и особенностей петрогеохимии кимберлитовых пород трубок Лахтоёки и Ниилонсуо, открытых в 1988–1989 гг. в Восточной Финляндии (поле Каави—Куопио) [19].

Геологическая позиция кимберлитов

Проявления кимберлитов и лампроитов известны в восточной и северной частях Финляндии в полях Каави—Куопио, Кухмо и Куусамо. Наиболее яркой отличительной чертой этих пород является

их докембрийский возраст, составляющий согласно определениям U-Pb методом по перовскиту от 1250 млн. лет (поле Кухмо) до 760 млн. лет (поле Куусамо) и 589–626 млн. лет (поле Каави—Куопио) [23; 24], тогда как подавляющее большинство известных кимберлитов мира имеют фанерозойский возраст.

Кимберлитовое поле Каави—Куопио расположено на юго-западной окраине Карельского кратона (рис. 1). Кимберлиты внедрились в архейский (3,5–2,6 млрд. лет) гнейсовый комплекс Карельского кратона и аллохтонные метаморфизованные осадочные породы (1,9–1,8 млрд. лет), надвинутые на кратон во время Фенноскандинавского орогенеза [19].

В настоящее время в пределах поля обнаружено около 20 дайкоподобных и трубчатых тел, сложенных кимберлитами I группы. Кимберлитовые тела образуют две группы (кластера): Каави и Куопио



Рис. 1. Схематическая геологическая карта Балтийского (Фенноскандинавского) щита [30, с изменениями], на врезке — схема расположения кимберлитовых тел в пределах кластеров Каави (восточного) и Куопио (западного) [32]: 1 — изученные архейские (>2,7 млрд. лет) кратонные области, 2 — неизученные архейские (>2,7 млрд. лет) кратонные области, 3 — протерозойский лапландско-кольский ороген (1,9 млрд. лет), 4 — протерозойский Сфенофинский ороген (1,9 млрд. лет), 5 — фанерозойский ороген каледонидов (500–400 млн. лет), 6 — недифференцированный поздний протерозойский и фанерозойский покров, 7 — алмазные месторождения, 8 — другие кимберлитовые проявления



(рис. 1). Трубки Лахтоёки и Ниилонсуо принадлежат к расположенному в восточной части поля кластеру Каави.

Трубка Лахтоёки (тело № 7) характеризуется наиболее высокой алмазонасностью (от 0,21 до 0,45, в среднем 0,306 карат/т) среди известных тел Финляндии [26]. На уровне современного среза она имеет овальную форму и размер 200×100 м. Основной объём трубки выполнен вулканокластическими кимберлитами диатремовой фации (кимберлитовыми и автолитовыми кимберлитовыми брекчиями), сформированными в несколько этапов [26]. Основные индикаторные минералы кимберлитов — пикроильменит, гранат и хромдиопсид; хромит практически отсутствует. Данные о составе названных минералов, петрографических и петрогеохимических особенностях пород трубки приведены в [20; 21; 26; 27].

Трубка Ниилонсуо (тело № 2) менее изучена. Известно, что она имеет сильно вытянутую форму (300×30 м), сложена преимущественно гипабиссальными, в меньшей степени — вулканокластическими кимберлитами, которые характеризуются низким содержанием граната [20] и алмаза (в среднем 0,0023 карат/т) [26].

Методы исследований

Химический и фазовый составы минералов изучены на растровом электронном микроскопе «Jeol JSM-6480 LV» с энергодисперсионным анализатором INCA Energy 350» в Лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии МГУ им. М.В. Ломоносова и на растровом электронном микроскопе «Tescan VEGA-II XMU» с энергодисперсионным спектрометром «INCA Energy 450» в ИЭМ РАН (г. Черноголовка), при ускоряющем напряжении 20 кВ и силе тока 10 нА (в Черноголовке — 160–200 пА).

Определение содержания главных и редких элементов в породах выполнено в лаборатории Wuhan Spectrum Analysis Technology Co., Ltd. (Китайский Геологический Университет, г. Ухань). Концентрации главных компонентов определены методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре последовательного действия XRF-1800 производства компании SHIMADZU. Качество анализов контролировалось измерениями международного стандарта GBW07105. Концентрации редких элементов измерены методом ICP-MS на масс-спектрометре Agilent 7700e. Точность анали-

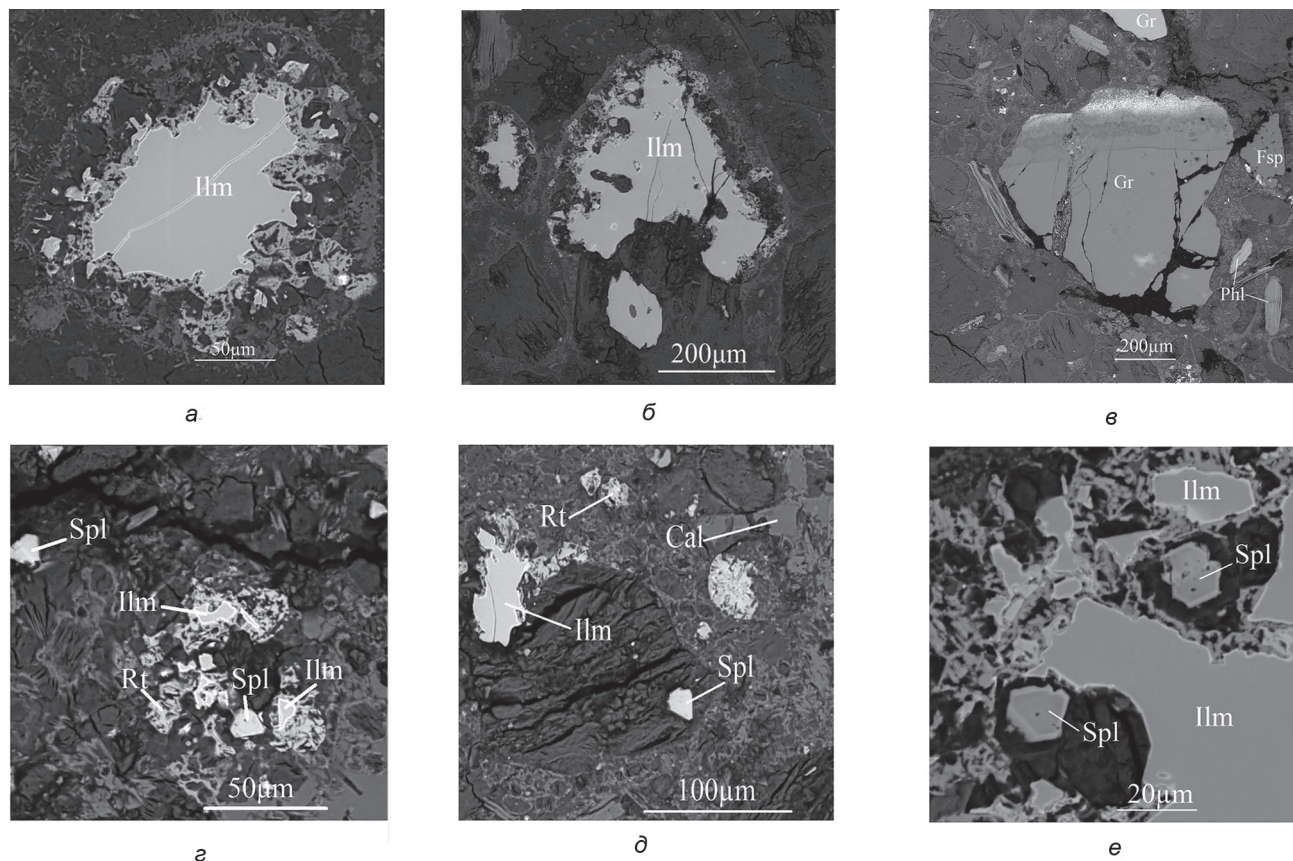


Рис. 2. Минералы кимберлитов трубки Лахтоёки: а, б — резорбированные зёрна магнезиального ильменита; в — обломок зерна пиропса с келифитовой каймой; г, д, е — оксидные минералы в связующей массе; изображения в обратно-рассеянных электронах



за составляла 4 отн.% для REE и 5—10 отн.% для других микроэлементов.

Результаты исследований

Характеристика образцов пород и их минеральный состав. Изучены образцы кимберлитовой брекчии из трубки Лахтоёки и массивного гипабиссального кимберлита из трубки Ниилонсуо.

Кимберлитовая брекчия из трубки Лахтоёки имеет светло-серую окраску, состоит из макрокристаллов размером до 4 мм, представленных зёрнами полностью замещённого серпентином и карбонатом оливина, флогопита, пикроильменита, иногда — граната (рис. 2), а также обломков вмещающих пород и попавших из них зёрен калиевого полевого шпата, редких (несколько процентов) ядерных и безъядерных пирокластов (автолитов), погружённых в мелкозернистый матрикс.

