

УДК 549 + 551.21 + 552.4 (470.1/2)

## ДРЕВНЕЙШИЕ В РОССИИ АЛМАЗОНОСНЫЕ КИМБЕРЛИТЫ И МЕТАКИМБЕРЛИТЫ КИМОЗЕРА, КАРЕЛИЯ

Е.В. Путинцева

Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Санкт-Петербург, [lputinseva@mail.ru](mailto:lputinseva@mail.ru)

Э.М. Спиридонов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, [ernstspiridon@gmail.com](mailto:ernstspiridon@gmail.com)

Рассмотрена история формирования минерального состава древнейших в России кимберлитов Кимозера, Карелия. Кимберлиты прорвали габбро-долериты и шунгитоносные осадочные породы людиковия (палеопротерозоя) и содержат их ксенолиты. Все эти породы тектонизированы и однотипно метаморфизованы. Описаны минералы кимберлитов — флогопит, хромшпинелиды, группа ильменита (гейкилит, пикроильменит, Mn ильменит, пирофанит), титаномагнетит, апатит, циркон, бадделейт. Рассмотрена эволюция состава хромшпинелидов и минералов группы ильменита, их общая особенность — обогащенность Mn. Можно предположить, что кимберлиты Кимозера возникли при участии карбонатитовых расплавов повышенной щелочности. Метагаббро-долериты ксенолитов в кимберлитах слагают альбит, клиноцоизит, эпидот, хлориты, актинолит, пренит, пумпеллиит-(Fe), титанит, кварц, Al кронштедтит, гематит, Mn-Mg ферроаксинит, ленниленапейт; это образования пренит-пумпеллиитовой фации. Метаморфизованные кимберлиты Кимозера — петротип метакимберлитов пренит-пумпеллиитовой фации (ППФ). Описаны слагающие их серпентины (антигорит, реликтовый лизардит), тремолит, актинолит, кальцит, доломит, клинохлор, магнетит, титанит, корренсит, тальк, апатит, рутил, гематит, ферропсевдобрुकит, алланит-(Ce), гидроксилбастнезит-(Ce), гидроксилпаризит-(La), гидроксилпаризит-(Ce), гидроксилпаризит-(La), бастнезит-(Ce), паризит-(Ce), монацит-(Ce), ниобозшшинит-(Ce), апатит, циркон, бадделейт, пентландит, пирротин, полидимит, зигенит, торит, биксбиит, реликтовый и поздний миллерит. Минералы стронция отсутствуют. Минералы REE метакимберлитов — алланит, бастнезит, паризит, монацит, ниобозшшинит наследовали Ce, Ce-La и Ce-La-Nd специфику магматических кальцита, перовскита и апатита. Границы кристаллов минералов REE и титанита, антигорита, тремолита — индукционные поверхности совместного роста. Наиболее распространен алланит-(Ce). Специфика метаморфогенного алланита: его кристаллы незональны, значительная изменчивость содержаний REE и соотношения  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  в кристаллах, удаленных друг от друга на первые десятки мкм, разнообразие состава: одни кристаллы селективно Ce, в составе других обилие La, в третьих Nd > La. Алланит в агрегатах клинохлора беден Ti, Cr и V; в сростаниях с титанитом содержит 1–2 мас.%  $TiO_2$ , на контакте с феррихромитом — до 9 мас.%  $Cr_2O_3$ . Большая часть алланита Кимозера принадлежит ряду алланит — ферриалланит (до 30% минала ферриалланита), меньшая — ряду алланит — хромалланит. При последующих процессах метаморфизма алланит замещал гидроксилбастнезит и гидроксилпаризит или монацит. Распространены прорастания бастнезита и паризита. Монацит-(Ce) крайне беден Y, P и Th, беден Nd и обогащен La, обычно развит в метакимберлитах антигоритового состава. Метакимберлиты Кимозера содержат выделения незональных циркона и бадделейта неправильной формы до «диффузных». Эти минералы лишены Nb, Th, Y, Ti. Метаморфогенный циркон беден гафнием, содержит 0.5–0.7 мас.%  $HfO_2$ . Выделяется новый генетический тип — метаморфогенно-гидротермальная REE и Zr минерализация в метакимберлитах ППФ. Sm-Nd датировка метакимберлитов пренит-пумпеллиитовой фации отражает время их метаморфизма, а не время внедрения кимберлитов.

В статье 16 рисунков, 22 таблицы, список литературы из 77 названий.

Ключевые слова: кимберлиты, хромшпинелиды, группа ильменита, апатит, циркон, бадделейт, метакимберлиты, актинолит, алланит, бастнезит, паризит, монацит, ниобозшшинит, торит.

Кимберлиты — наиболее важный источник алмазов, один из интереснейших петрологических и минералогических объектов. Они являются производными карбонатно-силикатных щелочных ультраосновных расплавов с различными пропорциями силикатных и карбонатных составляющих; карбонатные обычно отвечают кальцитовым карбонатам, значительно реже — доломитовым или обогащенным марганцем кальцитовым карбонатам, изредка — натрокарбонатам (Доусон, 1983; Никишов, 1984; Gaspar, Wylley, 1984; Jones, Wylley, 1985; Mitchell, 1986; Джейкс и

др., 1989; Милашев, 2015). Кимберлиты с наиболее высокой долей карбонатитового материала обычно менее алмазоносны. Раннепротерозойские кимберлиты Кимозера (Карелия), обнаруженные в 1992 г. (Ушков, 2001), слагают залежь длиной более 2 км, плохо обнажены, в значительной степени тектонизированы, интенсивно метаморфизованы. Очевидно по этим причинам недостаточно изучены состав исходных кимберлитов, процессы и продукты их зеленокаменного перерождения — метакимберлиты, несмотря на то, что им посвящена серия публикаций (Ушков,

2001; Лукьянова и др., 2006; Устинов и др., 2009; Афанасьева, 2009; Самсонов и др., 2009; Priyatkina *et al.*, 2014). В статье приведены результаты изучения минералов кимберлитов Кимозера, исключая алмаз и ксеногенные гранаты и клинопироксены, и результаты изучения продуктов зеленокаменного перерождения кимберлитов и заключенных в них ксенолитов габбро-долеритов.

## Материалы и методы исследования

Изучена обширная коллекция кимберлитов Кимозера, отобранных Е.В. Путинцевой из естественных обнажений и серии скважин поискового бурения.

Анализы хромшпинелидов, ильменита, редкоземельных минералов, циркона, бадделита, актинолита, карбонатов выполнены параллельно в лабораториях МГУ (анал. Н.Н. Коротаева), ИМГРЭ (анал. И.М. Куликова и О.А. Набелкин, Samscan SX-50) и ВСЕ-ГЕИ (анал. Е.Л. Грузова, Samscan MV 2300). Сходимость результатов весьма хорошая. Значительную часть электронных фотографий и анализов минералов выполнила Н.Н. Коротаева (аналитический комплекс с комбинированной системой микроанализа на базе СЭМ Jeol JSM-6480 LV, лаборатория локальных методов исследований кафедры петрологии геологического факультета МГУ) по стандартной методике. Анализы минералов с лантанидами и актиноидами выполнены по методике И.М. Куликовой (Куликова, Набелкин, 2014). Метод рентгеноспектрального определения 14 лантанидов с учетом наложения линий, влияния селективного поглощения и возбуждения другими элементами разработан Р.Л. Баринский (ИМГРЭ) в 1958 г. И.М. Куликова усовершенствовала методику Р.Л. Баринского применительно к современным приборам; экспериментальные условия работы: режим WDS, ускоряющее напряжение 20 кВ, ток пучка электронов 30 нА, режим стабилизации тока, определяются 14 лантанидов и Y, Th, U, Ca, P, Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Sr, Na, Ba, Ti; эталоны — синтетические фосфаты индивидуальных лантанидов и иттрия, диоксиды тория, урана и титана, барит, целестин; экспозиция 10–60 секунд; измерения аналитических линий проводятся в два этапа: вначале измеряются относительные интенсивности четных лантанидов и Si, Y, Th, P, Ca, Sr, затем по аналогичной схеме в тех же точках определяются относительные интенсивности остальных химических элементов; пределы обнаружения (мас.%): Y, REE 0.2; Na 0.12; Cr, V, Mn, Mg 0.08; Th, U 0.02; расчет концент-

раций 30 и более химических элементов одновременно проводится в программе CalcZaf.exe, метод коррекции ZAF или PAP. Для некоторых минералов выполнены прецизионные анализы, пределы обнаружения REE — 0.04%.

В тексте статьи и на рисунках дана единая, сквозная, нумерация химических анализов.

## Кимберлиты Кимозера

Кимозерское проявление алмазоносных кимберлитов расположено в юго-восточной части Балтийского щита Русской платформы, в пределах Онежской структуры Карельского кратона, фундаментом которой является Водлозерский блок позднеархейской стабилизации (Ушков, 2001; Путинцева, 2002; Путинцева и др., 2008, 2009). Кимозерское — одно из древнейших проявлений кимберлитов, оценки изотопного возраста варьируют от 1.99 до 1.92 млрд лет (Самсонов и др., 2009; Priyatkina *et al.*, 2014). Кимозерское проявление представлено уплощенной удлиненой (~ 2 км) залежью и серией крутопадающих трубообразных тел, сложенных кимберлитовыми брекчиями, туфами, массивными кимберлитами как минимум двух фаз внедрения (Ушков, 2001; Путинцева, 2002; Путинцева и др., 2009; Устинов и др., 2009). Кимберлиты внедрились в габбро-долериты раннего протерозоя и шунгитоносные терригенные породы людиковского (Онежская, 2011), слагают в них апофизы, содержат массу их ксенолитов и скиалитов. В центре залежи кимберлитов обычно это габбро-долериты, в краевой части широко распространены включения шунгитоносных пород (Ушков, 2001; Афанасьева, 2009; Устинов и др., 2009). Наблюдались ксенолиты массивных порфириловидных с микролитовой матрицей кимберлитов I фазы в кимберлитовых брекчиях II фазы.

Спектры распределения лантанидов в кимберлитах Кимозера соответствуют типичным кимберлитам мира: они обогащены легкими лантанидами с характерным европиевым минимумом (рис. 1а). Кимберлиты I фазы богаче лантанидами, чем кимберлиты II фазы. Кимберлиты Кимозера обычно содержат 0.8–1.4 мас.% TiO<sub>2</sub>, до 1.5% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, их железистость от 18.3 до 26.1. Высокотитанистые разновидности кимберлитовых пород I фазы содержат до 2.3–3% TiO<sub>2</sub> и 1500–1700 г/т Zr, около 550 г/т REE. Кимберлитовые породы II фазы обычно содержат 210–300 г/т REE.

Кимберлитовые породы краевых частей залежи ряд геологов рассматривает как туфы и перемытые туфы кратерной фации (Афана-

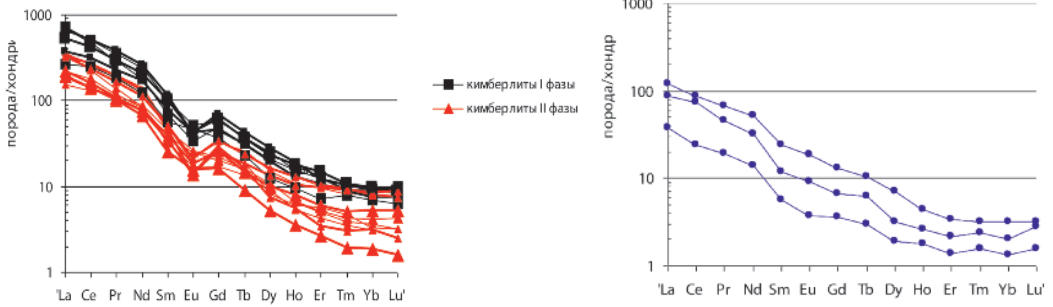


Рис. 1. Содержания лантанидов, нормированные по хондриту. а — кимберлиты Кимозера I фазы (черные) и II фазы (красные); б — породы внешней зоны кимберлитской залежи — шунгитоносные терригенные породы с инъециями кимберлитов.

свева, 2009; Устинов и др., 2009; Priyatkina *et al.*, 2014). Часть этих образований гораздо беднее лантанидами, чем кимберлиты (рис. 1b). Вероятно, это терригенные породы, бедные лантанидами, инъецированные количественно подчиненными кимберлитами.

Кимберлитовые породы I фазы с множеством вкрапленников оливина и флогопита заметно более магнитные, чем кимберлитовые породы II фазы. Среди вкрапленников в кимберлитах I фазы — алюмомагнезиохромит, магнезиохромит, гейкилит, пикроильменит. Кимберлиты II фазы обогащены лейстовидным магматическим кальцитом (наблюдается в тех участках, где породы слабо метаморфизованы). Среди вкрапленников кимберлитов II фазы — оливин, магнезиохромит и ильменит до пикроильменита. Судя по морфологии псевдоморфоз актинолит-тремолита, окружающих крупные зерна серпентинизированного оливина, возможно, оливин в кимберлитах II фазы окружали каймы монтичелита. В связующей массе кимберлитов Кимозера обильны оливин, флогопит, кальцит, немало ильменита, хромита, титаномагнетита, местами апатита, бадделейт и циркон редки.

## Минералогия кимберлитов Кимозера

Оливин кимберлитов слагает вкрапленники двух генераций. Мегакристы — индивиды оливина I (до 60–70% объема пород) — округлые, угловато-округлые (в том числе обломки) достигают 5–6 мм. Кристаллы оливина II размером <1 мм сохраняют кристаллографическую огранку. Микрولиты оливина основной массы не сохранились. Оливин полностью замещен вторичными минералами. Морфология оливина пород Кимозера близка к типичной для алмазоносных кимберлитов (Путинцева, 1991).

Флогопит кимберлитов I фазы слагает небольшие, до 3 мм, толстотаблитчатые кристаллы-вкрапленники. Некоторые кристаллы оторочены тетраферрифлогопитом. В отличие от кимберлитов II фазы, сохраняются реликты неизмененного флогопита. Состав флогопита, мас.%, анализ 1 (центр кристалла) и 2 (край кристалла): SiO<sub>2</sub> 37.68 и 39.09; TiO<sub>2</sub> 5.10 и 3.29; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 13.52 и 14.39; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.47 и 0.17; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 4.50 и 4.96; FeO 7.27 и 5.51; MnO 0.23 и следы; MgO 21.56 и 22.93; K<sub>2</sub>O 9.92 и 9.32; BaO 0.35 и 0.40; F 0.48 и 0.59; сумма — O = F<sub>2</sub> 100.78 и 100.40; количество Fe<sup>2+</sup> и Fe<sup>3+</sup> рассчитано по стехиометрии. Такое содержание фтора и тренд изменения состава с ростом содержания алюминия и снижением титана и суммарного железа типичны для флогопита кимберлитов. Столь высокое содержание титана характерно для мантийного флогопита лампроитов и иных базитов (Джейкс и др., 1989). Формулы флогопита: (ан. 1) — (K<sub>0.89</sub>Ba<sub>0.01</sub>)<sub>0.90</sub>(Mg<sub>2.26</sub>Fe<sub>0.43</sub>Ti<sub>0.27</sub>Cr<sub>0.03</sub>Mn<sub>0.01</sub>)<sub>3</sub>[(Si<sub>2.65</sub>Al<sub>1.12</sub>Fe<sub>0.23</sub>)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>](OH<sub>1.76</sub>O<sub>0.13</sub>F<sub>0.11</sub>)<sub>2</sub>, (ан. 2) — (K<sub>0.82</sub>Ba<sub>0.01</sub>)<sub>0.83</sub>(Mg<sub>2.36</sub>Fe<sub>0.32</sub>Ti<sub>0.17</sub>Fe<sub>0.13</sub>Cr<sub>0.01</sub>)<sub>3</sub>[(Si<sub>2.70</sub>Al<sub>1.17</sub>Fe<sub>0.13</sub>)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>](OH<sub>1.87</sub>F<sub>0.13</sub>)<sub>2</sub>; железистость  $f = 23.1$  и 19.6. Судя по более низкому содержанию титана, флогопит внешней зоны (ан. 2) кристаллизовался при более низкой температуре и при повышенном окислительном потенциале исходя из его более низкой железистости.