Массивный кимберлит с порфировой структурой из трубки Ниилонсуо более тёмный (серо-зелёный). Макрокристаллы в нём более многочисленные и представлены зёрнами оливина размером до 1 см, обладающими удлинённой и изометричной формами со сглаженными краями.

В крупных макрокристаллах присутствуют реликты незамещённого оливина (рис. 3, а). Более мелкие зёрна оливина нередко субидиоморфные и полностью серпентинизированы. Макрокристаллы флогопита и пикроильменита не обнаружены.

Мелкозернистая связующая масса изученных пород из обеих трубок состоит из переменных количеств серпентина, карбоната, флогопита и мелких зёрен рудных минералов, особенно многочисленных в кимберлитах трубки Ниилонсуо, реже — апатита. В связующей массе кимберлитов трубки Ниилонсуо присутствуют выделения минерала, сходного по составу с кирштейнитом $\text{CaFe}^{2+}(\text{SiO}_4)$, среди мелких рудных минералов широко распространён джерфшерит.

Оливин. Макрокристаллы неизменённого оливина, выявленные в гипабиссальных кимберлитах трубки Ниилонсуо, имеют сглаженную удлинённую форму и размер до 3,5 мм (рис. 3, а). Некоторые из них зональные: центральная часть имеет более железистый состав ($\text{Fo}_{85,8-86,5}$), чем обрастающая вокруг широкая (мощностью до 200 мкм) кайма ($\text{Fo}_{88,8-90,4}$) с повышенной концентрацией СаО (0,16—0,28 мас.%). Встречаются макрокристаллы оливина с серпентинизированными краями, не-

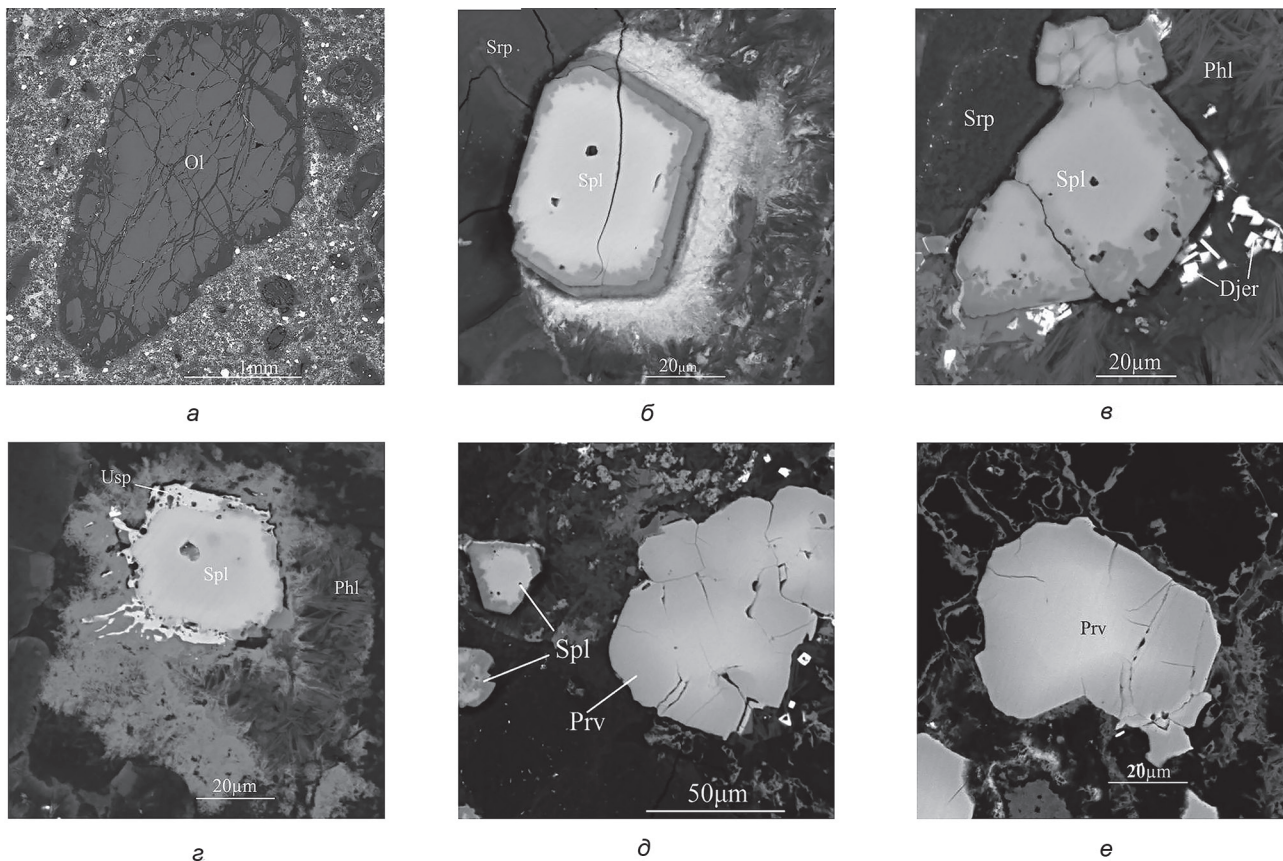


Рис. 3. Минералы кимберлитов трубки Ниилонсуо: а — зерно неизменённого оливина; б, в, г — зёрна хромшпинелидов неоднородного строения; д, е — зональные зёрна перовскита; изображения в обратно-рассеянных электронах



изменённые участки которых однородны и имеют наиболее магнезиальный состав ($\text{Fo}_{90,4-90,5}$).

Гранат, отмеченный в кимберлитах трубки Лахтоёки в виде обломков зёрен размером до 0,7 мм, представлен высокохромистым (9,4 мас. % Cr_2O_3 ; 5,7 мас. % CaO) пиропом лерцолитового парагенезиса, а также в различной степени обогащённым MnO (1,2—11 мас. %) альмандином (25,5—32,9 мас. % FeO) метаморфического генезиса из вмещающих пород. Обломок пироба имеет широкую (около 200 мкм) келифитовую кайму, состоящую из флогопита, хлорита и хромшпинелидов (рис. 2, б).

Флогопит в кимберлитах трубки Ниилонсуо образует мелкие (до 100 мкм) чешуйки в основной массе, в породах трубки Лахтоёки — крупные (до 4 мм) вкрапленники, чаще — пластинки длиной до 500 мкм. Последние характеризуются меньшей магнезиальностью ($\text{Mg}^\#$ ¹ 41—55) и более высокими содержаниями TiO_2 (2,5—3,4 мас. %) и Al_2O_3

(15—18,4 мас. %) по сравнению с флогопитом из кимберлитов Ниилонсуо ($\text{Mg}^\#$ 72—75; до 1,5 мас. % TiO_2 , 14—16,9 мас. % Al_2O_3). Флогопит келифитовой каймы вокруг пироба из кимберлитов трубки Лахтоёки, высокомагнезиальный ($\text{Mg}^\#$ 81—84), обогащён Cr_2O_3 (8,8—9,4 мас. %) и содержит 0,5—1,4 мас. % TiO_2 .

Фторапатит (F 4,5—4,9 мас. %) присутствует в матриксе кимберлитовых пород трубки Лахтоёки в виде зёрен размером до 30 мкм, нередко обрастает выделениями рутила. Содержит 2,4—2,9 мас. % SrO , что типично для апатита из лампроитов (1—6 мас. % SrO) [22].

Химический и фазовый составы оксидных минералов. Оксидные минералы представлены макрокристаллами магнезиального ильменита в кимберлитах трубки Лахтоёки и многочисленными мелкими (обычно ≤ 100 мкм) зёрнами оксидных минералов кимберлитового генезиса в мелкозернистой связу-

Таблица 1

Представительные анализы (мас. %) оксидных минералов из кимберлитов трубок Лахтоёки и Ниилонсуо

Оксиды	Лахтоёки						Ниилонсуо			
	Ильменит		Хромшпинелиды				Оксиды	Перовскит		
	центр	кайма	центр	край	центр	кайма		центр	край	кайма
MgO	14,8	4,5	13,5	14,5	12,2	15,5	CaO	35,8	37,4	35,0
Al_2O_3	0,5	0,8	11,5	19,3	7,5	27,5	TiO_2	54,4	55,2	52,4
TiO_2	56,8	53,3	6,3	7,7	5,1	4,3	Na_2O	0,4	0,5	1,1
V_2O_5	0,8	0,6	0,5	0,4	0,0	0,0	La_2O_3	1,8	1,2	0,3
Cr_2O_3	2,6	3,2	40,6	28,8	52,1	25,7	Ce_2O_3	3,6	2,0	0,7
MnO	0,4	9,7	1,2	1,0	0,1	0,4	Nd_2O_3	0,5	0,7	0,2
FeO	24,3	28,3	17,9	19,2	19,2	16,3	SrO	0,1	0,3	3,4
Fe_2O_3	0,0	0,0	9,6	11,2	5,0	11,4	Fe_2O_3	1,3	1,2	2,4
ZnO	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4	0,0	Nb_2O_5	0,9	1,2	0,9
Сумма	100,2	100,4	100,2	101,3	101,4	101,1	Al_2O_3	0,0	0,0	0,0
							Сумма	98,8	99,7	96,3*
Кристаллохимические коэффициенты										
Mg	0,51	0,17	0,64	0,66	0,56	0,68	Ca	0,90	0,93	0,87
Al	0,00	0,01	0,43	0,69	0,20	0,96	Ti	0,96	0,97	0,91
Ti	0,99	1,00	0,15	0,18	0,12	0,09	Na	0,02	0,02	0,05
Cr	0,01	0,02	1,02	0,69	1,41	0,60	La	0,02	0,01	0,00
Mn	0,01	0,21	0,03	0,02	0,01	0,01	Ce	0,03	0,02	0,01
Fe^{2+}	0,47	0,60	0,48	0,49	0,55	0,40	Nd	0,00	0,01	0,00
Fe^{3+}	0,00	0,00	0,23	0,26	0,15	0,25	Sr	0,00	0,00	0,05
V	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	Fe^{3+}	0,02	0,02	0,04
Zn	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	Nb	0,01	0,01	0,01
							Al	0,00	0,00	0,00

Примечание.*Низкая сумма в связи с малым размером каймы.

¹ $\text{Mg}^\# = 100 \times \frac{\text{Mg}}{\text{Mg} + \text{Fe}}$.



ющей массе кимберлитов обеих трубок. При этом распространённость, размер и количественные соотношения последних в кимберлитах изученных тел заметно различаются.

Так, в связующей массе гипабиссального кимберлита трубки Ниилоонсуо оксидные минералы более многочисленные (до 10 об. %) и в целом имеют более крупный размер (нередко до 100 мкм и более), чем в матрице кимберлитовой брекчии трубки Лахтоёки. Среди оксидных минералов связующей массы кимберлитов Ниилоонсуо резко преобладает перовскит, составляющий более 50% всех выделений оксидов, реже встречаются хромшпинелиды и титаномagnetит. Помимо оксидных минералов в связующей массе очень широко распространён джерфшерит.

В матрице кимберлитовой брекчии трубки Лахтоёки количество собственно кимберлитовых оксидных минералов примерно в три раза меньше, их размер обычно не превышает 25 мкм. Представлены они преимущественно рутилом, хромшпинелидами и марганцовистым ильменитом, в меньшей степени — титаномagnetитом (± титанит).

Ильменит. Образованные в глубинных (мантийных) условиях и вынесенные кимберлитовым расплавом к поверхности крупные (до 4 мм) зёрна магнетиального ильменита и их обломки, распространённые в кимберлитах трубки Лахтоёки, обычно сильно резорбированы (рис. 2, а, б). Состав большинства зёрен (табл. 1) характеризуется высокими содержаниями MgO (13,3—15,2 мас. %) и TiO₂ (55,3—57,3 мас. %), варьирующим количеством Cr₂O₃ (от 0,5 до 4,4 мас. %), низким содержанием Fe₂O₃ (до 3,1 мас. %) (рис. 4). Некоторые из них по соотношению Mg и Cr близки к макрокристаллами ильменита из кимберлитов алмазонасной трубки им. В. Гриба (Архангельская провинция) (рис. 4, б). Реже встречаются зёрна с более низкими содержаниями MgO (8,6—10,3 мас. %), TiO₂ (51,7—52,9 мас. %), Cr₂O₃ (0,2—0,5 мас. %), обогащённые железом.

Вокруг резорбированных зёрен магнетиального ильменита часто развиты каймы Cr-Mg-содержащего марганцовистого ильменита (MgO 4,4—4,5 мас. %; Cr₂O₃ 2,4—3,2 мас. %; MnO 7,5—9,7 мас. %), иногда совместно с Nb-содержащим рутилом. Изредка встречаются выделения ильменита с незначительной примесью MgO (0,9—1,8 мас. %), обогащённые Fe₂O₃ (до 7,7 мас. %).

Хромшпинелиды и титаномagnetит. В матрице кимберлитовой брекчии трубки Лахтоёки хромшпинелиды слагают идиоморфные зёрна размером до 25 мкм (рис. 2, г, д, е), состав кото-

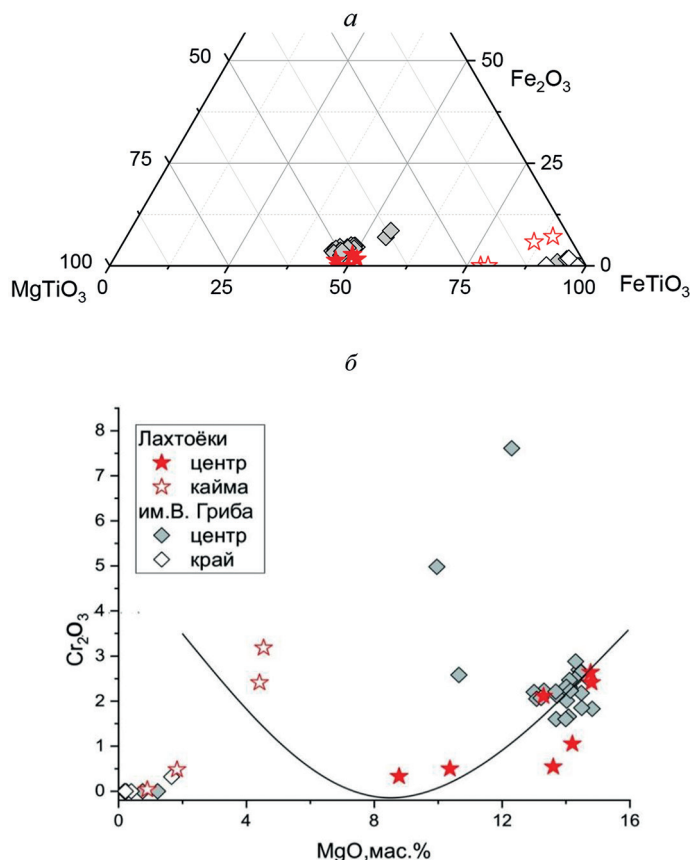


Рис. 4. Диаграммы составов в координатах основных минералов (а) и MgO-Cr₂O₃ (б) для ильменита из кимберлитов трубки Лахтоёки. Для сравнения нанесены точки составов макрокристов ильменита из кимберлитов трубки им. В.Гриба (Архангельская провинция)

рых характеризуется высоким содержанием MgO (12,7—15,5), широко варьирующими содержаниями Cr₂O₃ (37,9—46,6) и Al₂O₃ (11—22,9) (хромистость Cr^{#2} = 53—76) при 4,0—7,8 мас. % TiO₂. В некоторых зёрнах от центра к краю количество Cr₂O₃ снижается (от 39,7—40,6 до 28,8—36,7 мас. %), увеличиваются содержания Al₂O₃ (от 11,5—18,9 до 19,3—23,3 мас. %), MgO (от 13,3—13,7 до 14,5—19,7 мас. %), TiO₂ (от 4,66,7 до 5,37,7 мас. %) и Fe₂O₃ (до 12,6 мас. %). Изредка встречаются мелкие зёрна титаномagnetита (5,9 мас. % TiO₂), обогащённого Cr₂O₃ (13,6 мас. %), MgO (4,7 мас. %), Al₂O₃ (3 мас. %), MnO (1,7 мас. %).