Хромшпинелиды кимберлитов Кимозера. Их общие особенности отмечены в работах (Ушков, 2001; Лукьянова и др., 2006; Устинов и др., 2009). Ниже приведены только оригинальные данные.

Хромшпинелиды кимберлитов I фазы разнообразны по составу, для них характерна сложная эволюция состава. Хромшпинелид первой генерации представлен фрагментами крупных кристаллов, которые корродированы и обросли хромитом третьей генерации (рис. 2a). В проходящем свете хромшпинелид



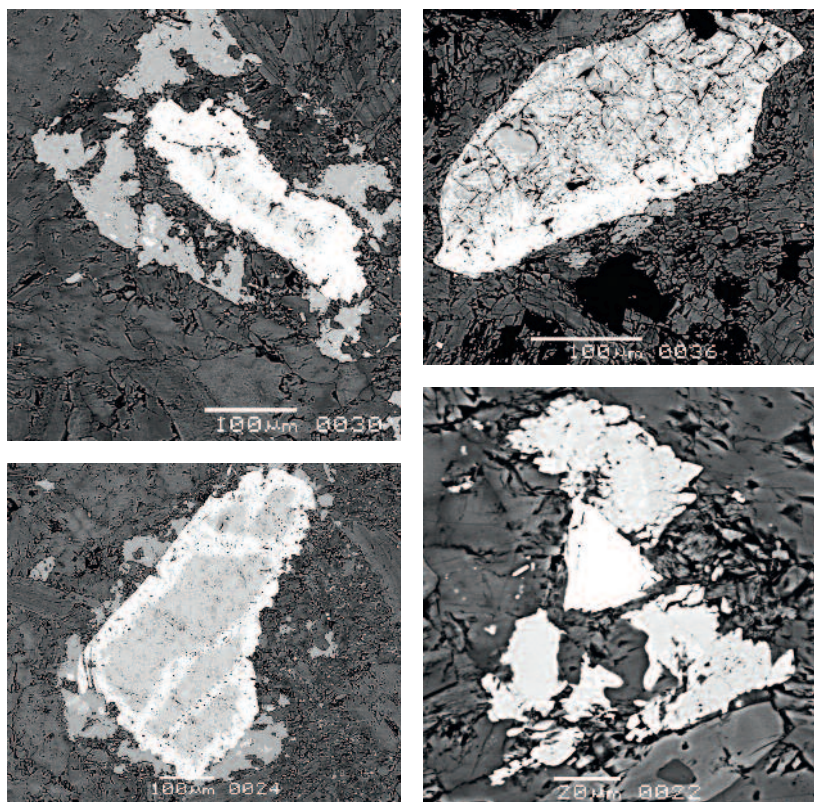


Рис. 2. Хромшпинелиды кимберлитов Кимозера первой фазы: а – фрагмент алюмомагнезиохромита I (серый, ан. 10) с каймой Mn-Zn-Ti хромита III (белый, ан. 25), они окружены оболочкой титанита, заместившего ильменит и титаномagnetит; б – вкравленник – обломок кристалла магнезиохромита II (светло-серый, ан. 15) с каймой Mn-Zn-Ti хромита III (белый, ан. 26); с – вкравленник – обломок кристалла магнезиохромита II (светло-серый, от центра к краю – ан. 16, 17, 18); кристалл брекчирован и цементирован Zn-Ti хромитом III (светло-серый, ан. 19) и Zn-Al хромитом III (серо-белый, ан. 20) с каймой Mn-Zn-Ti хромита III (белый, ан. 24); d – мелкий вкравленник – тетраэдрический кристалл Mn-Zn-Ti хромита III (белый, ан. 23), окружен прерывистой оторочкой титанита, заместившего ильменит и титаномagnetит. В отраженных электронах.

I густо-красный до коричневатого-красного, в отраженном свете серый. По составу это алюмомагнезиохромит, бедный Ti, Mn и  $Fe^{3+}$ ; Zn в его составе не обнаружен (табл. 1). Более крупные фрагменты по составу зональные: в центре более глиноземистые, во внешней зоне – более хромистые. Хромистость  $Cr\#$  ( $Cr/Cr + Al + Fe^{3+}$ , %) в одном из кристаллов возрастает от 53 в центре (ан. 3) до 58 во внешней зоне (ан. 5), в другом – от 54 (ан. 4) до 60 (ан. 7) и 62 (ан. 8), при этом железистость меняется не закономерно. Соответственно размещены анализы в таблице 1. В целом хромистость алюмомагнезиохромита варьирует от 53 до 68, железистость – от 28 до 40, чаще составляет 35–39, главное изоморфное замещение:  $Cr \leftrightarrow Al$ . В составе минерала практически отсутствует минерал хромита  $FeCr_2O_4$  (табл. 1).

Иногда наблюдалось нарастание хромшпинелида второй генерации – магнезиохромита – на алюмомагнезиохромит I. Хромшпинелид II слагает обломки кристаллов размером до 1.5 мм, нередко брекчированные и обросшие хромитом третьей генерации (рис. 2b, 2c). В проходящем свете хромшпинелид II коричнево-красный, в отражен-

ном свете светло-серый. По составу это магнезиохромит, бедный Ti, Zn и  $Fe^{3+}$  (табл. 2). Минерал значительно менее глиноземистый, чем хромшпинелид I, и содержит больше титана (в среднем 0.45% против 0.15%). Часть кристаллов магнезиохромита по составу зональные, их хромистость несколько снижается от центра к периферии: от 81 (ан. 12) до 80 (ан. 13) и 76 (ан. 14), т.е. у них эволюция состава иная, чем у алюмомагнезиохромита. Большая часть кристаллов магнезиохромита по составу незональные – хромистость магнезиохромита во всех участках серого цвета кристаллов, показанных на рисунках 2b и 2c, составляет 75, железистость – около 40. Главное изоморфное замещение в магнезиохромите:  $Cr \leftrightarrow Al$ .

Эволюцию состава от алюмомагнезиохромита I к магнезиохромиту II с обеднением Al и накоплением Cr можно интерпретировать двояко. При изотермических условиях этот тренд отвечает существенному снижению давления, т.е. кристаллизации во всплывающем расплаве (наиболее вероятный вариант). При изобарических условиях тренд отвечает существенному повышению температуры кристаллизации (менее вероятный ва-

Таблица 1. Химический состав (мас.%) хромшпинелида первой генерации – алюмомагнезиохромита кимберлитов I фазы, Кимозеро\*

№ ан.	3	4	5	6	7	8	9	10
MgO	14.57	15.89	13.96	15.93	15.50	15.45	15.32	13.54
NiO	0.25	нпо	нпо	0.24	нпо	нпо	нпо	нпо
FeO	13.36	11.56	14.65	10.69	11.56	11.40	10.91	13.35
MnO	0.33	нпо	нпо	нпо	нпо	0.36	0.50	0.31
ZnO	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43.20	45.84	46.70	49.74	49.86	50.62	50.72	53.74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.13	25.28	19.45	21.81	21.42	20.11	19.62	16.96
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	нпо	нпо	нпо	нпо	0.20	0.17	0.19	0.29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.35	0.89	5.33	1.00	0.99	1.34	2.33	0.59
TiO <sub>2</sub>	0.81	нпо	0.36	нпо	нпо	нпо	нпо	0.02
Сумма	100.01	99.46	99.75	99.41	99.53	99.45	99.59	98.80
	Минералы, мол.%							
MgCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	52.2	54.4	57.6	59.8	60.1	61.4	61.7	63.9
FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	–	–	–	–	–	–	3.4
MnCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	–	–	–	–	–	–	–
MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	14.1	16.6	4.2	12.4	10.4	9.3	8.6	–
FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	25.8	28.1	31.6	27.2	28.1	27.1	27.0	31.6
ZnAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	–	–	–	–	–	–	–
FeV <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	–	–	–	0.2	0.2	0.3	0.4
Fe <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub>	1.9	–	0.8	–	–	–	–	–
Mg <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub>	–	–	–	–	–	–	–	–
FeFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	4.5	0.9	5.8	–	1.2	1.1	1.1	–
MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.9	–	–	–	–	0.9	1.3	0.7
ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	–	–	–	–	–	–	–
NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.6	–	–	0.6	–	–	–	–
Cr#	53	54	58	60	60	62	62	68
f	34.9	39.0	38.6	27.8	29.5	39.3	39.7	36.1

Примечание. \* – Здесь и далее: в тексте и таблицах сквозная нумерация анализов; f – железистость,  $(Fe^{2+}+Fe^{3+})/Mg$ , Cr# – хромистость,  $Cr/(Cr+Al+Fe^{3+})$ , %; количество FeO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> рассчитано по стехиометрии; нпо – ниже предела обнаружения.

риант). Эволюция состава магнезиохромита II, возможно, проходила при понижении температуры.

Хромшпинелиды третьей генерации слагают каймы шириной до 80 мкм на брекчированных и корродированных хромшпинелидах I и II и мелкие обособленные октаэдрические кристаллы размером 10–60 мкм. В проходящем свете хромшпинелиды III черные, в отраженном свете серо-белые до белого. По составу это хромиты, бедные и весьма бедные Mg, содержащие переменные количества Al, до 11.5% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1–3.5% ZnO, ~1% MnO, их хромистость 75–79 (табл. 3). Выделяется два зарождения хромита III. Первое зарожде-

Таблица 2. Химический состав (мас.%) хромшпинелида второй генерации – магнезиохромита кимберлитов I фазы, Кимозеро

№ ан.	11	12	13	14	15	16	17	18
MgO	12.86	10.42	12.63	12.23	12.66	12.45	12.42	12.14
NiO	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.14	нпо
FeO	13.18	11.56	13.74	14.93	14.23	14.55	14.47	14.65
MnO	нпо	нпо	нпо	0.71	0.45	0.31	0.27	0.32
ZnO	нпо	нпо	нпо	нпо	0.14	0.11	нпо	0.13
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	62.22	60.79	60.30	58.89	58.42	57.88	57.82	57.27
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.42	9.75	6.65	11.89	12.95	11.71	11.66	11.89
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	нпо	0.36	0.31	0.05	0.44	0.35	0.27	0.28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.45	–	5.39	1.07	0.33	1.55	1.47	1.91
TiO <sub>2</sub>	0.39	0.48	1.14	0.40	0.10	0.40	0.37	0.44
Сумма	99.52	99.76	100.16	100.17	99.72	99.31	98.89	99.30
	Минералы, мол.%							
MgCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	63.5	51.3	62.1	58.2	60.0	60.3	60.4	60.1
FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	18.0	28.0	16.5	16.3	13.6	14.0	14.2	13.4
MnCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	–	–	0.6	0.6	–	–	–
MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	–	–	–	–	–	–	–
FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	12.6	19.0	12.9	22.6	23.9	22.1	22.4	22.5
ZnAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	–	–	–	0.3	0.3	–	0.3
FeV <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	0.5	0.4	0.1	0.6	0.5	0.4	0.4
Fe <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub>	1.0	1.2	2.8	0.7	–	1.0	0.9	1.1
Mg <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub>	–	–	–	0.3	0.3	–	–	–
FeFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	4.9	–	5.3	–	0.3	0.9	0.6	1.3
MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	–	–	1.2	0.4	0.9	0.7	0.9
ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	–	–	–	–	–	–	–
NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	–	–	–	–	–	0.4	–
Cr#	82	81	80	76	75	75	75	75
f	37.1	49.2	39.6	41.8	39.6	40.3	39.7	40.3

ние – Zn, Zn-Ti и Mn-Zn-Ti хромит с железистостью 85–98, содержащий 0.5–2.5 мас.% TiO<sub>2</sub>, который вырос на хромшпинелиды I и II (рис. 2b). Второе зарождение – Mn-Zn-Ti хромит с железистостью 99–100, содержащий 2.5–5% TiO<sub>2</sub>, который вырос на хромшпинелиды I и II (рис. 2a, 2b, 2c), на хромит 1-го зарождения (рис. 2c) и слагает обособленные кристаллы (рис. 2d). Характерные изоморфные замещения: Al → Fe<sup>3+</sup> и Mg ↔ Fe<sup>2+</sup>, Zn, Mn. Эволюция состава хромита III, судя по росту железистости и содержания титана, проходила при снижении температуры.

Хромшпинелиды кимберлитов II фазы в проходящем свете черные, в отраженном свете светло-серые и белые. Выделяются три генерации хромшпинелидов. Хромшпинелиды I слагают небольшие, до 1 мм, обособленные кристаллы, незональные и зональные,

Таблица 3. Химический состав (мас.%) хромшпинелида третьей генерации – хромита кимберлитов I фазы, Кимозеро

№ ан.	19	20	21	22	23	24	25	26
MgO	3.02	2.44	1.64	0.36	0.28	0.17	0.16	0.08
NiO	0.16	0.12	0.12	нпо	нпо	0.13	0.11	0.14
FeO	28.21	28.40	29.47	29.55	30.44	33.98	31.67	31.49
MnO	0.88	0.81	1.04	0.49	1.01	1.23	1.08	1.20
ZnO	1.03	1.20	0.83	3.61	3.57	1.79	1.97	2.30
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	51.00	53.07	53.50	50.12	48.48	41.16	47.90	50.29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.46	11.49	8.14	10.52	5.85	5.04	4.41	4.03
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.22	0.32	0.25	0.25	0.15	0.26	0.23	0.27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.64	1.07	2.40	2.20	6.74	11.46	7.44	7.18
TiO <sub>2</sub>	2.37	0.49	1.15	0.93	2.77	4.96	3.12	2.78
Сумма	98.99	99.41	98.54	98.03	99.29	100.18	98.09	99.76
Миналы, мол.%								
MgCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	16.1	11.2	4.8	1.9	1.5	0.9	0.9	0.5
FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	56.1	60.6	67.2	69.8	68.8	58.5	70.8	72.6
MnCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	1.4	4.0	–	–	–	–	–
MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	–	–	–	–	–	–	–
FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	10.9	20.6	15.0	11.8	3.0	6.1	4.3	2.5
ZnAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	2.7	3.1	2.2	9.7	9.7	4.8	5.4	6.3
FeV <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.3	0.5	0.3	0.3	0.2	0.4	0.3	0.4
Fe <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub>	6.4	0.6	3.1	2.5	7.6	13.6	8.8	7.7
Mg <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub>	–	0.7	2.0	–	–	–	–	–
FeFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	4.3	0.1	–	2.5	6.1	11.5	4.8	5.9
MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	2.7	3.6	3.2	1.5	3.1	3.8	3.4	3.7
ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	2.1	–	–	–	–	–	–
NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.5	0.3	0.3	–	–	0.4	0.3	0.4
Cr#	77	75	78	74	76	77	78	79
f	84.9	87.6	91.5	98.1	98.6	99.1	99.2	99.6

Таблица 4. Химический состав (мас.%) зональных кристаллов хромшпинелидов первой генерации кимберлитов II фазы, Кимозеро

№ ан.	27	28	29	30	31	32
	центр	центр	пром.	пром.	пром.	край
MgO	16.82	13.78	9.13	6.11	5.67	2.13
NiO	0.16	0.10	0.19	нпо	0.12	0.15
FeO	9.25	12.11	21.51	22.76	25.59	25.70
MnO	0.31	0.34	0.37	1.28	1.24	1.61
ZnO	нпо	нпо	нпо	2.10	0.36	5.03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	51.87	58.59	51.76	50.96	50.02	51.33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.03	11.12	4.51	11.30	4.55	8.57
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.19	0.22	0.43	0.24	0.33	0.31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.72	2.63	4.51	1.82	6.35	1.75
TiO <sub>2</sub>	2.15	0.14	4.30	2.12	4.14	2.36
Сумма	99.44	99.13	98.28	98.69	98.37	98.94
Миналы, мол.%						
MgCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	64.9	66.4	47.2	29.8	30.1	8.7
FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	8.4	23.8	37.9	40.3	61.2
MnCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	–	–	1.4	–	2.6
MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	14.4	–	–	–	–	–
FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	6.2	21.2	9.2	17.5	8.7	4.7
ZnAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	–	–	–	5.3	0.9	13.3
FeV <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.3	0.4	0.6	0.3	0.4	0.4
Fe <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub>	5.1	0.3	11.2	4.7	11.1	5.1
Mg <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub>	–	–	–	0.7	–	1.3
FeFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	8.8	2.1	6.4	–	4.5	–
MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.9	0.9	1.1	2.4	3.7	2.3
NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.4	0.3	0.5	–	0.3	0.4
Cr#	67	75	81	73	80	78
f	24.5	33.8	57.6	70.4	62.9	89.4

содержат до 4 мас.% TiO<sub>2</sub>, их хромистость варьирует от 67 до 81, железистость – от 25 до 89 (табл. 4). Первое зарождение – это бедный марганцем Ti-Al и Al магнезиохромит обособленных кристаллов (рис. 3а) и ядер зональных кристаллов (рис. 3б) с оторочками магнезиального ильменита. Второе зарождение – каймы на магнезиохромите первого зарождения (рис. 3с) и небольшие обособленные кристаллы Ti и Mn-Zn-Ti хромита с железистостью 58–89, содержащего более 1% MnO и до 5% ZnO.

Иногда встречаются композитные кристаллы, где на магнезиохромит и хромит I вырос высокожелезистый хромит II. Вторая генерация хромшпинелидов представлена широко распространенными мелкими вкраплениями – кубооктаэдрами Mn-Zn-Ti хромита (рис. 3с), их железистость – 97–98,

хромистость – от 85 до 67 (табл. 5, ан. 33–38). При снижении хромистости в минерале растет содержание Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от 1 до 14%. Хромит II содержит 3.5–6% TiO<sub>2</sub>, 4–7.5% ZnO, 1.5–2% MnO. Кристаллы хромита II окружены оторочками ильменита, нередко богатого Nb. В оторочках марганцовистого ильменита не столь редко находятся мелкие, 10–20 мкм, кристаллы хромшпинелида III (рис. 3д). Это Mn-Zn-Ti феррихромит, его железистость – 98, хромистость – 46–43, минерал содержит 3–4% TiO<sub>2</sub>, 1.5–2.5% ZnO, ~ 1% MnO (табл. 5, ан. 39–40).

Для совокупности хромшпинелидов кимберлитов II фазы главные изоморфные замещения: Cr ↔ Fe<sup>3+</sup> и Mg ↔ Fe<sup>2+</sup>, Zn, Mn.

Сравнение хромшпинелидов кимберлитов I и II фаз. Кимберлиты первой фазы содержат в целом значительно более глиноземистые



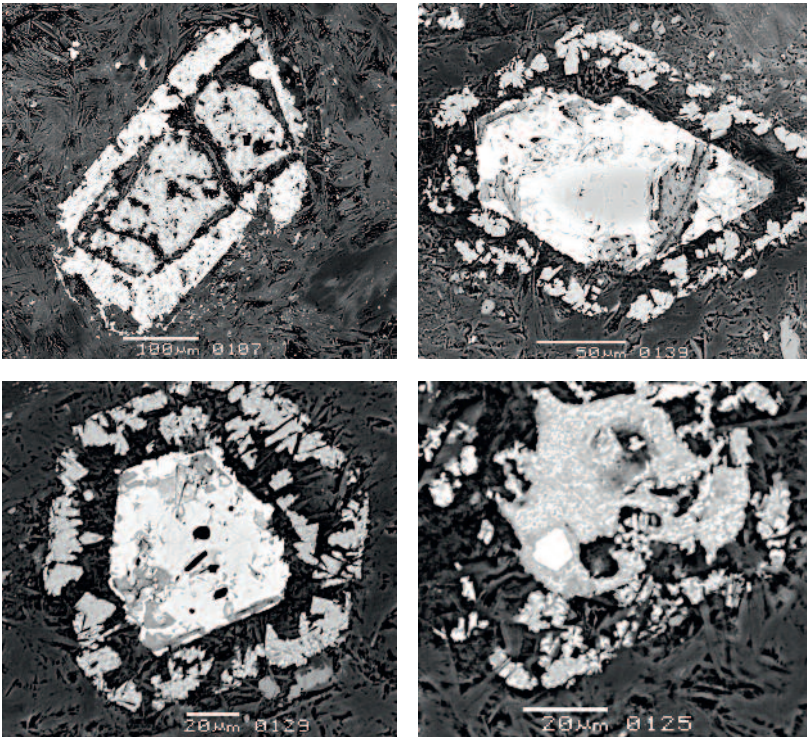


Рис. 3. Хромшпинелиды кимберлитов Кимозера второй фазы: а – корродированный кристалл Ti-Al магнезиохромита I, первое зарождение (серый, ан. 27), с каймой Mg ильменита (серо-белый, ан. 53), на внутреннюю сторону каймы вырос кристалл циркона (белый, ан. 94); б – мелкий вкрапленник – кристалл хромшпинелида I: первое зарождение, ядро – Al магнезиохромит (серый, ан. 28), второе зарождение: промежуточная зона – Ti хромит (светло-серый, ан. 29) и внешняя зона – Mn-Zn-Ti хромит (белый, ан. 32); оторочка ильменита (серый, ан. 48); в – кубооктаэдр Mn-Zn-Ti хромита II (белый, ан. 33), оторочка ильменита, обогащенного Nb (серый, ан. 54); д – кубооктаэдр Mn-Zn-Ti феррихромита III (светло-серый, ан. 40) в Mn ильмените (серый, ан. 63). В отраженных электронах.

хромшпинелиды со сложной историей формирования (рис. 4а), кимберлиты второй фазы – в целом значительно более железистые хромшпинелиды (рис. 4б). Хромшпинелиды кимберлитов второй фазы – продукты более продвинутой дифференциации, более низкотемпературные и более низкобарные, чем хромшпинелиды кимберлитов первой фазы. Эволюция состава хромшпинелидов II–III в кимберлитах первой фазы и хромшпинелидов I–III в кимберлитах второй фазы отвечает стандартному тренду в ультраосновных и основных магматитах – от магнезиохромита и хромита к феррихромиту и хроммагнетиту с накоплением Fe и Ti. Особенность хромшпинелидов Кимозера – существенное накопление Zn и Mn в ходе эволюции.

*Сравнение хромшпинелидов кимберлитов Кимозера и иных алмазоносных кимберлитов.* Алмазоносные кимберлиты содержат вкрапленники и включения в алмазах высоко- и крайне высокохромистых (> 62 мас.% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) хромшпинелидов, преимущественно магнезиохромита, менее алюмомагнезиохромита, содержащих < 0.7 мас.% TiO<sub>2</sub>; в связующей массе – разнообразные хромшпинелиды, состав которых варьирует от алюмомагнезиохромита и хромита до феррихромита, хроммагнетита, хромтитаномгнетита, хромюльвошпинели, изредка до хроммагнезиоферрита;

для кимберлитовых хромшпинелидов типоморфно заметное до значительного содержание минала кандилита Mg<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub> (Holmes, 1936; Nixon *et al.*, 1963; Францессон, 1968; Ровша, Илупин, 1970; Соболев и др., 1975, 1976; Vostor, Boyd, 1980; Францессон и др., 1982; Agel *et al.*, 1982; Доусон, 1983; Никишов, 1984; Gaspar, Wylley, 1984; Jons, Wylley, 1985; Tompkins, Haggerty, 1985; Костровицкий, 1986; Mitchell, 1986; Багдасаров, 1988; Джейкс и др., 1989; Илупин и др., 1990; Edwards *et al.*, 1992; Hood, McCandell, 2004; Kjarsgaard *et al.*, 2004; Masum *et al.*, 2004; Melluso *et al.*, 2008; Милашев, 2015; Костровицкий и др., 2016). В кимберлитах Кимозера очень мало крайне высокохромистых хромшпинелидов, но они содержат массу кристаллов высокохромистых шпинелидов, в том числе с небольшой, до 4%, примесью минала кандилита. Вероятно, эти характеристики коррелируют с невысокой степенью алмазоносности кимберлитов Кимозера. Особенность хромшпинелидов Кимозера – существенное накопление в их поздних генерациях цинка и марганца, что свидетельствует о повышенной щелочности материнских расплавов.

*Титаномгнетит* кимберлитов обеих фаз развит в виде оторочек вокруг вкрапленников хромшпинелидов и в небольших обособленных выделениях, форма которых близка к

Таблица 5. Химический состав (мас.%) хромшпинелидов второй (№33–38) и третьей (№39–40) генерации кимберлитов II фазы, Кимозера

№ ан.	33	34	35	36	37	38	39	40
MgO	0.57	0.45	0.63	0.49	0.49	0.51	0.27	0.43
NiO	0.18	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.11
FeO	32.57	29.85	27.78	28.28	28.29	27.32	36.06	31.39
MnO	1.65	1.79	1.71	1.72	1.64	1.93	0.95	1.27
ZnO	4.35	4.22	7.35	6.25	6.14	5.56	2.58	1.48
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	47.33	48.85	46.12	46.19	41.17	41.88	20.03	26.61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.09	4.34	7.27	5.59	6.22	4.54	2.10	3.54
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.29	0.31	0.25	0.24	0.30	0.27	0.21	0.24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.14	4.16	3.76	6.18	9.37	14.04	32.32	30.98
TiO <sub>2</sub>	5.81	4.89	4.61	4.30	4.43	3.44	3.80	3.17
Сумма	98.98	98.86	99.48	99.24	98.05	99.49	98.32	99.22
Миналы, мол.%								
MgCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	—	0.5	—	1.1	2.7	2.8	2.0	2.4
FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	65.2	68.5	62.3	64.4	57.7	58.9	37.4	36.9
MnCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	5.2	2.0	4.0	1.6	—	—	—	—
MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—
FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	—	—	—	—	—	—	—	3.7
ZnAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	11.3	9.4	15.6	12.1	13.6	9.9	6.1	4.1
FeV <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.4	0.4	0.3	0.3	0.5	0.4	0.4	0.3
Fe <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub>	14.8	12.5	10.9	11.1	12.4	9.6	14.2	8.9
Mg <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub>	1.6	1.0	1.7	0.8	—	—	—	—
FeFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	—	—	—	—	4.8	7.0	32.5	39.4
MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.2	3.6	1.1	3.7	5.1	6.1	4.0	4.0
ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.8	2.1	4.1	4.9	3.2	5.3	3.4	—
NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.5	—	—	—	—	—	—	0.3
Cr#	85	82	76	76	69	67	46	43
f	97.3	97.8	97.0	97.6	97.6	97.4	98.2	97.8

октаэдрической. Титаномагнетит испытал окислительный отжиг и представлен сростаниями магнетита (матрица) с пластинками ильменита. Валовый химический состав протоминерала титаномагнетита кимберлитов I фазы, мас.%, ан. 41: MgO 1.73; NiO 0.15; FeO 56.51; MnO 1.46; ZnO нпо; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.89; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.10; V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.18; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 4.53; TiO<sub>2</sub> 32.59; сумма 98.14. Состав минерала в миналах, мол.%: MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 1.3; FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> —; MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 0.3; FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> —; FeV<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 0.3; Fe<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub> 87.7; Mg<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub> 4.1; FeFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 1.3; MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 4.6; NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 0.4. Состав отвечает ульвошпинели с заметным количеством минала кандиита, что типично для шпинелидов кимберлитов.

Минералы группы ильменита. Ряд особенностей минералов группы ильменита кимберлитов Кимозера отмечен в работах: Ушков, 2001; Лукьянова и др., 2006; Устинов

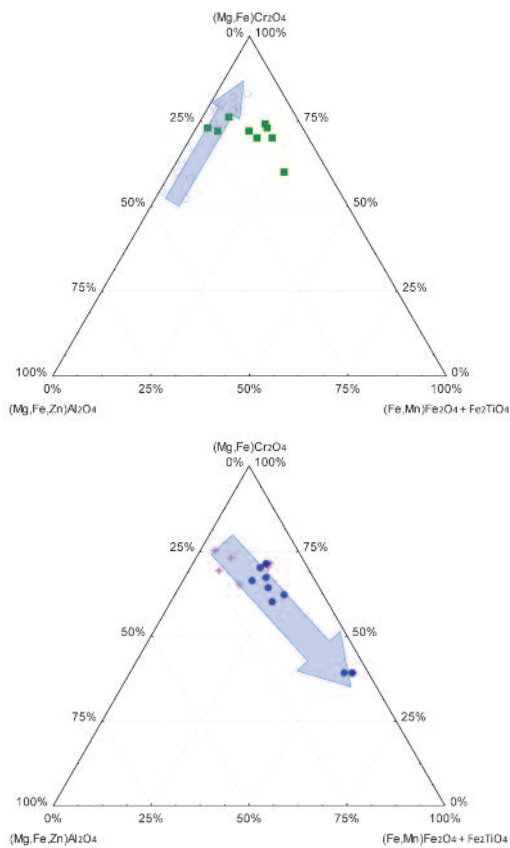


Рис. 4. Состав хромшпинелидов кимберлитов Кимозера в координатах  $(Mg,Fe)Cr_2O_4$  —  $(Mg,Fe,Zn)Al_2O_4$  —  $(Fe,Mn)Fe_2O_4 + (Fe,Mg)_2TiO_4$ ; а — кимберлиты I фазы, первая генерация хромшпинелидов — кружки, вторая и третья — квадраты; б — кимберлиты II фазы, первая генерация — крестики, вторая и третья — кружки. Стрелками показаны тренды эволюции состава.