В связующей массе кимберлитов трубки Ниилоонсуо хромшпинелиды образуют более крупные (иногда до 100 мкм) идиоморфные, неоднородные зёрна. Их края замещены шпинелидами, более тёмными на изображениях в отражённых электронах (рис. 3, б—д). Мощность изменённой зоны дости-

$$Cr\# = 100 \times \frac{Cr}{Cr + Al}.$$

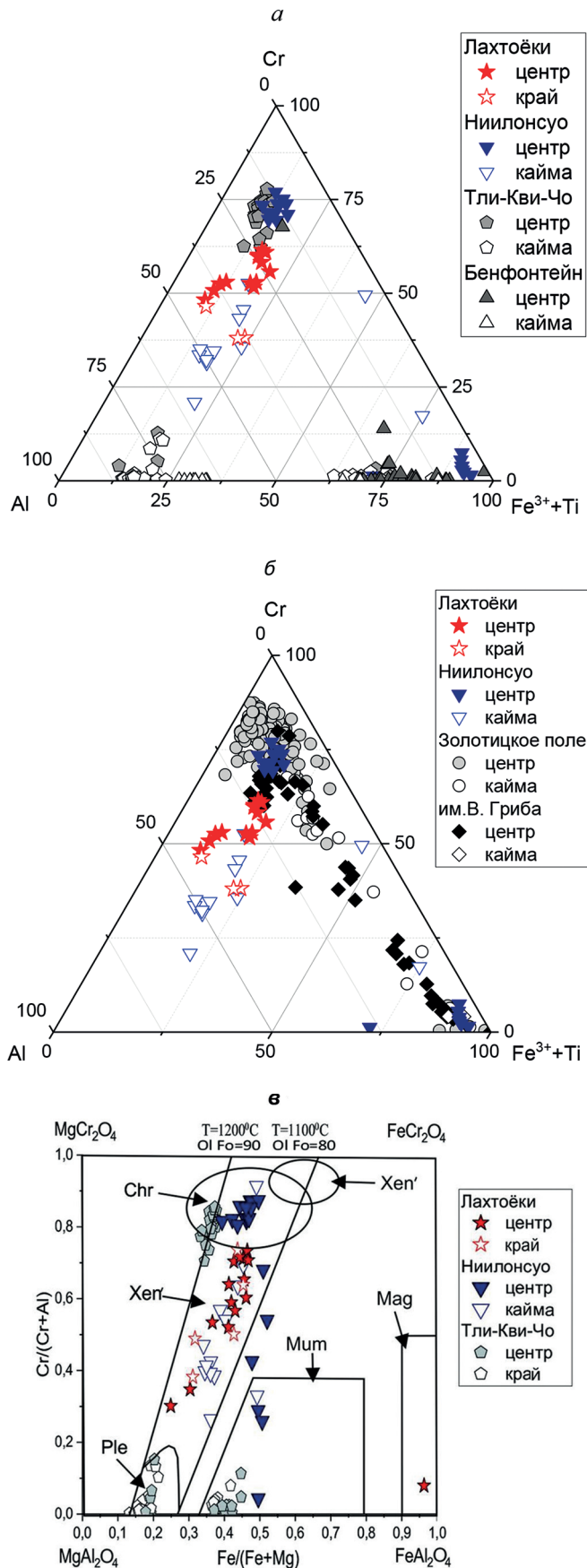


гает 10 мкм, её границы резкие, извилистые. Центры зёрен характеризуются высоким содержанием Cr_2O_3 (51,9—54,5 мас. %) при содержаниях (мас. %) Al_2O_3 5—8, TiO_2 4,5—5, MgO 11,4—12,4 мас. % и $\text{Cr}\# = 81,7\text{—}87,3$. Каймы обеднены Cr_2O_3 (до 16,7—25,7 мас. %), обогащены Al_2O_3 (до 27,4—31,2 мас. % Al_2O_3 ; $\text{Cr}\# = 26,4\text{—}69,4$), MgO (13,6—15,6 мас. %) и Fe_2O_3 . Иногда выделения хромшпинелидов окружены каймами титаномагнетита, встречающегося также в виде самостоятельных мелких (< 25 мкм) зёрен. От титаномагнетита из кимберлитов трубки Лахтоёки, он отличается высокими содержаниями TiO_2 (13—19,2 мас. %) и MgO (13,6—15 мас. %). Обычно содержит до 4,3 мас. % Cr_2O_3 (в каймах вокруг хромшпинелидов до 11), часто обогащён MnO (до 1,2 мас. %).

Наиболее ранние хромшпинелиды в кимберлитах трубки Ниилонсуо по составу приближаются к высокохромистым шпинелидам ранних стадий кристаллизации кимберлитов месторождения им. М.В. Ломоносова (Золотицкое поле, Архангельская провинция), не содержащих ильменит и близких к кимберлитам группы II Южной Африки (рис. 5, б). В свою очередь менее хромистые хромшпинелиды ранних стадий кристаллизации кимберлитов трубки Лахтоёки по составу ближе к таковым из богатых ильменитом кимберлитов трубки им. В. Гриба (группа I).

Для хромшпинелидов кимберлитовых пород обеих трубок куста Каави выявлен специфический характер зональности — обогащение Al и Mg краевых зон кристаллов. Хромшпинелиды с аналогичной зональностью ранее были отмечены в кимберлитах Финляндии (трубка № 1, поле Каави-Куопио) [27], Канады (трубка Тли-Кви-Чо, поле Лак де Грас) [16, 31], Южной Африки (силлы Бенфонтейн [10]; трубка De Beers [28]). Генезис этих хромшпинелидов не ясен, в качестве возможных причин образования называют большую скорость роста кристаллов при высокой температуре и вариации скорости диффузии хрома в расплаве на контакте с быстро растущим кристаллом [31], прекращение кристаллизации флогопита и обогащение расплава алюминием [28] и др.

Рис. 5. Диаграммы составов в коэффициентах основных элементах (а, б) и координатах $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})/\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ (в) для шпинелидов из связующей массы кимберлитовых пород трубок куста Каави, трубки Тли-Кви-Чо (а, б) [31] и алмазоносных тел Архангельской алмазоносной провинции [2]. Поля составов на рис.5, в [31]: Хен и Хен' — ксенокристаллы шпинели из перидотитов и метасоматизированных перидотитов соответственно, Chr — хромит, Mum — шпинелиды ряда магнезиальная ульвошпинель-магнетит, Ple — плеонаст (Al-шпинель), Mag — магнетит.





По нашему мнению, описанный характер изменения состава хромшпинелидов в изученных породах мог быть обусловлен растворением вкрапленников флогопита с высоким содержанием Mg и Al, оказавшихся нестабильными в поднимающемся кимберлитовом расплаве. Такой механизм возникновения обогащённых Al-шпинелидов предлагался для кимберлитов некоторых тел [12] и щелочных пикритов Северного Казахстана [7].

Вероятно, в кимберлитах трубки Ниилонсуо этот процесс был более интенсивным: сохранились лишь единичные макрокристы флогопита, а обогащённые Al шпинелиды слагают широкие каймы замещения. Высвободившийся при распаде флогопита калий, возможно, частично связывался в джерфишерите, которым обогащены кимберлиты данной трубки.

Перовскит, широко распространённый в связующей массе кимберлитов трубки Ниилонсуо, представлен крупными зёрнами размером до 100–200 мкм (рис. 3, д, е), часто образующими срастания с магнетиальным титаномagnetитом. Выделения перовскита, как правило, зональные. Центральные участки зёрен обогащены легкими редкоземельными элементами (до 5,9 мас. % REE_2O_3), Fe_2O_3 (до 1,7 мас. %), Na_2O (до 0,45 мас. %). Среди REE наиболее высокие концентрации характерны для церия (до 3,6 мас. % Ce_2O_3), более низкие — для лантана и неодима. К краю зёрен содержания REE_2O_3 , Na_2O и Nb_2O_5 постепенно уменьшаются (до 2,7, 0,12 и 0,2 мас. % соответственно), содержания CaO и SrO возрастают (до 38,0 и 0,3 мас. % соответственно) (рис. 6). Описанный характер зональности типичен для перовскита из классических кимберлитов [5].

Вокруг некоторых зональных зёрен наблюдаются тончайшие прерывистые каймы, сложенные перовскитом более поздней генерации, значительно отличающейся от ранних выделений этого минерала высокой концентрацией SrO (до 3,7 мас. %), при содержаниях Na_2O , REE_2O_3 , Fe_2O_3 и Nb_2O_5 до 1, 2, 3 и 0,9 мас. % соответственно. Агрегаты мельчайших зёрен такого Sr-содержащего перовскита с мелкими (несколько микрометров) вкраплениями позднего джерфишерита иногда полностью замещают крупные (до 300 мкм) зёрна, первоначальный состав которых установить невозможно.

Следует заметить, что содержание SrO в перовските кимберлитов обычно не превышает 0,6 мас. % [14]. Перовскит со схожим аномально высоким содержанием стронция описан в кимберлитах Лак де Грас (Канада) [13], где повышенные содержания этого элемента присущи перовскиту не только наиболее поздней (III), но и I генерации (до 3,4 и 2,2 мас. % соответственно) (рис. 6).

В кимберлитах трубки Лахтоёки перовскит не встречается.

Рутил участвует в формировании «ажурных» кайм вокруг крупных зёрен магнетиального ильменита и представлен мелкими (до 10 мкм) зёрнами, часто обрастающими Sr-содержащим апатитом, в связующей массе кимберлитов трубки Лахтоёки (рис. 2, з, д). Содержит примеси Nb_2O_5 (1,6–3 мас. %) и FeO (1,3–1,8 мас. %).