и др., 2009. Ниже приведены оригинальные данные по минералам группы ильменита. В кимберлитах в целом минералы группы ильменита представлены: (1) ламелями распада пикроильменита в клинопироксене в ксенолитах глубинных пород гипербазитового состава и продуктах их дезинтеграции; (2) субграфическими сростаниями с клинопироксеном или с ромбопироксеном в глубинных включениях; (3) агрегатными сростаниями с флогопитом, щелочным амфиболом, рутилом, диопсидом (MARID) глубинных включений; (4) крупными овальной формы кристаллами до желваков (Это мегакристы, автолиты, вкрапленники ильменита, пикроильменита, ферригейкилита, изредка манганильменита. Они обычно обогащены хромом, нередко содержат ламели распада хромшпинелидов.); (5) небольшими по размеру кристал-



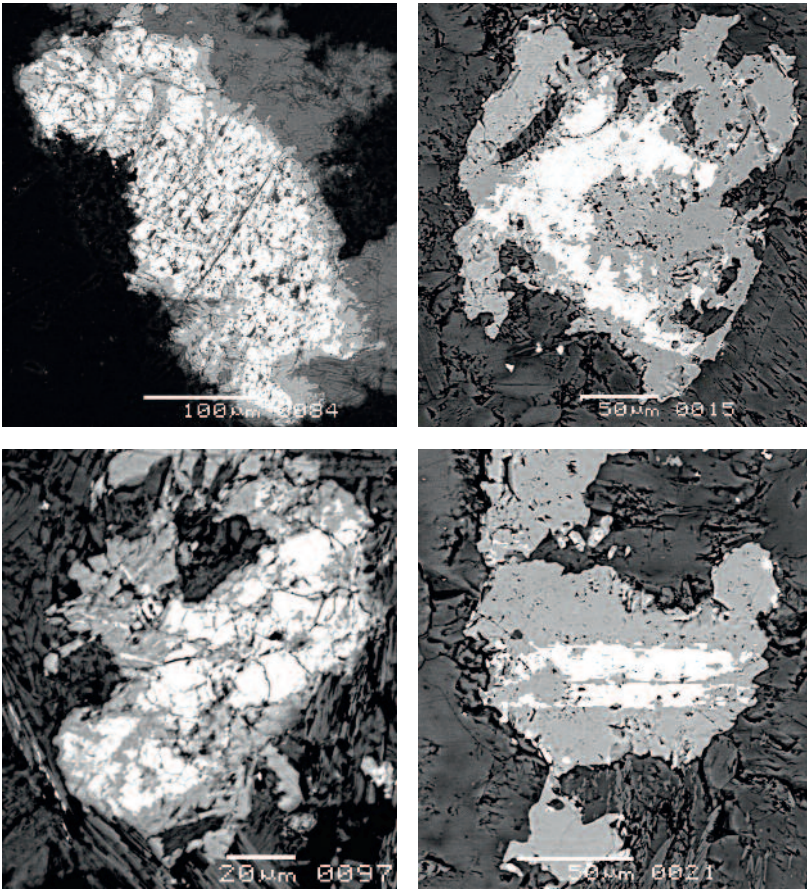


Рис. 5. Минералы группы ильменита кимберлитов Кимозера:  
 а – I фаза, вкрапленник хромистого пикроильменита (ан. 42), кристалл корродирован и окружен каймой замещения титанита (серый);  
 б–д – II фаза:  
 б – кристалл марганцовистого ильменита (ан. 64) в значительной степени замещен титанитом (серый);  
 с – кристалл манганильменита (ан. 77) в заметной степени замещен титанитом (серый);  
 д – кристалл железистого пирофанита (ан. 83) большей частью замещен титанитом.  
 В отраженных электронах.

лами ильменита до манганильменита, изредка до пирофанита в связующей массе кимберлитов (Holmes, 1936; Nixon *et al.*, 1963; Францессон, 1968; Danchin, O'Rey, 1972; Благуйкина и др., 1975; Соболев и др., 1976; Гаранин и др., 1978; Wyatt, 1979; Voctor, Boyd, 1980; Agel *et al.*, 1982; Доусон, 1983; Никишов, 1984; Gaspar, Wylley, 1984; Багдасаров, Илупин, 1986, 1988; Костровицкий, 1986; Mitchell, 1986; Генштафт, Илупин, 1987; Джейкс и др., 1989; Войтковский и др., 1991; Edwards *et al.*, 1992; Hood, McCandell, 2004; Kostrovitsky *et al.*, 2004; Wyatt *et al.*, 2004; Мальков, Филиппов, 2005; Костровицкий и др., 2006, 2016; Melluso *et al.*, 2006; Каминский, Белоусова, 2009; Милашев, 2015). Кристаллы ильменита всех типов зачастую окружены реакционными каймами перовскита. Наиболее поздние манганильменит и пирофанит иногда образуют оторочки вокруг кристаллов перовскита (Pasteris, 1980; Tompkins, Haggerty, 1985; Chakhmouradian, Mitchell, 1999) или слагают псевдоморфозы по перовскиту (Мальков, Филиппов, 2005).

Минералы группы ильменита в кимберлитах содержат заметное количество ниобия, обычно до 3.5 мас.% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, изредка до 12% (Chakhmouradian, Mitchell, 1999).

*Минералы группы ильменита кимберлитов I фазы.* Изредка встречаются заметно корродированные вкрапленники овальной формы размером до 1.5 мм, которые по морфологии (рис. 5а) и составу близки к пикроильмениту классических кимберлитовых мегакристов. Состав кимозерских минералов (ан. 42 и 43, мас.%): MgO 11.95 и 11.19; NiO 0.25 и 0.29; FeO 23.27 и 17.53; MnO 0.75 и 4.31; ZnO 0.12 и 0.30; CaO 9.14 и 0.12; TiO<sub>2</sub> 50.94 и 47.25; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 9.83 и 17.26; V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.30 и 0.15; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2.88 и 0.22; Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.14 и 1.76; сумма 100.57 и 100.30, количества Fe<sup>2+</sup> и Fe<sup>3+</sup> рассчитаны по стехиометрии. Состав минералов в миналах, мол.%: MgTiO<sub>3</sub> 41.1 и 39.1; FeTiO<sub>3</sub> 44.9 и 34.4; MnTiO<sub>3</sub> 1.5 и 8.6; ZnTiO<sub>3</sub> 0.2 и 0.5; CaTiO<sub>3</sub> 0.3; NiTiO<sub>3</sub> 0.5; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 8.6 и 15.3; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2.7 и 0.2; V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.3 и 0.1; Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.1 и 1.0. Анализ 42 отвечает хромистому пикроильмениту, анализ 43 – Mn-Fe гейкилиту, обогащенному Fe<sup>3+</sup> и Nb.

Таблица 6. Химический состав (мас.%) обособленных кристаллов ильменита в связующей массе кимберлитов I фазы, Кимозеро

№ ан.	44	45	46	47	48	49	50	51
MgO	0.19	0.26	1.36	0.23	0.24	0.22	3.05	0.59
NiO	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
FeO	42.97	42.30	35.63	40.34	37.55	36.49	29.33	31.92
MnO	0.44	0.82	1.91	2.53	3.36	3.65	5.93	10.79
ZnO	нпо	нпо	0.23	0.22	0.71	0.78	нпо	1.45
CaO	0.05	нпо	0.10	нпо	нпо	нпо	0.13	нпо
TiO <sub>2</sub>	48.74	48.49	44.84	48.33	46.68	47.76	45.45	51.08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.22	5.78	13.26	7.00	10.10	8.05	13.45	1.80
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	нпо	0.33	0.23	0.39	0.33	0.40	0.16	0.34
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	нпо	1.07	0.11	0.38	0.38	0.24	нпо	0.24
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.34	0.24	0.14	0.20	0.17	0.17	0.28	нпо
Сумма	98.95	99.29	97.81	100.62	99.52	97.76	98.78	98.21
Число атомов в формуле в расчете на два атома металлов								
Mg	0.007	0.010	0.051	0.009	0.009	0.008	0.115	0.022
Fe <sup>2+</sup>	0.920	0.901	0.766	0.841	0.899	0.810	0.622	0.702
Mn	0.010	0.018	0.042	0.054	0.073	0.079	0.127	0.234
Zn	—	—	0.004	0.004	0.013	0.015	—	0.027
Ca	0.001	—	0.003	—	—	—	0.004	—
Ti	0.938	0.929	0.867	0.918	0.895	0.912	0.868	0.985
Fe <sup>3+</sup>	0.120	0.113	0.257	0.152	0.104	0.162	0.257	0.018
V	—	0.007	0.005	0.002	0.007	0.008	0.003	0.007
Cr	—	0.022	0.002	0.008	0.008	0.006	—	0.005
Nb	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	—

В связующей массе кимберлитов первой фазы распространены обособленные зональные кристаллы ильменита с поперечником до 150 мкм. По составу среди них выделяются три группы. Чаще других встречаются кристаллы ильменита 1 группы, бедные магнием и марганцем (табл. 6, ан. 44, 45). Такой ильменит содержит до 1 мас.% MnO, около 6% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, до 1% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, немного Nb, следы Ca и Zn. Довольно широко распространены выделения ильменита 2-й группы, бедного Mg и обогащенного Fe<sup>3+</sup> и Mn; этот ильменит содержит (мас.%) от 2 до 6 MnO, до 13.5 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.8 ZnO, 0.4 V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.3 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (табл. 6, ан. 46–50). Изредка наблюдается ильменит 3-й группы, это бедный Mg обогащенный Zn манганильменит, который содержит (мас.%) 11 MnO, 2 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.5 ZnO (ан. 51). Таким образом, ильменит кимберлитовых пород I фазы разнообразен по составу — от хромистого пикроильменита и марганцовисто-железистого гейкилита до обычного ильменита и до манганильменита. Большинство кристаллов минералов группы ильменита от самых ран-

Таблица 7. Химический состав (мас.%) обогащенного магнием ильменита оторочек вокруг кристаллов хромшпинелидов. Кимберлиты II фазы, Кимозеро

№ ан.	53	54	55	56
MgO	6.30	4.16	4.15	3.67
NiO	0.13	нпо	нпо	0.12
FeO	30.36	30.17	34.34	36.38
MnO	3.46	2.61	4.11	0.08
ZnO	нпо	нпо	нпо	нпо
CaO	0.19	0.32	0.05	0.37
TiO <sub>2</sub>	50.57	50.63	51.07	45.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.90	2.55	6.15	13.75
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.45	0.69	0.31	0.49
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.42	нпо	0.03	1.13
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	нпо	3.25	нпо	1.03
Сумма	99.78	99.31	100.21	99.17
Число атомов в формуле в расчете на два атома металлов				
Mg	0.227	0.155	0.151	0.137
Ni	0.003	—	—	0.002
Fe <sup>2+</sup>	0.614	0.734	0.703	0.698
Mn	0.071	0.055	0.085	0.002
Ca	0.005	0.007	0.001	0.010
Ti	0.920	0.951	0.940	0.849
Fe <sup>3+</sup>	0.144	0.048	0.113	0.259
V	0.009	0.014	0.006	0.010
Cr	0.008	—	0.001	0.022
Nb	—	0.037	—	0.012

них до самых поздних содержат повышенные концентрации марганца. Содержания Fe<sup>3+</sup> наиболее высоки в самом раннем железистом гейкилите, наиболее высокотемпературном. Содержание Cr и Nb варьирует относительно широко. Повышенное содержание Zn характерно для манганильменита. С учетом анализов, не приведенных в таблице 6, ильменит кимберлитов I фазы в среднем содержит (мас.%) 2.4 MnO, 0.29 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 0.45 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.25 V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (n = 17).

*Минералы группы ильменита кимберлитов II фазы.* Ильменит развит в них среди вкрапленников и в связующей массе. Изредка встречаются овальной формы вкрапленники размером до 2 мм, которые по морфологии и составу близки к пикроильмениту классических кимберлитовых мегакристов. Состав кимозерского минерала (ан. 52, мас.%): MgO 11.75; NiO 0.11; FeO 12.83; MnO 2.37; ZnO 0.51; CaO 0.13; TiO<sub>2</sub> 41.45; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 29.69; V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.16; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1.14; Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.28; сумма 100.62, количества Fe<sup>2+</sup> и Fe<sup>3+</sup> рассчитаны по стехиометрии. Состав минерала в миналах, мол.%:

Таблица 8. Химический состав (мас.%) обособленных кристаллов ильменита в связующей массе кимберлитов II фазы, Кимозеро

№ ан.	57	58	59	60	61	62	63	64
MgO	0.17	0.23	0.13	1.51	0.37	0.09	0.07	0.17
NiO	нпо	нпо	нпо	нпо	0.05	нпо	нпо	нпо
FeO	41.98	42.46	40.45	37.53	38.27	38.50	36.43	35.27
MnO	2.29	2.64	3.44	3.45	4.26	6.07	8.53	9.04
ZnO	нпо	нпо	нпо	0.36	0.67	нпо	0.18	нпо
CaO	0.91	0.04	0.93	0.15	0.10	0.31	0.44	1.01
TiO <sub>2</sub>	50.96	51.27	50.36	49.22	48.97	50.18	51.02	51.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.67	0.93	1.98	5.09	3.17	4.25	2.94	0.31
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.34	0.19	0.31	0.20	0.40	0.33	0.23	0.31
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.44	нпо	0.92	1.29	2.64	нпо	нпо	нпо
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.41	0.17	0.26	0.12	0.16	0.14	нпо	1.47
Сумма	98.07	98.73	98.78	98.92	98.96	99.87	99.84	98.63
Число атомов в формуле в расчете на два атома металлов								
Mg	0.006	0.009	0.005	0.057	0.014	0.003	0.003	0.006
Ni	—	—	—	—	0.001	—	—	—
Fe <sup>2+</sup>	0.902	0.921	0.863	0.794	0.815	0.814	0.769	0.756
Mn	0.050	0.057	0.074	0.074	0.092	0.130	0.182	0.196
Zn	—	—	—	0.007	0.013	—	0.003	—
Ca	0.025	0.001	0.025	0.004	0.003	0.008	0.012	0.028
Ti	0.983	0.988	0.967	0.936	0.938	0.955	0.969	0.986
Fe <sup>3+</sup>	0.013	0.018	0.038	0.097	0.061	0.081	0.056	0.006
V	0.007	0.004	0.006	0.004	0.008	0.007	0.005	0.004
Cr	0.009	—	0.019	0.025	0.053	—	—	—
Nb	0.005	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	—	0.017

MgTiO<sub>3</sub> 41.5; FeTiO<sub>3</sub> 25.0; MnTiO<sub>3</sub> 4.7; ZnTiO<sub>3</sub> 0.9; CaTiO<sub>3</sub> 0.3; NiTiO<sub>3</sub> 0.2; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 26.1; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1.1; V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.1; Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.1, это марганцовисто-железистый гейкилит. Относительно широко развит обогащенный магнием ильменит, слагающий оторочки вокруг небольших вкрапленников хромшпинелидов правильной формы (рис. 3а – с). Ширина оторочек ильменита составляет 20 – 50 мкм. Данный ильменит содержит (мас.%) до 6.5 MgO, 14 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4 MnO, 3.5 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 1 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.7 V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, цинк в нем не обнаружен (табл. 7). Обогащенный Fe<sup>3+</sup> ильменит испытал распад и превращен в матрицу ильменита с массой пластинок гематита (рис. 3а). В связующей массе кимберлитов II фазы распространены обособленные выделения минералов группы ильменита с поперечником до 250 мкм (рис. 5б, 5с). По составу среди них выделяются четыре группы. Чаще других встречаются незональные по составу кристаллы ильменита первой группы, бедные Mg и относительно обогащенные Mn (рис. 5б,

Таблица 9. Химический состав (мас.%) обособленных зональных по составу кристаллов ильменита в связующей массе кимберлитов II фазы, Кимозеро

№ ан.	65			66			67			68			69			70			71			72		
	центр	пром.*	край	центр	пром.*	край	центр	пром.*	край	центр	пром.*	край	центр	пром.*	край	центр	пром.*	край	центр	пром.*	край			
MgO	0.09	0.07	0.13	0.29	0.12	0.17	0.08	0.17																
NiO	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо		
FeO	38.15	36.82	31.33	26.20	36.75	384.02	28.41	29.10																
MnO	6.07	8.53	8.89	15.33	6.62	9.04	15.01	15.28																
ZnO	0.31	0.18	0.48	0.98	0.47	0.39	0.62	0.79																
CaO	0.31	0.44	0.89	0.90	0.93	1.01	0.65	0.73																
TiO <sub>2</sub>	50.18	51.02	49.80	49.20	50.40	50.15	50.18	51.69																
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.42	1.40	1.98	5.93	2.54	2.81	4.02	0.27																
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.33	0.23	0.36	0.31	0.29	0.21	нпо	0.27																
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо																
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.11	0.12	2.18	0.21	1.47	0.19	1.05																
Сумма	98.08	98.80	98.70	100.43	99.92	99.27	99.16	99.32																
Число атомов в формуле в расчете на два атома металлов																								
Mg	0.003	0.003	0.005	0.011	0.005	0.006	0.003	0.006																
Fe <sup>2+</sup>	0.822	0.786	0.728	0.554	0.787	0.726	0.604	0.619																
Mn	0.132	0.184	0.192	0.329	0.143	0.195	0.323	0.329																
Zn	0.006	0.003	0.009	0.018	0.009	0.007	0.012	0.015																
Ca	0.009	0.003	0.024	0.024	0.026	0.028	0.018	0.020																
Ti	0.972	0.979	0.958	0.936	0.970	0.962	0.960	0.989																
Fe <sup>3+</sup>	0.047	0.027	0.075	0.096	0.049	0.054	0.077	0.005																
V	0.007	0.005	0.007	0.006	0.006	0.004	—	0.005																
Nb	0.002	0.001	0.001	0.025	0.002	0.017	0.002	0.012																

Примечание. \* – Промежуточные части кристалла между краем и его центром.

табл. 8). Такой ильменит содержит (мас.%) от 2 до 9 MnO, до 5 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2.5 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.5 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 1 CaO, 0.7 ZnO, 0.4 V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Реже наблюдаются зональные по составу кристаллы ильменита второй группы, бедного Mg и сравнительно обогащенного Mn, состав двух таких кристаллов приведен в таблице 9. В этом типе ильменита четко проявлен изоморфизм Fe<sup>2+</sup> и Mn<sup>2+</sup>: ядра кристаллов обогащены Fe, внешние зоны – Mn. Ильменит второй группы содержит (мас.%) от 6 до 15 MnO, до 5 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 1 CaO и ZnO, 0.4 V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, хром в нем не обнаружен (табл. 9). Довольно широко распространены незональные по составу кристаллы ильменита третьей группы, бедного Mg и Cr и весьма богатого Mn; этот манганильменит содержит (мас.%) от 11.5 до 21.5 MnO, до 4 (обычно <1) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 1 CaO и ZnO, 0.5 V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (табл. 10). Четвертую группу представляет редкий железистый пирофанит, микроскопически не отличимый от описанных выше (рис. 5д). Железистый пирофанит содер-

жит (мас.%) 22–24 MnO, до 3 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,7 ZnO, 0,5 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (табл. 11). Таким образом, ильменит кимберлитовых пород Кимозера II фазы разнообразен по морфологии и по составу – от Mn-Fe гейкилита до обогащенного Mg и Mn ильменита, далее до бедных Mg и обогащенных Mn ильменита, манганильменита и пирофанита. Большинство кристаллов минералов группы ильменита от самых ранних до самых поздних характеризуются повышенной концентрацией марганца. Содержание Fe<sup>3+</sup> наиболее высокое в раннем Mn-Fe гейкилите, наиболее высокотемпературном. Содержание Cr и Nb в ильмените не коррелировано и относительно широко варьирует. Хромом чаще обогащен ильменит с повышенным содержанием Mg, ниобием – ильменит с повышенным содержанием Mn. С учетом анализов, не приведенных в таблицах 7–11, ильменит кимберлитов II фазы в среднем содержит (мас.%) 10,2 MnO, 0,54 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 0,24 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,33 V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (n = 39).

*Сравнение минералов гр. ильменита кимберлитов I и II фаз.* Пикроильменит и Fe гейкилит ранней генерации в кимберлитах обеих фаз Кимозера сходны по морфологии и составу. Более поздний ильменит кимберлитов II фазы, обогащенный Mg и слагающий оторочки вокруг правильной формы кристаллов хромшпинелидов, в кимберлитах I фазы не установлен. Наиболее распространенный в кимберлитах II фазы более поздний ильменит цементирующей массы вдвое богаче Nb и существенно богаче Mn (рис. 6d), чем ильменит цементирующей массы кимберлитов I фазы (рис. 6b). Ильменит кимберлитов I фазы заметно богаче Zn. Для минералов группы ильменита кимберлитов обеих фаз характерна положительная корреляция содержания Mg и Fe<sup>3+</sup>, минералов гейкилита и гематита; в кимберлитах II фазы эта зависимость выражена более ярко (рис. 6а, 6с). Среднее содержание Nb в минералах группы ильменита – 0,46 мас.% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (n = 56), максимальное – 3,25%. Общая особенность минералов группы ильменита кимберлитов Кимозера – значительная обогащенность Mn (рис. 6b, 6d).

*Сравнение минералов группы ильменита кимберлитов Кимозера и иных алмазоносных кимберлитов.* Алмазоносные кимберлиты содержат мегакристы пикроильменита до ферригейкилита, в различной степени обогащенные хромом (Holmes, 1936; Nixon *et al.*, 1963; Францессон, 1968; Danchin, O'Rey, 1972; Соболев и др., 1976; Voctor, Boyd, 1980; Pasteris, 1980; Францессон и др., 1982; Доусон, 1983; Никишов, 1984; Haggerty, Tompkins, 1984; Костровицкий, 1986; Mitchell, 1986; Ген-

**Таблица 10. Химический состав (мас.%) обособленных обогащенных марганцем кристаллов ильменита в связующей массе кимберлитов II фазы, Кимозера**

№ ан.	73	74	75	76	77	78	79	80
MgO	0.18	0.09	0.16	0.17	0.29	нпо	0.60	0.22
NiO	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
FeO	34.38	32.01	30.83	29.77	27.23	29.59	24.37	22.66
MnO	11.41	13.63	14.52	15.28	15.33	16.10	18.62	21.48
ZnO	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.29	0.32	0.51
CaO	0.19	0.36	0.25	0.73	0.89	0.28	0.56	0.07
TiO <sub>2</sub>	51.70	51.61	51.26	51.69	49.20	51.70	50.51	50.40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.58	0.73	1.20	1.74	3.90	0.94	0.21	3.03
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.30	0.49	0.54	0.24	0.31	0.28	0.34	0.55
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.35	0.13	нпо
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	нпо	нпо	нпо	1.74	2.18	0.30	2.88	0.47
Сумма	98.84	98.92	98.76	100.67	99.33	99.83	98.54	99.09
Число атомов в формуле в расчете на два атома металлов								
Mg	0.007	0.003	0.006	0.006	0.011	–	0.026	0.008
Fe <sup>2+</sup>	0.733	0.681	0.657	0.624	0.581	0.625	0.524	0.481
Mn	0.246	0.294	0.313	0.325	0.332	0.345	0.405	0.462
Zn	–	–	–	–	–	0.005	0.006	0.010
Ca	0.005	0.010	0.007	0.020	0.024	0.008	0.015	0.002
Ti	0.991	0.988	0.983	0.975	0.945	0.983	0.976	0.963
Fe <sup>3+</sup>	0.011	0.014	0.023	0.033	0.075	0.018	0.004	0.058
V	0.006	0.010	0.011	0.005	0.006	0.006	0.007	0.011
Cr	–	–	–	–	–	0.007	0.003	–
Nb	–	–	–	0.012	0.025	0.003	0.033	0.005

**Таблица 11. Химический состав пирофанита связующей массы кимберлитов II фазы, Кимозера**

№ ан.	Компоненты, мас.%			№ ан.	Число атомов в формуле		
	81	82	83		81	82	83
MgO	0.14	0.26	0.18	Mg	0.005	0.010	0.007
NiO	нпо	нпо	нпо	Ni	–	–	–
FeO	22.26	21.00	21.42	Fe <sup>2+</sup>	0.480	0.447	0.452
MnO	21.99	22.57	23.93	Mn	0.461	0.487	0.511
ZnO	0.55	0.71	0.71	Zn	0.011	0.013	0.013
CaO	0.50	0.18	0.12	Ca	0.014	0.005	0.003
TiO <sub>2</sub>	51.04	50.25	51.97	Ti	0.991	0.962	0.986
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.31	3.07	1.05	Fe <sup>3+</sup>	0.006	0.059	0.020
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.49	0.61	0.737	V	0.010	0.012	0.007
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	нпо	нпо	нпо	Cr	–	–	–
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.22	0.38	0.14	Nb	0.003	0.004	0.002
Сумма	97.50	99.03	99.85			2	



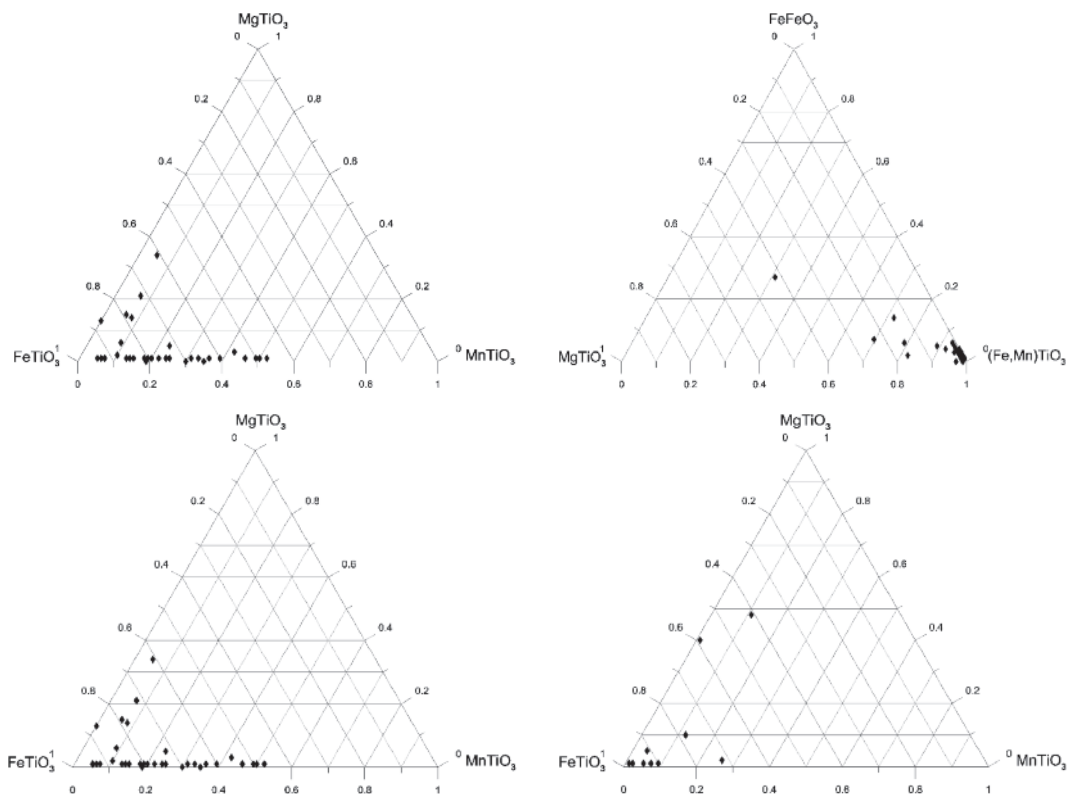


Рис. 6. Состав минералов группы ильменита кимберлитов Кимозера: 6a и 6b – в кимберлитах I фазы, 6c и 6d – II фазы; a и c – в координатах  $\text{FeFeO}_3 - \text{MgTiO}_3 - (\text{Fe,Mn})\text{TiO}_3$ ; b и d – в координатах  $\text{MgTiO}_3 - \text{FeTiO}_3 - \text{MnTiO}_3$ .

шафт, Илупин, 1987; Багдасаров, Илупин, 1988; Джейкс и др., 1989; Илупин и др., 1990; Edwards *et al.*, 1992; Hood, McCandell, 2004; Kjarsgaard *et al.*, 2004; Kostrovitsky *et al.*, 2004; Masum *et al.*, 2004; Wyatt *et al.*, 2004; Костровицкий и др., 2006, 2016; Милашев, 2015). Для минералов группы ильменита многих алмазонасных кимберлитов характерна положительная корреляция содержаний Mg и  $\text{Fe}^{3+}$ , минералов гейкилита и гематита. Мегакристы минералов группы ильменита часто содержат заметное количество Nb. Небольшое количество такого типа минералов группы ильменита содержат и кимберлиты обеих фаз Кимозерского тела, что коррелируется с относительно невысокой степенью их алмазонасности (Ушков, 2001; Лукьянова и др., 2006; Устинов и др., 2009). Подавляющее большинство мегакристов пикроильменита и ферригейкилита алмазонасных кимберлитов мира бедны марганцем, содержат менее 0.3–0.5 мас.% MnO. Кимозерские пикроильменит и железистый гейкилит обогащены им, содержат 0.8–4.3 мас.% MnO. В Бразилии известны редкие типы алмазонасных кимберлитов, ко-

торые содержат мегакристы обогащенного марганцем ильменита и манганильменита (Каминский, Белоусова, 2009). Так что и в этом отношении кимозерские кимберлиты не исключение. В подавляющем большинстве кимберлитов мира ильменит в их связующей массе (так называемый микрокристаллический ильменит) беден марганцем или марганцем обогащены только внешние зоны его кристаллов (Благулькина и др., 1975; Гаранин и др., 1978; Vostor, Boyd, 1980; Agel *et al.*, 1982; Доусон, 1983; Никишов, 1984; Tompkins, Haggerty, 1985; Костровицкий, 1986; Mitchell, 1986; Геншафт, Илупин, 1987; Багдасаров, Илупин, 1988; Илупин и др., 1990; Войтковский и др., 1991; Edwards *et al.*, 1992; Hood, McCandell, 2004; Kostrovitsky *et al.*, 2004; Wyatt *et al.*, 2004; Мальков, Филиппов, 2005; Костровицкий и др., 2006, 2016; Милашев, 2015). Редкие типы кимберлитов содержат в связующей массе богатый марганцем ильменит, манганильменит и пиррофанит (Wyatt, 1979; Pasteris, 1980; Tompkins, Haggerty, 1985; Chakhmouradian, Mitchell, 1999; Мальков, Филиппов, 2005; Каминский, Белоусова, 2009).

Именно таковы и кимберлиты Кимозера. В большинстве случаев это кимберлиты с существенной долей карбонатитовой составляющей. В карбонатитах повышенной щелочности (Якупиранга в Бразилии, Бенфонтейн в Южной Африке и др.) развиты такие же богатые марганцем минералы группы ильменита (Mitchell, 1978; Gaspar, Wylley, 1984). Можно предположить, что кимберлиты, в которых все типы минералов группы ильменита обогащены марганцем, возникли при участии карбонатитовых расплавов повышенной щелочности, тогда как стандартные кимберлиты с бедными марганцем минералами группы ильменита формировались при участии карбонатитовых расплавов невысокой щелочности. В восточной части Балтийского щита известны проявления обогащенных марганцем карбонатитов повышенной щелочности (Дудкин и др., 1984).

*Апатит кимберлитов I фазы* слагает призматические кристаллы длиной до 60 мкм в связующей массе. Апатит распределен весьма неравномерно. Нередки участки связующей массы, обогащенные апатитом до 3–5%. По составу это бедный хлором гидроксилфторапатит и реже фторгидроксилapatит, несколько щелочной, содержит ~ 0.5 мас.% Na<sub>2</sub>O, 1.5% SrO и 1% суммы легких лантанидов (Ce > La = Nd > Eu); часть фосфора замещена серой (табл. 12). Все это – типичные признаки апатита, который кристаллизовался из расплава повышенной щелочности.

*Baggelleit* – типичный минерал связующей массы кимберлитов (Fieremans, Ottenburgs, 1979; Доусон, 1983; Костровицкий, 1986). В кимберлитах Кимозера слагает редкие призматические кристаллы длиной до 60 мкм и их сростания (рис. 7). Состав бадделеита в кимберлитах I фазы (ан. 87–89, рис. 7а) и II фазы (ан. 90, рис. 7б) близок (табл. 13). Минерал содержит около 2% Hf и Nb, около 1% Ti. Для одного из кристаллов бадделеита выполнен прецизионный анализ (ан. 91, мас.%): ZrO<sub>2</sub> 92.75; HfO<sub>2</sub> 1.88; UO<sub>2</sub> 0.16; TiO<sub>2</sub> 0.86; Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1.30; Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.39; Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.43; CaO 0.43; SrO 0.13; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.18; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.34; сумма 98.85; Dy, Yb, Lu следы; Sc, Th, иные лантаниды не обнаружены (анал. О.А. Набелкин, ИМ-ГРЭ); формула: (Zr<sub>0.931</sub>Nb<sub>0.017</sub>Ti<sub>0.013</sub>Hf<sub>0.011</sub>Ca<sub>0.010</sub>P<sub>0.006</sub>Y<sub>0.004</sub>Gd<sub>0.003</sub>Fe<sub>0.003</sub>U<sub>0.001</sub>Sr<sub>0.001</sub>)<sub>1</sub>O<sub>2</sub>.