Вариации состава джерфишерита

Кроме оксидных минералов, в связующей массе кимберлитов трубки Ниилонсуо широко распространены скопления мелких (< 10 мкм)

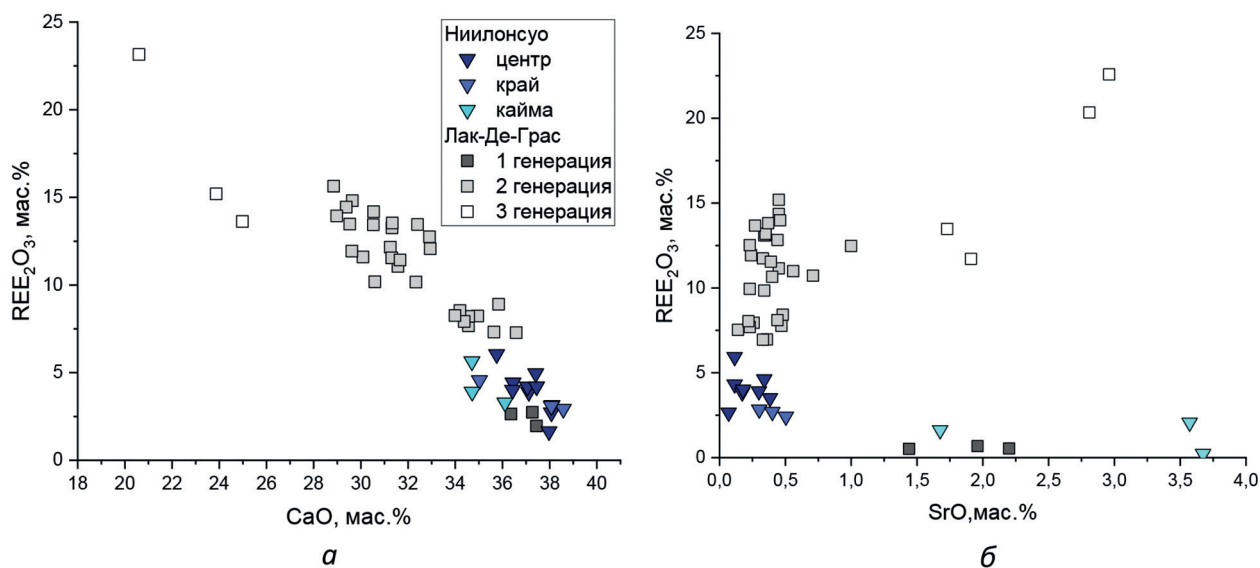


Рис. 6. Диаграммы составов для перовскита из кимберлитов трубки Ниилонсуо и поля Лак де Грас (Канада) [14]

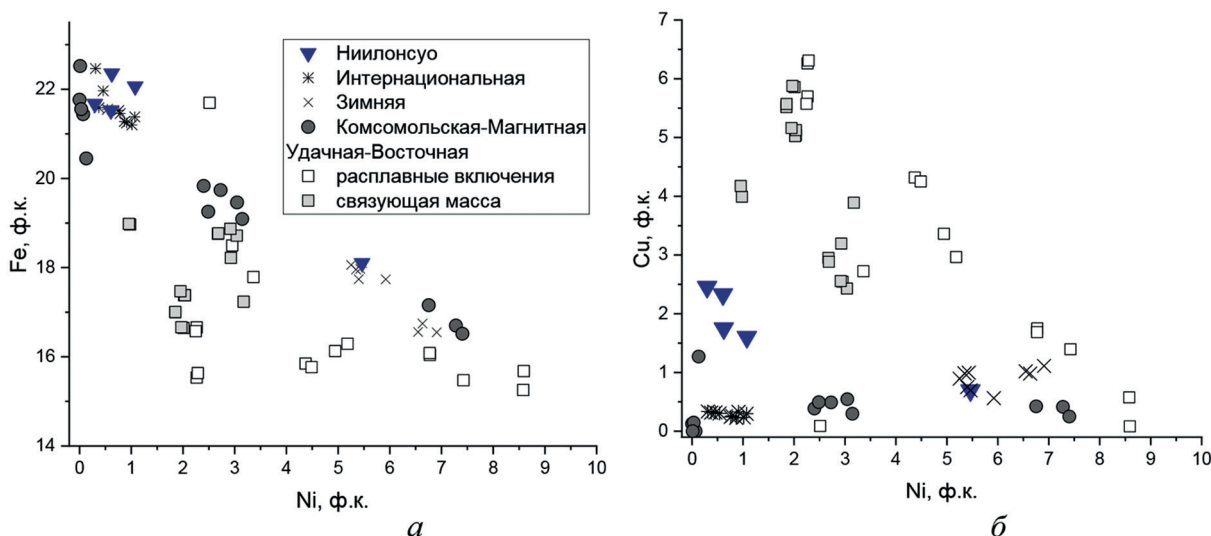


Рис 7. Диаграммы составов для джерфишерита из связующей массы кимберлитов трубки Ниолонсуо и кимберлитов Якутии (для трубок Удачная-Восточная, по [29], Интернациональная [8], Комсомольская-Магнитная и Зимняя [1])

идиоморфных, иногда скелетных зёрен калиевого хлорсодержащего сульфида — джерфишерита $K_6Na(Fe,Ni,Cu)_{24}S_{26}Cl$ (рис. 3). Химический состав джерфишерита для кимберлитов трубки Ниолонсуо описан впервые. Минерал характеризуется высокими содержаниями железа (44,3—48,2 мас. %) и меди (3,9—5,8 мас. %), низкими — никеля (0,6—2,4 мас. %), при незначительно варьирующих количествах K (9—9,3 мас. %) и Cl (1,2—1,4 мас. %). Схожее соотношение Fe и Ni наблюдается для K-Cl-сульфидов из связующей массы массивных гипабиссальных кимберлитов некоторых тел Якутии: трубки Интернациональная [8] и Комсомольская-Магнитная [1] (рис. 7, а), в последних минерал содержит меньше Cu (< 1,5 мас. %) (рис. 7, б).

Появление джерфишерита в кимберлитах может происходить путём кристаллизации из обогащённого Cl кимберлитового расплава в приповерхностных условиях при $T < 650^\circ C$ [9] или при постмагматических процессах за счёт Cl из соленосных отложений и рассолов вмещающих пород [18].

Петрохимическая и геохимическая характеристика пород

Составы изученных образцов кимберлитов представлены в табл. 2. Результаты исследования петрохимического состава показали, что кимберлиты обеих трубок можно отнести к умеренно-титанистому типу (1,1—2,5 мас. % TiO_2), по классификации [4], при этом среднее содержание TiO_2 в кимберлитах Ниолонсуо вдвое выше (2,11 мас. %), чем в кимберлитах трубки Лахтоёки (1,07 мас. %). Кроме того, кимберлиты трубки Ниолонсуо за-

Таблица 2
Содержание основных (мас. %) и редких (ppm) элементов в кимберлитах куста Каави

Компонент	Лахтоёки	Ниолонсуо
SiO_2	48,30	33,96
TiO_2	1,07	2,11
Al_2O_3	6,88	5,63
$Fe_2O_3^*$	7,39	11,42
MnO	0,12	0,21
MgO	22,83	22,22
CaO	4,00	11,64
Na_2O	0,56	0,13
K_2O	1,08	1,74
P_2O_5	0,12	0,40
П.п.п.	6,91	9,65
Сумма	99,25	99,12
Li	39,5	9,14
Be	1,45	2,23
Sc	8,70	21,2
V	91,7	252
Cr	840	1112
Co	63,3	71,4
Ni	789	608
Cu	55,3	209
Zn	58,9	138
Ga	9,23	10,7
Rb	36,9	109
Sr	270	625
Y	11,3	17,7
Zr	80,6	117



Nb	73,6	240
Sn	0,92	1,33
Cs	0,92	1,23
Ba	367	1341
La	39,6	153
Ce	68,5	259
Pr	7,36	28,1
Nd	24,0	85,2
Sm	3,50	10,5
Eu	0,86	2,65
Gd	2,71	6,94
Tb	0,35	0,78
Dy	1,95	3,67
Ho	0,38	0,63
Er	1,15	1,75
Tm	0,16	0,21
Yb	1,08	1,33
Lu	0,15	0,19
Hf	2,10	3,04
Ta	5,65	13,8
Tl	0,20	0,39
Pb	3,49	19,6
Th	6,57	22,7
U	1,81	4,71
La/Yb	36,66	115,08
REE	151,7	554,2

Примечание.*Суммарное железо.

метно отличаются от пород трубки Лахтоёки более высокими содержаниями Fe_2O_3 , CaO , K_2O и P_2O_5 (табл. 2).