*Циркон* слагает мелкие короткопризматические кристаллы в сростаниях с ильменитом (рис. 3а, ан. 94), чаще обособленные в связующей массе. Состав циркона в кимберлитах I фазы (ан. 92–93) и II фазы (ан. 94–95) близок, циркон кимберлитов II фазы немного богаче гафнием (табл. 14). Минерал содержит

Таблица 12. Химический состав апатита кимберлитов I фазы, Кимозеро

№ ан.	Компоненты, мас.%			№ ан.	Число атомов в формуле		
	84	85	86		84	85	86
CaO	53.18	52.01	52.56	Ca	4.79	4.72	4.75
SrO	1.35	1.52	1.20	Sr	0.06	0.07	0.06
FeO	0.47	0.46	0.25	Fe	0.03	0.03	0.02
MgO	0.30	0.39	0.21	Mg	0.04	0.05	0.03
Na <sub>2</sub> O	0.37	0.40	0.60	Na	0.06	0.07	0.10
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.49	0.57	0.37	Ce	0.015	0.02	0.01
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.25	0.29	0.19	La	0.01	0.01	0.01
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.23	0.28	0.19	Nd	0.01	0.01	0.005
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	нпо	нпо	0.16	Eu	–	–	0.005
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	41.24	41.60	41.65	P	2.94	2.98	2.97
SO <sub>3</sub>	0.72	0.59	0.70	S	0.045	0.04	0.045
F	1.82	2.11	2.01	F	0.48	0.57	0.54
Cl	0.06	0.08	0.06	Cl	0.01	0.01	0.01
Сумма	97.50	99.03	99.85	ОН	0.51	0.35	0.45
– O =				(O)		(0.07)	
F <sub>2</sub> + Cl <sub>2</sub>							

Таблица 13. Химический состав бадделеита кимберлитов I фазы (87–89) и II фазы (90), Кимозеро

№ ан.	Компоненты, мас.%				№ ан.	Число атомов в формуле в расчете на один атом металлов			
	87	88	89	90		87	88	89	90
ZrO <sub>2</sub>	93.65	94.40	94.23	93.70	Zr	0.938	0.941	0.939	0.948
HfO <sub>2</sub>	1.76	1.83	1.91	2.04	Hf	0.010	0.011	0.011	0.012
TiO <sub>2</sub>	1.42	0.91	1.37	0.94	Ti	0.022	0.014	0.021	0.015
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.43	2.55	2.50	1.97	Nb	0.023	0.024	0.023	0.018
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.29	0.28	0.26	0.23	Fe <sup>3+</sup>	0.004	0.004	0.004	0.004
CaO	0.15	0.30	0.10	0.13	Ca	0.003	0.006	0.002	0.003
Сумма	99.70	100.27	100.37	99.91					

Таблица 14. Химический состав циркона кимберлитов I фазы (92–93) и II фазы (94–95), Кимозеро

№ ан.	Компоненты, мас.%				№ ан.	Число атомов в формуле в расчете на два атома металлов			
	92	93	94	95		92	93	94	95
ZrO <sub>2</sub>	62.55	58.57	60.98	62.45	Zr	0.956	0.900	0.929	0.947
HfO <sub>2</sub>	0.78	1.75	1.61	1.99	Hf	0.007	0.016	0.014	0.018
ThO <sub>2</sub>	1.80	0.57	1.53	0.17	Th	0.013	0.004	0.011	0.001
UO <sub>2</sub>	нпо	нпо	0.06	нпо	U	–	–	–	–
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	0.16	0.12	0.79	Nb	0.001	0.002	0.002	0.011
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.98	3.40	1.75	0.69	Ce	0.011	0.039	0.020	0.007
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.90	1.11	1.45	0.56	Nd	0.010	0.012	0.016	0.006
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.13	1.07	0.42	0.52	Fe <sup>3+</sup>	0.003	0.025	0.010	0.012
SiO <sub>2</sub>	31.90	31.82	31.97	32.13	Si	0.999	1.002	0.998	0.998
Сумма	99.10	98.54	99.90	99.29					

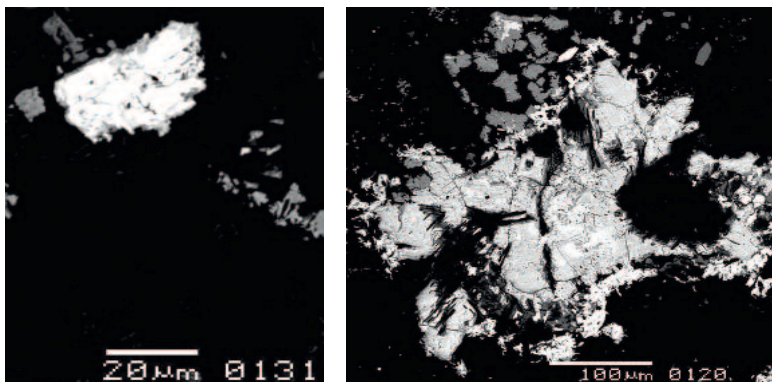


Рис. 7. Багделейт кимберлитов Кимозера, а – I фаза, б – II фаза: а – кристалл багделейта (белый, ан. 87–89) брекчирован и сцементирован цирконом; б – кристалл багделейта (ярко-белый вверху снимка, ан. 90) в агрегате магнетита, ильменита и титанита среди тремолита и актинолита. В отраженных электронах.

(мас.%) 0.8 – 2 Hf, до 3 Ce, до 1.5 Nd, до 0.7 Nb. Для одного из кристаллов циркона кимберлитов II фазы выполнен прецизионный анализ (ан. 96, мас. %):  $ZrO_2$  60.30;  $HfO_2$  2.11;  $ThO_2$  0.37;  $TiO_2$  0.07;  $V_2O_5$  0.06;  $Cr_2O_3$  0.10;  $Al_2O_3$  0.13;  $Fe_2O_3$  0.36;  $MnO$  0.04;  $CaO$  0.22;  $Nb_2O_5$  0.86;  $Y_2O_3$  1.27;  $La_2O_3$  0.21;  $Ce_2O_3$  0.78;  $Nd_2O_3$  0.65;  $Sm_2O_3$  0.10;  $Gd_2O_3$  0.21;  $Tb_2O_3$  0.08;  $Yb_2O_3$  0.04;  $SiO_2$  32.70;  $P_2O_5$  0.38; сумма 100.84; Sc, U, иные лантаниды не обнаружены (анал. О.А. Набелкин). Формула циркона:  $(Zr_{0.895}Y_{0.020}Hf_{0.019}Nb_{0.012}Ce_{0.009}Fe_{0.008}Nd_{0.007}Ca_{0.007}Al_{0.005}Th_{0.003}La_{0.002}Gd_{0.002}Ti_{0.002}Cr_{0.002}Sm_{0.001}Tb_{0.001}V_{0.001}Mn_{0.001})_{0.998}[(Si_{0.992}P_{0.010})_{1.002}(O_{3.944}OH_{0.056})_4]$ . Количество гидроксидов оценено по балансу зарядов. Обычно циркон кимберлитов крайне беден иттрием и актинидами (Zircon, 2004). Циркон кимберлитов Кимозера содержит от 0.2 до 1.8 мас. % тория и до 1% иттрия.

### Эпигенетические образования Кимозера

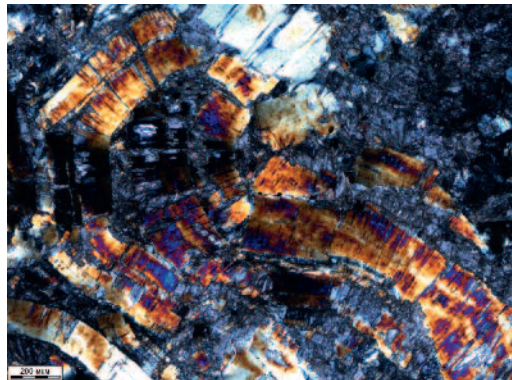
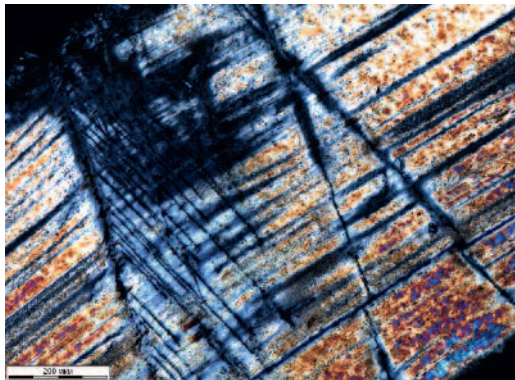
Кимберлитовые породы Кимозера совместно с окружающими габбро-долеритами и

терригенными и вулканогенными породами людиковия и их ксенолитами в кимберлитах, как правило, многократно тектонизированы (кливажированы, брекчированы, местами интенсивно рассланцованы) и метаморфизованы. В кристаллах флогопита и в псевдоморфозах хлорита по флогопиту наблюдаются полосы излома (кинк-бэнды) (рис. 8а). Вкрапленники флогопита нередко смяты, разорваны и скручены (рис. 8б). Кимберлиты, как и окружающие людиковийские вулканогенно-осадочные породы и габбро-долериты, претерпели зеленокаменный региональный метаморфизм в условиях цеолитовой фации (ЦФ), позднее – в условиях пренит-пумпеллитовой фации (ППФ) и превращены в метакимберлиты.

### Метагаббро-долериты ксенолитов среди метакимберлитов Кимозера

Метагаббро-долериты (габбро-диабазы) ксенолитов в кимберлитах сложены альбитом, клиноцоизитом, эпидотом, хлоритами, актинолитом, пренитом (рис. 9а), железис-

Рис. 8. Метакимберлиты Кимозера (шлифы в проходящем свете, николи X): а – полосы излома в кристалле хлоритизированного флогопита; б – разорванный и смятый вкрапленник флогопита.





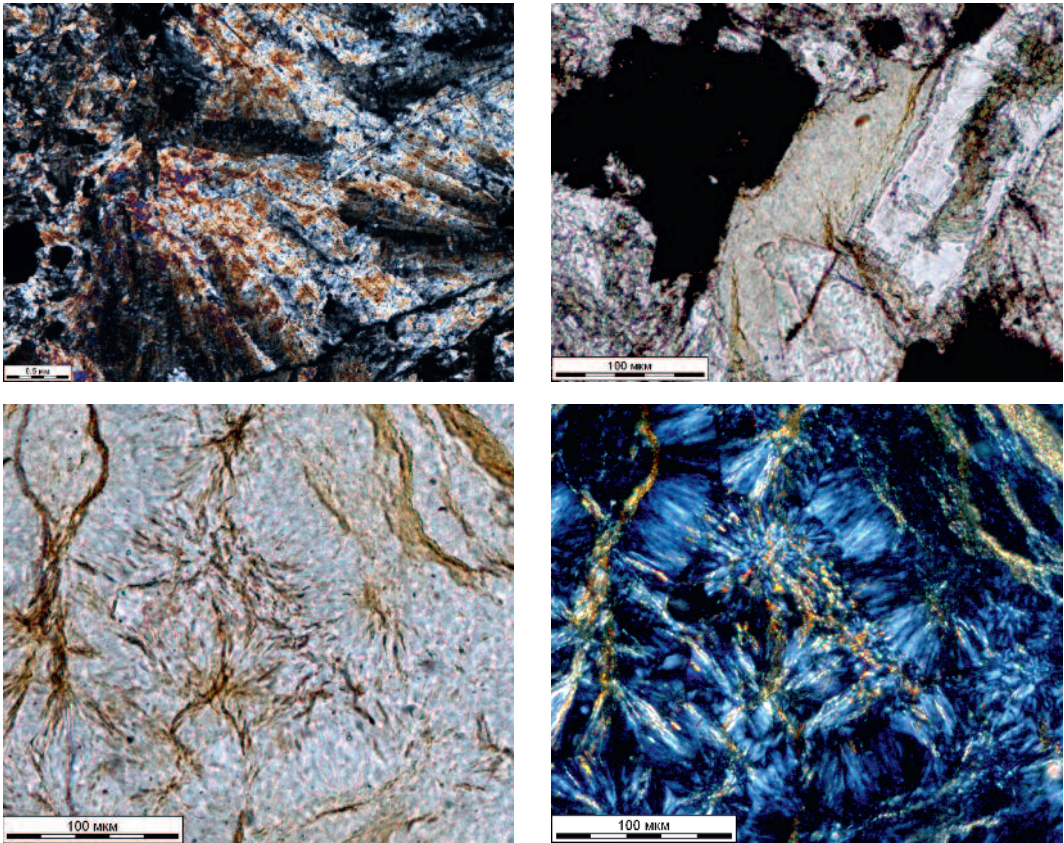


Рис. 9. Метагаббро-долериты ксенолитов Кимозера (шлифы в проходящем свете): а – гнездо пренита (ан. 97), никели X; б – псевдоморфозы альбита и пумпеллиита (рельефный зеленый до бурого, ан. 100) по лабрагору, хлорита и актинолита по авгиту, землистого титанита (черный) по титаномagnetиту при 1 никеле; с, d – гнездо хлорита рипидолита (ан. 98) с прожилками коричневатого кронштедтита (ан. 99), с – при одном никеле, d – никели X.

тым пумпеллиитом, титанитом, кварцем, глиноземистым кронштедтитом, гематитом, калишпатом, кварцем, ферроаксинитом. Минеральные ассоциации метагаббро-долеритов отвечают стандартной пренит-пумпеллиитовой фации невысоких давлений (Coombs, 1969; Liou *et al.*, 1987; Спиридонов и др., 2000; Philpotts, Auge, 2009). Плаггиоклаз – битовнит-лабрадор габбро-долеритов – заместили клиноцоизит, альбит, эпидот, пренит, пумпеллиит-(Fe) (рис. 9b). Пренит слагает и небольшие гнезда (рис. 9a). Состав пренита (ан. 97, мас.%): SiO<sub>2</sub> 44.82; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 24.90; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.56; CaO 27.49; Na<sub>2</sub>O 0.18; сумма 97.95; формула: (Ca<sub>1.976</sub>Na<sub>0.023</sub>)<sub>1.999</sub>(Al<sub>0.973</sub>Fe<sub>0.028</sub><sup>3+</sup>)<sub>1.001</sub>[(OH)<sub>2</sub>/Al<sub>0.995</sub>Si<sub>3.005</sub>O<sub>10</sub>], близка к теоретической. Авгит габбро-долеритов замещен агрегатами актинолита и хлорита. Актинолит низкоглиноземистый (0.3–2.5 мас.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), железистый, f = 32–34. Хлорит также слагает многочисленные небольшие гнезда, его состав варьирует от рипидолита (f до 47) до клинохлора. Состав

рипидолита (ан. 98, мас.%): SiO<sub>2</sub> 27.25; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 16.96; FeO 23.75; MgO 16.12; сумма 84.08; формула: (Mg<sub>2.64</sub>Fe<sub>2.18</sub><sup>2+</sup>Al<sub>1.18</sub>)<sub>6</sub>[(OH)<sub>6</sub>/(Si<sub>2.99</sub>Al<sub>1.01</sub>)<sub>6</sub>O<sub>10</sub>], f = 45.2. В гнездах хлорита обычно развиты микропрожилки железистого минерала группы серпентина кронштедтита (рис. 9c, 9d); его состав (ан. 99, мас.%): SiO<sub>2</sub> 10.09; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2.04; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 55.04; FeO 23.57; MgO 4.32; сумма 95.06; формула кронштедтита: (Fe<sub>1.23</sub><sup>2+</sup>Fe<sub>1.37</sub><sup>3+</sup>Mg<sub>0.40</sub>)<sub>3</sub>[(OH)<sub>4</sub>/(Fe<sub>1.22</sub><sup>2+</sup>Si<sub>0.63</sub>Al<sub>0.15</sub>)<sub>2</sub>O<sub>5</sub>], f общ. – 90.5; количества Fe<sup>2+</sup> и Fe<sup>3+</sup> рассчитаны по балансу зарядов. Титаномagnetит и ильменит габбро-долеритов почти полностью замещены титанитом. Пумпеллиит-(Fe) входит в состав псевдоморфоз по плаггиоклазу (рис. 9b), образует включения в гнездах хлорита и пренита. Состав пумпеллиита-(Fe) (ан. 100, мас.%): SiO<sub>2</sub> 37.26; TiO<sub>2</sub> 0.31; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 24.90; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.23; FeO 8.84; MnO 0.54; MgO 3.11; CaO 22.79; Na<sub>2</sub>O 0.19; сумма 94.00; формула: (Ca<sub>1.965</sub>Na<sub>0.030</sub>)<sub>1.995</sub>(Fe<sub>0.593</sub><sup>2+</sup>Mg<sub>0.373</sub>Mn<sub>0.037</sub>)<sub>1.005</sub>(Al<sub>1.967</sub>Ti<sub>0.019</sub>Fe<sub>0.014</sub>)<sub>2</sub>[(OH)<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O/SiO<sub>4</sub>/Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>], f = 63. Характерный боро-



силикат ППФ ферроаксинит (Спиридонов и др., 2000) совместно с эпидотом слагает небольшие гнезда клиновидных кристаллов. Аксинит — один из концентраторов марганца в метаморфических породах, содержание марганца в ферроаксините Кимозера — до 2.5 мас.%. Ферроаксинит метагаббро-долеритов Кимозера содержит 58–64, в среднем 61% минала ферроаксинита, 19–27, в среднем 22% минала магнезиоаксинита, 15–18, в среднем 17% минала манганаксинита ( $n = 5$ ). В ассоциации с ферроаксинитом развит слюдястый минерал коричневого цвета с резким плеохроизмом магнезиостильпномелан — ленниленапеит. Его состав (ан. 101, мас.%):  $\text{SiO}_2$  41.73;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  11.71;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  9.20;  $\text{FeO}$  1.86;  $\text{MgO}$  18.41;  $\text{CaO}$  1.06;  $\text{K}_2\text{O}$  2.78; сумма 89.75; формула:  $(\text{K}_{0.72}\text{Ca}_{0.25})_{0.97}(\text{Mg}_{6.00}\text{Fe}_{1.52}^{3+}\text{Fe}_{0.34}^{2+}\text{Al}_{0.14})_8[(\text{OH})_8/(\text{Si}_{9.12}\text{Al}_{2.88})_8\text{O}_{28}]\cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ,  $f = 23.7$ ; количества  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  рассчитаны по балансу зарядов.

### **Сравнение характера метаморфизма ксенолитов базитов Кимозера и окружающих кимберлитовую залежь базитов палеопротерозоя Северного Прионежья**

Широко распространенные в Северном Прионежье базальты, долериты и габбро-долериты трапповой формации палеопротерозоя почти повсеместно метаморфизованы, точно так же, как и габбро-долериты внутри кимберлитовой залежи Кимозера, и сложены теми же минеральными ассоциациями. Базальты превращены в спилиты и близкие к ним породы, долериты и габбро-долериты — в диабазы и габбро-диабазы. Это Олонецкая диабазовая формация Ф.Ю. Левинсона-Лессинга (Левинсон-Лессинг, 1888). По нашим наблюдениям, в metabазальтах и метагаббро-долеритах трапповой формации Северного Прионежья широко развиты пренит и железистый пумпеллиит: в ткани метапород и в трещинах гидроразрыва среди них в агрегатах кварца, хлорита, кальцита, эпидота, в гнездах хлорита; повсеместно развиты микропрожилки глиноземистого кроншtedтита; metabазиты содержат стильпномелан, metabазальты — вкрапленность и скопления самородной меди. В metabазитах уставлены проявления аксинита (Тимофеев, 1935; авторские наблюдения). Оценки температур формирования хлорита metabазитов Кимозера и metabазитов окружающих толщ с использованием геотермометра М. Кателиню (Cathelineau, 1988) — около 330°C. Таким образом, породы трапповой формации людико-

вия Северного Прионежья метаморфизованы в условиях ППФ. На локальных участках среди них развиты мандельштейны базальтового состава с халцедоном и агатами (Тимофеев, 1935). По нашим наблюдениям, эти метавулканииты содержат ломонтит, т.е. это образования высокотемпературной части цеолитовой фации (ЦФ). В мандельштейнах и агатах среди них развиты прожилки и метасомы пренита, пумпеллиита и Al-кроншtedтита — образования ППФ. Итак, в начале преобразований породы трапповой формации людиковия Северного Прионежья были захвачены низкоградным зеленокаменным метаморфизмом погружения в условиях ЦФ, затем — в условиях ППФ. При этих процессах произошла частичная мобилизация углеродистого вещества и серы из шунгитовых пород. Возле них в эндоконтактной зоне возникли углеродсодержащие метакимберлиты и метакимберлиты, содержащие пирротин и иные сульфиды. Углеродсодержащие метакимберлиты отличаются от иных метакимберлитов Кимозера пониженным содержанием магнетита и повышенным — тремолита и актинолита.

### **Метакимберлиты Кимозера**

Кимберлиты Кимозера, как и окружающие габбро-долериты и вулканогенно-осадочные породы раннего протерозоя и их ксенолиты в кимберлитах, захвачены региональным зеленокаменным метаморфизмом. Метаморфизованные кимберлитовые породы Кимозера слагают серпентины: антигорит и менее лизардит, тремолит, актинолит, карбонаты: кальцит и доломит, хлориты, титанит, количество которых варьирует в широких пределах (Лукьянова и др., 1986; Ушков, 2001; Афанасьева, 2009; Устинов и др., 2009; Priyatkin *et al.*, 2014; Путинцева, Спиридонов, 2016). Ряд геологов считают, что полученный И.Л. Махоткиным (2003) изотопный Sm-Nd возраст 1.76 млрд лет для кимберлитовых пород отвечает возрасту метаморфизма кимберлитов. Метаморфизованные кимберлиты Кимозера I фазы, нередко массивной текстуры, слагают минералы группы серпентина (антигорит и реликтовый лизардит), хлориты, смешанно-слоистые минералы (корренсит, тальк-серпентин), магнетит, кальцит, доломит, брусит, тальк, титанит и иные продукты замещения ильменита, менее — хроммагнетит, тремолит, актинолит, пентландит, полидимит, миллерит (реликтовый и поздний), поздние годлевскит и бравоит. Часто состав метакимберлитов I фазы существенно антиго-

ритовый или хлорит-антигоритовый с массой магнетита, в других участках — доломит-серпентиновый ( $\pm$  магнетит). Эти метакимберлиты пересечены прожилками хризотил-асбеста и более молодыми прожилками серпонта (лизардита). В экзоконтактах антигоритовых метакимберлитов породы рамы заметно серпентинизированы. Метаморфизованные кимберлиты Кимозера II фазы слагают тремолит и актинолит, кальцит, доломит, хлориты, менее — корренсит, титанит и иные продукты замещения ильменита, минералы группы серпентина, магнетит, пирротин, зигенит, иные акцессорные минералы, поздние пирит и бравоит. В эндоконтактах тела породы нередко обогащены углеродистым веществом, как правило, графитоидом. Состав метакимберлитов II фазы существенно карбонат-тремолитовый (актинолитовый) или карбонат-хлорит-актинолитовый. В этих метакимберлитах и вдоль контактов их тел размещены жилы и прожилки тремолита и тремолит-асбеста. В целом набор метаморфических минералов в метакимберлитах обеих фаз близок. Это образования ППФ с реликтами минералов ЦФ (лизардит, миллерит) и небольшим количеством более поздних образований ЦФ (жилы и метасомы позднего лизардита, поздние миллерит, годлевскит, пирит, бравоит, вазсит, барит и ангидрит). В ряде участков контакты залежи кимберлитов тектонические. Здесь породы оталькованы и пересечены кварц-карбонатными и карбонатными жилами.

## Минералогия метакимберлитов Кимозера

*Минералы группы серпентина* — антигорит с реликтами лизардита — наиболее распространенные образования метакимберлитов. *Лизардит* представлен реликтовыми выделениями с характерной структурой в антигорите. Минерал диагностирован по оптическим свойствам и рентгенограммам (Лукьянова и др., 2006; Афанасьева, 2009; Priyatkina *et al.*, 2014). Нами лизардит наблюдался в серии шлифов. По составу лизардит железистый (ан. 102 и 103, мас.%): SiO<sub>2</sub> 41.05 и 39.86; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.53 и 0.23; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1.52 и 1.58; FeO 9.24 и 12.74; MnO 0.23 и 0.28; MgO 32.53 и 32.79; сумма 85.10 и 86.09; формулы: (Mg<sub>2.50</sub>Fe<sub>0.39</sub><sup>2+</sup>Mn<sub>0.01</sub>Al<sub>0.08</sub>Cr<sub>0.02</sub>)<sub>3</sub>[(Si<sub>1.99</sub>Al<sub>0.01</sub>)<sub>2</sub>O<sub>5</sub>](OH<sub>3.91</sub>O<sub>0.09</sub>)<sub>4</sub> и (Mg<sub>2.44</sub>Fe<sub>0.54</sub><sup>2+</sup>Al<sub>0.02</sub>)<sub>3</sub>[(Si<sub>1.99</sub>Al<sub>0.01</sub>)<sub>2</sub>O<sub>5</sub>](OH<sub>3.99</sub>O<sub>0.01</sub>)<sub>4</sub>; f = 14 и 18. Отсутствие хлора в составе лизардита — свидетельство низкой солености метаморфизующих флюидов. Железистый лизардит — продукт ранней серпентинизации в

Таблица 15. Химический состав (мас.%) клинохлора метакимберлитов, Кимозера

№ ан.	107	108	109	110	111	112
SiO <sub>2</sub>	28.61	28.87	28.53	29.67	30.83	30.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.66	15.37	14.39	16.42	14.42	16.82
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.20	1.62	1.39	0.62	0.28	0.14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	0.18	0.84	0.69	0.29	—
FeO	20.45	19.36	19.15	13.63	14.08	15.04
MnO	0.18	0.11	0.22	0.09	0.15	0.12
MgO	20.26	21.40	20.97	25.59	25.97	24.44
Сумма	87.36	86.91	85.40	86.71	86.02	86.60
Число атомов в формуле в расчете на 10 атомов металлов						
Mg	3.150	3.303	3.302	3.828	3.914	3.674
Fe <sup>2+</sup>	1.784	1.676	1.691	1.144	1.213	1.271
Fe <sup>3+</sup>	—	0.014	0.067	0.052	0.022	—
Mn	0.016	0.010	0.020	0.007	0.013	0.011
Al <sup>VI</sup>	0.786	0.865	0.804	0.920	0.837	1.036
Cr	0.264	0.132	0.116	0.049	0.023	0.008
Сумма	6	6	6	6	6	6
Si	2.984	2.989	3.013	2.979	3.118	3.034
Al <sup>IV</sup>	1.016	1.011	0.987	1.021	0.882	0.966
Сумма	4	4	4	4	4	4
ОН	7.986	8	8	8	8	7.922
(O)	0.014	—	—	—	—	0.078
f общ.	36.4	34.0	37.3	23.9	23.9	25.9

восстановительных условиях (Варлаков, 2000). Вероятная реакция образования лизардита за счет магматических оливина и кальцита: (Mg<sub>0.8</sub>Fe<sub>0.2</sub>)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> + CaCO<sub>3</sub> + 2H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub> → (Mg<sub>0.8</sub>Fe<sub>0.2</sub>)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> + Ca(Mg<sub>0.8</sub>Fe<sub>0.2</sub>)<sub>1</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. Лизардит — самый низкотемпературный серпентин (Артёмов, 1973; Варлаков, 2000), типоморфный минерал метакимберлитов цолоитовой фации Восточно-Сибирской платформы (Соколова, Спиридонов, 2006; Спиридонов и др., 2010). *Антигорит* — наиболее распространенный минерал метакимберлитов, возник при замещении лизардита. Широко распространены псевдоморфозы по оливину, которые слагают антигорит, антигорит с магнетитом, антигорит с магнетитом и карбонатами (обычно это железистый доломит) (рис. 10а, 10б, ан. 104), антигорит с тальком (рис. 10с, ан. 105). Антигорит нередко ассоциирует с бруситом. Вероятная реакция образования такой ассоциации за счет лизардита: 17Mg<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> → Mg<sub>48</sub>Si<sub>34</sub>O<sub>85</sub>(OH)<sub>62</sub> (антигорит) + 3Mg(OH)<sub>2</sub> (брусит).

Состав антигорита (ан. 104 и 105, мас.%): SiO<sub>2</sub> 44.33 и 43.38; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.19 и 0.20; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.31 и 0.44; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.40 и 1.28; FeO 2.28 и 3.37; MnO 0.11 и нпо; MgO 40.56 и 39.74; NiO 0.27 и нпо;

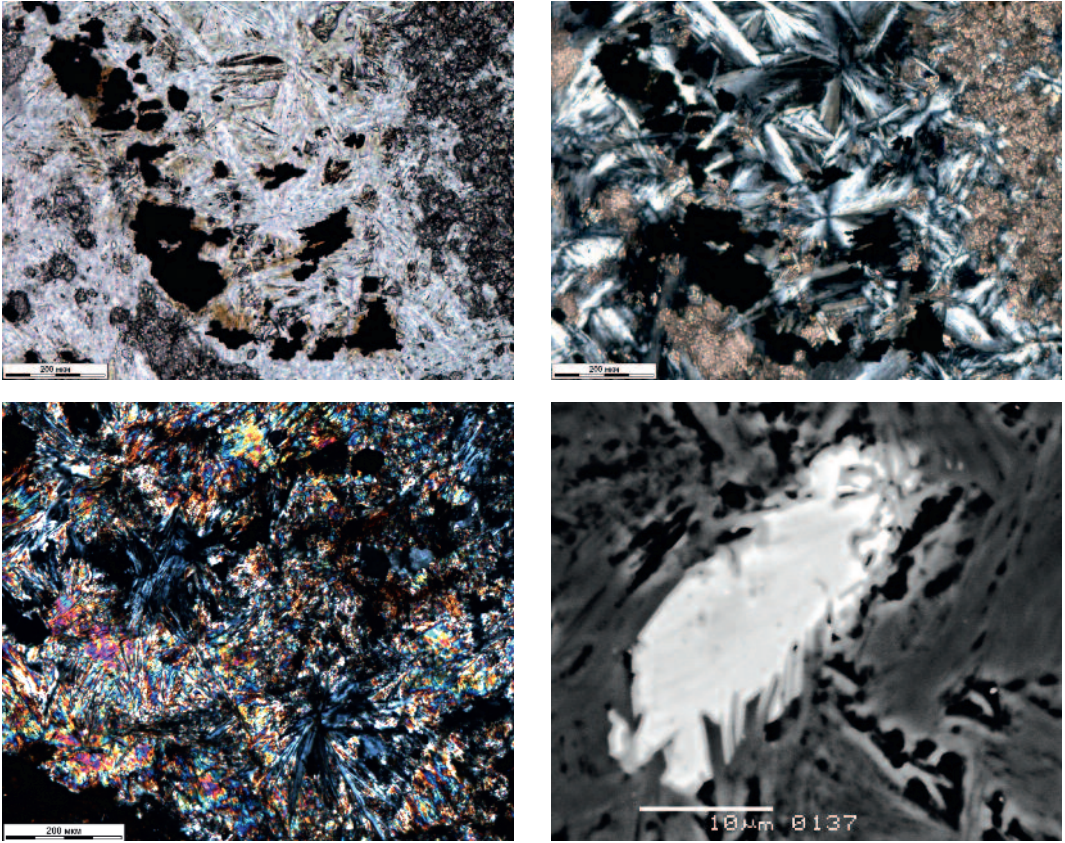


Рис. 10. Метаморфозованные кимберлиты Кимозера I фазы (a, b, c — шлифы в проходящем свете, d — вид в отраженных электронах): a, b — псевдоморфоза антигорита (ан. 104), магнетита (ан. 132) и железистого доломита по оливину, a — при 1 николе, b — николи X; c — псевдоморфоза антигорита (ан. 105) и талька (ан. 114) по оливину, николи X; d — сростане антигорита и гидроксилатапта (светло-серый).