В свою очередь характерная черта петрохимии кимберлитов трубки Лахтоёки — высокое содержание SiO_2 , обусловленное значительной степенью контаминации брекчии коровым материалом и интенсивным проработкой вторичными процессами, что подтверждается повышенными содержаниями Al_2O_3 и Na_2O . Коэффициент контаминации Клемента [15], рассчитанный для кимберлитов трубки Лахтоёки, равен 2,23, для трубки Ниилонсуо — 1,54.

Установлено, что гипабиссальные кимберлиты трубки Ниилонсуо характеризуются более высокими концентрациями редкоземельных элементов (ΣREE 554,2 ppm), чем кимберлитовые брекчии трубки Лахтоёки (ΣREE 151,7 ppm), при этом значительно доминируют элементы цериевой подгруппы (La/Sm 11,31—14,57; Gd/Yb 2,51—5,21) (табл. 2, рис. 8). Кроме того, кимберлитам трубки Ниилонсуо присуще повышенное содержание

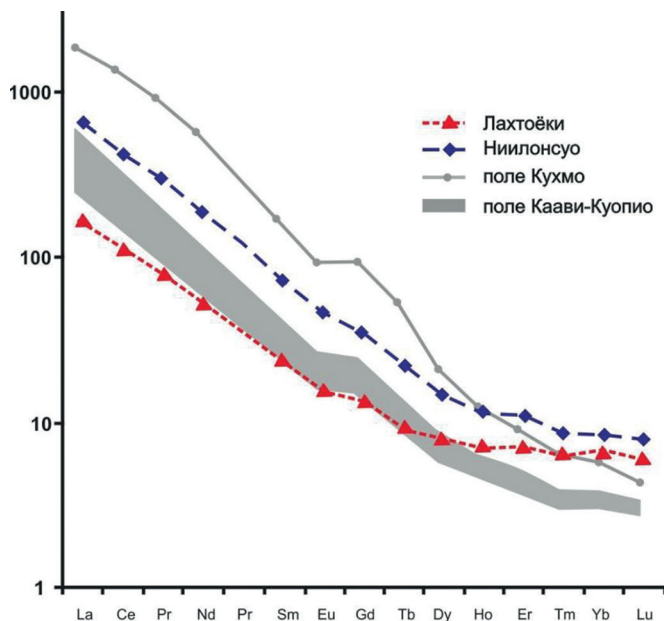


Рис. 8. Нормированное к хондриту распределение редкоземельных элементов в кимберлитах трубок Лахтоёки и Ниилонсуо; данные для пород полей Каави-Куопио и Кухмо, по [27]

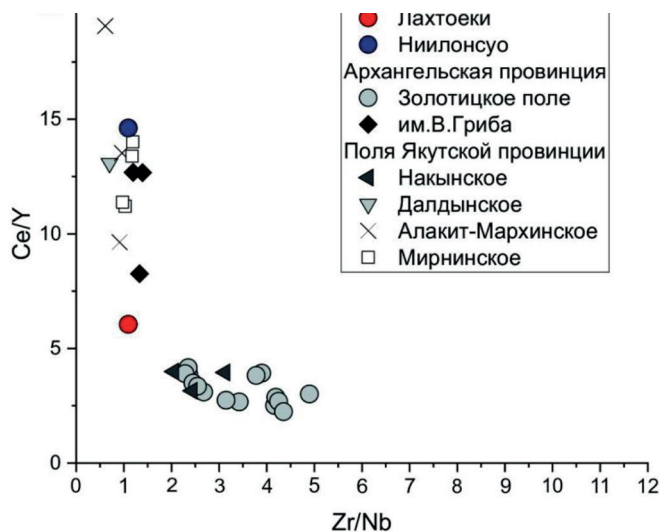


Рис. 9. Диаграмма в координатах Ce/Y — Zr/Nb для кимберлитовых пород трубок Лахтоёки и Ниилонсуо (Финляндия) и различных полей Якутской и Архангельской провинций [2; 6]

крупнокатионных литофильных элементов (K , Rb , V , Nb , Ba , Th , U , Ta) (табл. 1), что может быть обусловлено процессом метасоматического обогащения пород под воздействием флюида/расплава.

Породы обеих трубок обладают низким значением отношения Zr/Nb (0,49—1,09) (рис. 9), что типично для кимберлитов I группы Южной Африки. Вместе с тем в отличие от последних, содержащих 90—125 ppm La и 140—220 ppm Ce [22], кимберлиты трубки Лахтоёки обеднены, а ким-



берлиты трубки Ниилонсуо, наоборот, обогащены легкими редкоземельными элементами (табл. 2).

Ранее отмечалось [27], что по минеральному составу кимберлиты комплекса Каави-Куопио близки к кимберлитам группы I Южной Африки, но по геохимии и изотопному составу они ближе к кимберлитам Коиду в Западной Африке. Изотопный состав кимберлитов Каави-Куопио ($\epsilon_{Sr} = -6,9 \pm 1,0$ и $\epsilon_{Nd} = 0 \pm 1,3$) позволяет предполагать в качестве источника магм смесь источников типа южноафриканских кимберлитов группы I и литосферной мантии Карельского кратона [4].

Заключение

В результате выполненных исследований для трубок Лахтоёки и Ниилонсуо выявлены различия в петрохимии и геохимии кимберлитов, количественном соотношении и химическом составе оксидных минералов глубинного (мантийного) и собственно кимберлитового генезиса.

В соответствии с классификацией О.А. Богатикова и др. [4], кимберлиты обеих трубок можно отнести к одному петрогеохимическому типу (умеренно-титанистому). При этом в гипабиссальных кимберлитах трубки Ниилонсуо содержания TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , P_2O_5 , а также редкоземельных и крупнокатионных литофильных (K, Rb, V, Nb, Ba, Th, U, Ta) элементов выше, чем в кимберлитовых брекчиях трубки Лахтоёки (табл. 2). От промышленно-алмазоносных кимберлитов умеренно-титанистого типа, представленных в пределах Восточно-Европейской платформы палеозойскими кимберлитами месторождения имени В. Гриба, содержащими 0,97–1,4 мас.% TiO_2 и 31,8–36,4 мас.% MgO [4], породы изученных тел Финляндии отличаются более низким содержанием магния (22,2–22,8 мас.% MgO), более высокими концентрациями REE, Nb, Ta и Th.

Установлено, что в кимберлитах трубки Лахтоёки, обладающих повышенной алмазоносностью по сравнению с кимберлитами других тел Финляндии, основной минерал-концентратор TiO_2 — магнезиальный ильменит, образованный в глубинных (мантийных) условиях и вынесенный кимберлитовым расплавом к поверхности в виде макрокристаллов. В убогалмазоносных кимберлитах трубки Ниилонсуо макрокристаллы магнезиального ильменита не обнаружены, главным минералом титана выступает перовскит, кристаллизовавшийся из кимберлитового расплава. Перовскит является и основным концентратом редкоземельных элементов, повышенное содержа-

ние которых присуще кимберлитам данного тела. Ранее отмечалось, что высокое содержание перовскита в кимберлитах характерно преимущественно для низко- и неалмазоносных тел [3].

Основные вариации состава перовскита из кимберлитов трубки Ниилонсуо связаны с гетеровалентным изоморфизмом по схеме $Ca^{2+} + Ca^{2+} = Ce^{3+} + Na^+$, в меньшей степени $Ca^{2+} + Ti^{4+} = Na^+ + Nb^{5+}$. Высокое содержание Sr (до 3,7 мас. %) в поздней генерации перовскита указывает на кристаллизацию этого минерала до образования первичного апатита, концентрирующего стронций в большинстве кимберлитов других провинций.

Сравнительно крупный размер зёрен этого минерала в изученных породах указывает на длительность процесса его кристаллизации, протекавшей, согласно расчетам по Nb-Fe-перовскитовому оксидометру [11], при широком диапазоне значений фугитивности кислорода, соответствующей ΔNNO от -3,8 до 5,1 (от -3,8 до 0,7 и от -1,5 до 0,8 для центров и краев зёрен соответственно; до 5,1 для узкой внешней каймы). Отметим, что перовскит кимберлитов Якутии с повышенной алмазоносностью (трубок Айхал, Удачная, Юбилейная и Зарница) формировался при значительно меньших значениях этого параметра (в среднем около -3,0) [23]. Известно, что повышенный окислительный потенциал в кимберлитовом расплаве негативно влияет на сохранность алмаза [5; 17].

Наряду с перовскитом в связующей массе кимберлитов трубки Ниилонсуо широко развиты высокотитанистые шпинелиды, тогда как в кимберлитах трубки Лахтоёки высокотитанистые минералы собственно кимберлитового генезиса представлены рутилом и марганцовистым ильменитом, образующимися на поздних стадиях кристаллизации расплава.

Тренды изменения состава хромшпинелидов свидетельствуют о продолжительности глубинного этапа их кристаллизации при высоких температурах. Особенно ярко этот процесс проявлен в кимберлитах трубки Ниилонсуо, что является дополнительным неблагоприятным для сохранности алмаза фактором.

Ещё одной отличительной чертой кимберлитов трубки Ниилонсуо является широкая распространённость джерфшерита, состав которого для данного тела описан впервые.

Петро- и геохимические особенности изученных пород согласуются с результатами исследования минерального состава и определяются не только глубинными источниками, но и структурно-текстурными особенностями и фациальной принадлежностью кимберлитовых пород.



ЛИТЕРАТУРА

1. Азарова Н.С., Бовкун А.В., Варламов Д.А. Джерфишерит из кимберлитов Верхне-Мунского поля (Якутия) // Сборник XXIII Всероссийской научной конференции «Уральская минералогическая школа» 2017, посвященной 120-летию со дня рождения А.Г. Бетехтина. Екатеринбург: ООО Универсальная Типография «Альфа Принт», 2017. С. 14–15.
2. Архангельская алмазоносная провинция (геология, петрография, геохимия и минералогия) / Под ред. О.А. Богатикова, М.: Изд-во МГУ, 1999. 524 с.
3. Бовкун А.В. Минералогия оксидов из связующей массы кимберлитов Якутии (генетические и прикладные аспекты). Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. М., 2000, 22 с.
4. Богатилов О.А., Кононова В.А., Носова А.А., Каргин А.В. Полигенные источники кимберлитов, составы магм и алмазоносность (на примере Восточно-Европейской и Сибирской платформ) // Петрология. 2009. Том 17. № 6. С. 651–671.
5. Гаранин В.К., Бовкун А.В., Гаранин К.В., Ротман А.Я., Серов И.В. Микроструктурные оксиды из кимберлитов России. М.: ГЕОС, 2009. 489 с.
6. Кимберлиты и некимберлитовая алмазоносность изверженных и метаморфических пород: метод. руководство. М.: ГЕОКАРТ: ГЕОС, 2010. с. 448.
7. Спиридонов Э.М., Дашевская Д.М. Хромшпинелиды и ассоциирующие с ними минералы раннегеосинклинальных ультраосновных вулканитов Северного Казахстана // Новые данные о минералах М.: Наука, 1988. В. 35. С. 161–182.
8. Шарыгин В.В. Калиевый сульфид в кимберлитах трубки Интернациональная (Якутия) // Геохимия, петрология, минералогия и генезис щелочных пород: Материалы Всероссийского совещания (18–23 сентября 2006 г.). Миасс, 2006, С. 304–307.
9. Шарыгин И.С., Головин А.В., Похиленко Н.П. Джерфишерит в ксенолитах деформированных периодотитов трубки Удачная-Восточная (Якутия): проблемы происхождения и связь с кимберлитовым магматизмом // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 3. С. 321–340.
10. Abersteiner A., Kamenetsky V.S., Goemann K., Giuliani A. et. al. Composition and emplacement of the Benfontein kimberlite sill complex (Kimberley, South Africa): Textural, petrographic and melt inclusion constraints // Lithos. 2019. N. 324–325. P. 297–314.
11. Bellis A., Canil D. Ferric iron in CaTiO_3 perovskite as an oxygen barometer for kimberlitic magmas I: experimental calibration // Journal of Petrology. 2007. N. 18. P. 219–230.
12. Boctor N.Z., Boyd F.R. Oxide minerals in a layered kimberlite-carbonate sill from Benfontein, South Africa // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1981. Vol. 76. Issue 3. P. 253–259.
13. Doyle B.J., Kivi K. and Scott Smith B.H. The Tli Kwi Cho. (Do27 and Do18) Diamondiferous kimberlite complex, Northwest Territories, Canada // In: Gurney J.J., Gurney J.L., Pascoe, M.D. & Richardson, S.H. (eds) The J.B. Dawson Volume, Proceedings of the 7th International Kimberlite Conference. CapeTown: Red Roof Design, 1999. P. 194–204.
14. Chakhmouradian A.R., Mitchell R.H. Three compositional varieties of perovskite from kimberlites of the Lac de Gras field Northwest Territories, Canada // Mineralogical Magazine. 2001. Vol. 65(1). P. 133–148.
15. Chakhmouradian A.R., Mitchell R.H. Occurrence, alteration patterns and compositional variation of perovskite in kimberlites // Can. Mineral, 2000. Vol. 38. P. 975–994.
16. Clement C.R. A comparative geological study of some major kimberlite pipes in the Northern Cape and Orange Free State // Ph.D. Thesis (2 vols.), Univ. Cape Town, 1982.
17. Fedortchouk Y., Canil D., Semenets E. Mechanisms of diamond oxidation and their bearing on the fluid composition in kimberlite magmas // American Mineralogist. 2007. Vol. 92. P. 1200–1212.
18. Kamenetsky V.S., Maas R., Kamenetsky M.B. et al. Chlorine from the mantle: Magmatic halides in the Udachnaya-East kimberlite, Siberia // Earth and Planetary Sciences Letters. 2009. Vol. 285. P. 96–104.
19. Karen V. Smit and Russell Shor. Geology and Development of the Lomonosov Diamond Deposit, Northwestern Russia // Gems & Gemmology. 2017. Vol. 53. N. 2. P. 144–167.
20. Kontinen A., Paavola J., Lukkariinen H. K-Ar ages of hornblende and biotite from Late Archaean rocks of eastern Finland- interpretation and discussion of tectonic implications. // Geol. Surv. Finland, Bull. 1992. 365. P. 1–31.
21. Lehtonen M.L. Kimberlites in Finland: information about the mantle of the Karelian craton and implications for diamond exploration: academic dissertation. Espoo, 2005. 31 p.
22. Lehtonen M.L. and O'Brien H. Mantle transect of the Karelian Craton from margin to core based on P-T data from garnet and clinopyroxene xenocrysts in kimberlites. // Bulletin of the Geological Society of Finland. 2009. Vol. 81. P. 79–102.
23. Mitchell R.H. Kimberlites, Orangeites, and Related Rocks. New York and London (Plenum Press): Springer Science+Business Media, LLC, 1995. 410 p.
24. Nowicki T., Galloway M., le Roex A., Gurney J., Smith C., Canil D. Iron-in-perovskite oxygen barometry and diamond resorption in kimberlites and lamproites from southern Africa, Russia and Australia // 9th International Kimberlite Conference Extended Abstract No. 9IKC-A-00301. Frankfurt, 2008, Vol. 9, P. 1–3.
25. O'Brien H., Peltonen P., Vartiainen H. Kimberlites, carbonatites, and alkaline rocks. In: Lehtinen, M., et al // In: (Ed). Precambrian Geology of Finland—Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield. Developments in Precambrian Geology 14. Elsevier, Amsterdam, 2005. P. 605–644.
26. O'Brien H., Bradley J. New kimberlite discoveries in Kuusamo, Northern Finland. // Extended Abstract 9th IKC. Frankfurt. 2008. Vol. 9. 3 p.
27. O'Brien H. Kimberlite-hosted diamonds in Finland // Maier W.D., Lahtinen R. and O'Brien H. Mineral Deposits of Finland. Finland, Helsinki, 2015. P. 345–375.
28. O'Brien H., Tyni M. Mineralogy and Geochemistry of Kimberlites and Related Rocks from Finland // Extended Abstracts of 7th International Kimberlite Conference, Red Roof Design, Cape Town, 1999, Vol. 2. P. 625–636.
29. Pasteris, J.D. Spinel zonation in the De Beers kimberlite. South Africa — possible role of phlogopite. // Can. Mineral. 1983. Vol. 21. P. 41–58.
30. Sharygin V.V., Golovin A.V., Pokhilenko N.P., Kamenetsky V.S. Djerfisherite in the Udachnaya-East pipe kimberlites (Sakha-Yakutia, Russia): paragenesis, composition and origin// European Journal of Mineralogy. 2007. Vol. 19. N. 1. P. 51–63.
31. Roeder P.L. and Schulze D.J. Crystallization of Groundmass Spinel in Kimberlite // Journal of Petrology. 2008. Vol. 49. N. 8. P. 1473–1495.
32. Maankamara (Geological Survey Of Finland) [Электронный ресурс]. 2005. URL: <https://gtkdata.gtk.fi/Maankamara/index.html> (дата обращения 14.04.2019).



REFERENCES

1. Azarova N.S., Bovkun A.V., Varlamov D.A. Djerfisherite from kimberlites of Verhne-Munskoe field (Yakutia). *Collection of the XXIII all-Russian scientific conference «Ural mineralogical school» 2017, dedicated to the 120th anniversary from the birthday of A.G. Betekhtin*, Yekaterinburg, Ltd Universal Typography «Alpha Print», 2017, pp. 14–15 (In Russian)
2. *Arhangelskaya amazonosnaya provinciya (geologiya, petrographiya, geohimiya i mineralogiya)* [Arkhangelsk diamondiferous province (Geology, petrography, geochemistry and Mineralogy)]. Ed. by O.A. Bogatikov, M., Moscow State University Publ., 1999, 524 p. (In Russian)
3. Bovkun A.V. *Mineralogia oksidov iz svyazyushey mass kimberlitov Yakutii (geneticheskie i prikladnye aspekty)* Diss. dokt. geol.-min.nauk [Mineralogy of the oxides of the groundmass kimberlites of Yakutia (genetic and applied aspects)]. Dr. geol.-min. sciences. Moscow, 2000, 22 p. (In Russian)
4. Bogatikov O.A., Kononova V.A., Nosova A.A., Kargin A.V. Polygenic sources of kimberlites, compositions of magmas and diamond content (on the example of East European and Siberian platforms). *Petrology*, 2009, vol. 17, no. 6, pp. 651–671. (In Russian)
5. Garanin V.K., Bovkun A.V., Garanin K.V., Rotman A.Y., Serov I.V. *Mikrokristallicheskie oksidi iz kimberlitov Rossii* [Microcrystal oxides from Russian kimberlites]. Moscow, GEOS Publ., 2009, 489 p. (In Russian)
6. *Kimberliti i nekimberlitovaya amazonosnost izverzhennih i metamorficheskikh porod* [Kimberlites and non-kimberlite diamond-bearing of igneous and metamorphic rocks]: Method. guide. Moscow, GEOKART, GEOS Publ., 2010, 448 p. (In Russian)
7. Spiridonov E.M., Dashevskaya D.M. Chromespinelides and associate with them minerals of early geosynclinal ultramafic volcanic rocks of the Northern Kazakhstan. *Novie dannie o mineralah — New data on minerals*. Moscow, 1988, Is. 35, pp. 161–182. (In Russian)
8. Sharygin V.V. Potassium sulphide in kimberlites of the pipe International (Yakutia). Geochemistry, Petrology, Mineralogy and Genesis of alkaline rocks [Proc. of the all-Russian meeting «Geochemistry, Petrology, Mineralogy and Genesis of alkaline rocks» (September 18–23, 2006)]. Miass, 2006, pp. 304–307. (In Russian)
9. Sharygin I.S., Golovin A.V., Pokhilenko N.P. Djerfisherite in xenoliths of deformed peridotites of the pipe Udachnaya-East (Yakutia): Problems of origin and communication with kimberlite magmatism. *Geologiya i Geofizika, Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, no. 3, pp. 321–340. (In Russian)
10. Abersteiner Adam et al. Composition and Emplacement of the Benfontein Kimberlite Sill Complex (Kimberley, South Africa): Textural, Petrographic and Melt Inclusion Constraints. 2019, vol. 324–325, pp. 297–314., doi:10.1016/j. Lithos. 2018.11.017.
11. Bellis, Anthony and Dante Canil. «Ferric Iron in CaTiO₃ Perovskite as an Oxygen Barometer for Kimberlitic Magmas I: Experimental Calibration». *Journal of Petrology*, 2006, vol. 48, no. 2, pp. 219–230., doi:10.1093/petrology/egl054.
12. Bector, Nabil Z., and F. R. Boyd. «Oxide Minerals in a Layered Kimberlite-Carbonate Sill from Benfontein, South Africa». *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1981, vol. 76, no. 3, pp. 253–259, doi:10.1007/bf00375452.
13. Chakhmouradian, A. R., and R. H. Mitchell. Occurrence, Alteration Patterns And Compositional Variation Of Perovskite In Kimberlites. *The Canadian Mineralogist*, 2000, vol. 38, no. 4, pp. 975–994., doi:10.2113/gscanmin.38.4.975.
14. Chakhmouradian, A.R., and R.H. Mitchell. Three Compositional Varieties of Perovskite from Kimberlites of the Lac De Gras Field (Northwest Territories, Canada). *Mineralogical Magazine*, 2001, vol. 65, no. 1, pp. 133–148, doi:10.1180/002646101550082.
15. Clement, C.R. A comparative geological study of some major kimberlite pipes in the Northern Cape and Orange Free State, *Ph.D. Thesis* (2 vols.), Univ. Cape Town, 1982.
16. Doyle, B.J., Kivi, K. and Scott Smith B.H. The Tli Kwi Cho (DO27 and DO18) Diamondiferous Kimberlite Complex Slave Craton, Northwest Territories, Canada. *International Kimberlite Conference Extended Abstracts*, 1998, doi:10.29173/ikc2682.
17. Fedortchouk, Y., et al. Mechanisms of Diamond Oxidation and Their Bearing on the Fluid Composition in Kimberlite Magmas. *American Mineralogist*, 2007, vol. 92, no. 7, pp. 1200–1212., doi:10.2138/am.2007.2416.
18. Kamenetsky, Vadim S., et al. Chlorine from the Mantle: Magmatic Halides in the Udachnaya-East Kimberlite, Siberia. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, vol. 285, no. 1–2, pp. 96–104, doi:10.1016/j.epsl.2009.06.001.
19. Kontinen A., Paavola J., Lukkariinen H. K-Ar ages of hornblende and biotite from Late Archaean rocks of eastern Finland — interpretation and discussion of tectonic implications. *Geol. Surv. Finland, Bull.*, 1992, 365, pp. 1–31.
20. Lehtonen M.L. *Kimberlites in Finland: information about the mantle of the Karelian craton and implications for diamond exploration : academic dissertation*. Espoo, 2005, 31 p.
21. Lehtonen, M., and H. O'Brien. Mantle Transect of the Karelian Craton from Margin to Core Based on P-T Data from Garnet and Clinopyroxene Xenocrysts in Kimberlites. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 2009, vol. 81, no. 2, pp. 79–102, doi:10.17741/bgsf/81.2.001.
22. Mitchell R. H. *Kimberlites, Orangeites, and Related Rocks*. New York and London (Plenum Press): Springer Science+Business Media, LLC Publ., 1995, 410 p.
23. Nowicki, T., et. Al. Iron-in-Perovskite Oxygen Barometry and Diamond Resorption in Kimberlites and Lamproites from Southern Africa, Russia and Australia. *International Kimberlite Conference Extended Abstracts*, 2008, doi:10.29173/ikc3530.
24. O'Brien, H.E., et al. Chapter 14 Kimberlites, Carbonatites, and Alkaline Rocks. *Precambrian Geology of Finland Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield Developments in Precambrian Geology*, 2005, pp. 605–644, doi:10.1016/s0166-2635(05)80015-5.
25. O'Brien, H., Bradley, J. New Kimberlite Discoveries in Kuusamo, Northern Finland. *International Kimberlite Conference Extended Abstracts*, 2008, doi:10.29173/ikc3565.
26. O'Brien, H. Kimberlite-Hosted Diamonds in Finland. *Mineral Deposits of Finland*, 2015, pp. 345–375, doi:10.1016/b978-0-12-410438-9.00014-5.
27. O'Brien, H., Tyni, M. Mineralogy and Geochemistry of Kimberlites and Related Rocks from Finland. *International Kimberlite Conference Extended Abstracts*, 1998, doi:10.29173/ikc2832.
28. Pasteris, J.D. Spinel zonation in the De Beers kimberlite. South Africa — possible role of phlogopite. *Can. Mineral*, 1983, vol. 21, pp. 41–58.
29. Sharygin, Victor V., et al. Djerfisherite in the Udachnaya-East Pipe Kimberlites (Sakha-Yakutia, Russia): Paragenesis, Composition and Origin. *European Journal of Mineralogy*, 2007, vol. 19, no. 1, pp. 51–63, doi:10.1127/0935-1221/2007/0019-0051.
30. Smit, Karen V., and Russell Shor. Geology and Development of the Lomonsov Diamond Deposit, Northwestern Russia, *Gems & Gemology*, 2017, doi:10.5741/gems.53.2.144.
31. Roeder, P.L., and D.J. Schulze. Crystallization of Groundmass Spinel in Kimberlite. *Journal of Petrology*, 2008, vol. 49, no. 8, pp. 1473–1495., doi:10.1093/petrology/egn034.
32. *Maankamara*, 2005. Available from: <http://www.gtkdata.gtk.fi/Maankamara/index.html>. (last accessed 14.04.2019).
33. Modeland Sh. *Diamond exploration in Eastern Finland*. Karelian Diamond Resources, Available from: <http://www.4-traders.com/KARELIAN-DIAMOND-RESOURCE-4004801/news/Karelian-Diamond-Resources-Beaufort-Report-KDR-Diamond-exploration-in-Eastern-Finland-22011906.html>. (last accessed 14.04.2019).