сумма 88.45 и 88.41. Формулы:  $(\text{Mg}_{45.94}\text{Fe}_{1.45}^{2+}\text{Fe}_{0.20}^{3+}\text{Ni}_{0.23}\text{Mn}_{0.07}\text{Cr}_{0.11})_{48}[(\text{Si}_{33.69}\text{Al}_{0.28}\text{Fe}_{0.03}^{3+}\text{O}_{85})](\text{OH})_{62}$  и  $(\text{Mg}_{45.36}\text{Fe}_{2.16}^{2+}\text{Fe}_{0.36}^{3+}\text{Cr}_{0.12})_{48}[(\text{Si}_{33.22}\text{Al}_{0.40}\text{Fe}_{0.38}^{3+}\text{O}_{85})](\text{OH})_{62}$ . Антигорит заметно менее железистый, чем лизардит, который он заместил. Поэтому с антигоритом почти постоянно ассоциирует магнетит.

**Смешанно-слоистый 1:1 тальк-серпентин.** В одном из образцов антигоритовых метакимберлитов установлен богатый никелем и железом минерал, в шлифе похожий на антигорит. Длина его пластинок — до 70 мкм. Состав минерала (ан. 106, мас. %):  $\text{SiO}_2$  50.98;  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  0.66;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0.21;  $\text{FeO}$  18.14;  $\text{MgO}$  17.94;  $\text{NiO}$  11.07; сумма 99.08; Mn, Ti, V, Ca не обнаружены; формула:  $(\text{Mg}_{1.04}\text{Fe}_{0.59}^{2+}\text{Ni}_{0.35}\text{Cr}_{0.02})_2[(\text{Si}_{1.96}\text{Al}_{0.01})_2\text{O}_5](\text{OH})_2$ . Возможно, столь богатый никелем минерал возник за счет аваруита  $\text{Ni}_3\text{Fe}$  — обычного продукта ранней лизардитовой серпентинизации богатых оливином пород в восстановительных условиях (Варлаков, 2000; Спиридонов и др., 2000).

**Хлорит** — один из распространенных минералов метакимберлитов. Его состав в заметной степени зависит от состава замещенных минералов. Каймы замещения вокруг хромшпинелидов слагает хромистый клинохлор с 3.6%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , достаточно высокожелезистый (ан. 107). Псевдоморфозы по вкрапленникам флогопита образует железистый клинохлор с 3.6%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , достаточно высокожелезистый ( $f = 34-37$ ) клинохлор с 1.4–1.6%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , (ан. 108–109). Клинохлор, заместивший связующую массу кимберлитов, значительно менее железистый ( $f = 24-26$ ) и содержит 0.1–0.6%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (табл. 15, ан. 110–112). Оценки температур образования хлорита метакимберлитов Кимозера с использованием геотермометра М. Кателинью (Cathelineau, 1988) — около 320°C. Хлориты в метакимберлитах Кимозера в целом менее железистые и менее глиноземистые, чем в метабазитах ксенолитов и окружающих толщ, вероятно, вследствие различия состава протолитов.



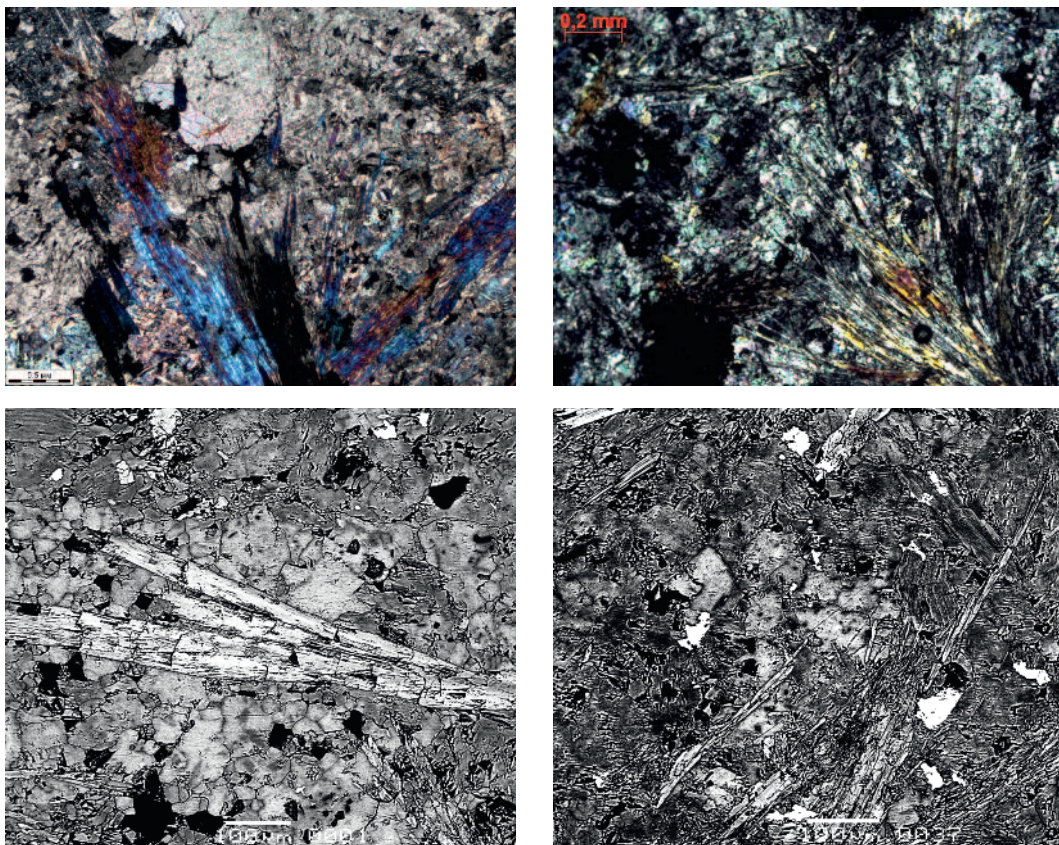


Рис. 11. Метаморфизованные кимберлиты Кимозера II фазы: а, б — агрегаты тремолита (ан. 118, 119), кальцита и доломита, замещившие магматические оливин и кальцит, шлифы в проходящем свете, николи X; с, d — сростания зональных тремолита — актинолита (центр — ан. 120, внешняя зона — ан. 122) с кальцитом (более светлый), доломитом (более серый) и титанитом (светлый), в отраженных электронах.

Тальк в отдельных участках метакимберлитов совместно с антигоритом слагает псевдоморфозы по оливину (рис. 9с, ан. 114). Состав талька широко варьирует от почти безжелезистого до железистого (ан. 113 — 115, мас.%):  $\text{SiO}_2$  64.19, 64.40 и 63.09;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0.74, 0.23 и 0.11;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0.13, 0 и 0.23;  $\text{FeO}$  0, 3.22 и 6.14;  $\text{MgO}$  32.52, 30.42 и 28.29; сумма 97.58, 98.27 и 97.86; количество  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  рассчитано по балансу зарядов; формулы:  $(\text{Mg}_{2.986}\text{Al}_{0.008}\text{Fe}_{0.006}^{3+})_3[(\text{Si}_{3.964}\text{Al}_{0.046})_4\text{O}_{10}]_3(\text{Mg}_{2.817}\text{Fe}_{0.167}^{2+}\text{Al}_{0.016})_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$  и  $(\text{Mg}_{2.667}\text{Fe}_{0.325}\text{Fe}_{0.008}^{3+})_3[(\text{Si}_{3.986}\text{Al}_{0.008}\text{Fe}_{0.003}^{3+})_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ ;  $f = 0.2, 5.6$  и  $11.2$ . Маложелезистый тальк развит в метакимберлитах, богатых магнетитом.

Корренсит (смешанно-слоистый 1:1 хлорит — сапонит). Корренсит микроскопически напоминает антигорит. Пластинчатые выделения корренсита находятся в агрегатах антигорита, хлорита, тремолита и актинолита. Типичные составы корренсита (ан. 116 и 117, мас.%):  $\text{SiO}_2$  34.77 и 32.51;  $\text{TiO}_2$  0.25 и 0.21;

$\text{Cr}_2\text{O}_3$  0.64 и 0.45;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  13.12 и 13.14;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  1.04 и 3.35;  $\text{FeO}$  8.41 и 9.76;  $\text{MnO}$  0.13 и 0.09;  $\text{MgO}$  25.87 и 23.45;  $\text{CaO}$  0.09 и 0.12;  $\text{Na}_2\text{O}$  0.10 и 0.13; сумма 84.42 и 83.21; количество  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  рассчитано по балансу зарядов; формулы в расчете на 17.33 атома металлов:  $(\text{Mg}_{0.28}\text{Ca}_{0.02}\text{Na}_{0.03})_{0.33}(\text{Mg}_{6.56}\text{Fe}_{1.26}^{2+}\text{Al}_{0.91}\text{Fe}_{0.14}^{3+}\text{Cr}_{0.09}\text{Ti}_{0.03}\text{Mn}_{0.02})_9[(\text{Si}_{6.17}\text{Al}_{1.33})_8\text{O}_{20}](\text{OH})_{10} \cdot n(\text{H}_2\text{O})$  и  $(\text{Mg}_{0.26}\text{Ca}_{0.02}\text{Na}_{0.05})_{0.33}(\text{Mg}_{6.13}\text{Fe}_{1.49}^{2+}\text{Al}_{0.80}\text{Fe}_{0.46}^{3+}\text{Cr}_{0.03}\text{Ti}_{0.07}\text{Mn}_{0.02})_9[(\text{Si}_{5.96}\text{Al}_{2.04})_8\text{O}_{20}](\text{OH})_{10} \cdot n(\text{H}_2\text{O})$ ,  $f$  общ. = 17.1 и 24.3. Корренсит — характерный минерал метабазитов пренит-пумпеллиитовой фации (Спиридонов и др., 2000).

Тремолит и актинолит широко распространены в метакимберлитах, обычно совместно с карбонатами — доломитом и кальцитом (рис. 11). Габитус их кристаллов длиннопризматический до иглочатого. Наблюдаются и расщепленные кристаллы. Многие кристаллы зональные: центральные зоны образует тремолит (ан. 118 — 120), внешние зоны — актинолит (рис. 11d, ан. 121 — 122). Более рас-



Таблица 16. Химический состав (мас.%) тремолита (118–120) и актинолита (121–122) метакимберлитов Кимозера

№ ан.	118	119	120	121	122
SiO <sub>2</sub>	59.54	57.78	57.43	56.71	55.61
TiO <sub>2</sub>	0.28	0.28	0.08	0.09	нпо
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	нпо	0.09	нпо	0.08	0.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	нпо	0.70	0.16	0.28	0.53
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	2.46	2.35	0.38	0.74
FeO	6.37	4.78	7.16	8.88	10.32
MnO	нпо	0.12	0.09	0.14	0.12
MgO	21.24	20.26	19.59	18.69	16.65
NiO	нпо	нпо	нпо	нпо	0.33
CaO	13.56	12.60	12.91	13.14	12.32
Na <sub>2</sub> O	нпо	0.09	нпо	0.06	0.19
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.18	0.19	0.21	0.26	0.23
Сумма	98.19	99.25	98.98	98.71	97.23
Число атомов в формуле					
Mg	4.25	4.13	4.03	3.90	3.56
Fe <sup>2+</sup>	0.72	0.55	0.83	1.03	1.24
Fe <sup>3+</sup>	—	0.25	0.12	0.03	0.08
Mn	—	0.01	0.01	0.02	0.01
Ni	—	—	—	—	0.04
Ti	0.03	0.03	0.01	0.01	—
Al <sup>VI</sup>	—	0.02	—	—	0.05
Cr	—	0.01	—	0.01	0.02
Сумма	5	5	5	5	5
Ca	1.95	1.85	1.92	1.96	1.89
Na	—	0.02	—	0.02	0.05
Y	0.01	0.015	0.02	0.02	0.02
Si	8.00	7.90	7.96	7.94	7.96
Al <sup>IV</sup>	—	0.10	0.03	0.05	0.04
Fe <sup>3+</sup>	—	—	0.01	0.01	—
Сумма	8	8	8	8	8
f общ.	14.4	16.5	19.4	21.8	28.7

Примечание. Cl, F, V, REE не обнаружены.

пространен тремолит. Тремолит и актинолит низкоглиноземистые и крайне низкощелочные, лишены F и Cl, бедны Ti, Cr, Mn, их железистость колеблется от 14 до 29, постоянно присутствует примесь Y (табл. 16). Эти низкотемпературные амфиболы — главные минералы метакимберлитов, заместивших кимберлиты с обильным магматическим кальцитом. Вероятная реакция образования тремолита за счет магматических оливина и кальцита:  $16\text{Mg}_2[\text{SiO}_4] + 26\text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O} + 18\text{CO}_2 \rightarrow 2\text{Ca}_2\text{Mg}_5[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH})_2 + 22\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . Минералы ряда тремолит — актинолит в метакимберлитах Кимозера менее железистые и менее глиноземистые, чем в габбро-диабаз

Таблица 17. Химический состав (мас.%) титанита метакимберлитов Кимозера

№ ан.	123	124	125	126	127	128	129	130
SiO <sub>2</sub>	29.77	29.73	29.66	30.18	29.46	29.66	30.04	30.32
TiO <sub>2</sub>	39.36	39.08	38.59	39.17	39.25	38.66	37.80	39.79
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.22	0.84	0.23	нпо	0.08	0.11	0.16	0.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.61	0.93	0.91	0.83	0.86	0.82	0.63	0.32
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.70	0.48	0.47	0.40	0.31	0.39	0.69	0.55
FeO	0.21	0.31	0.37	0.44	0.46	1.22	1.51	0.55
CaO	27.67	27.44	27.83	27.73	27.64	27.40	26.95	27.51
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.17	0.18	нпо	0.17	0.35	0.18	0.22	0.23
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.23	0.33	0.71	0.27	1.34	1.16	0.93	0.61
ZrO <sub>2</sub>	0.23	0.34	0.23	0.20	0.23	0.23	0.59	0.24
F	1.00	0.88	0.89	0.86	нпо	нпо	нпо	нпо
Сумма	99.75	99.14	99.51	99.89	99.98	99.83	99.52	100.23
-O = F <sub>2</sub>								
Число атомов в формуле в расчете на три атома металлов								
Ca	0.977	0.974	0.985	0.976	0.974	0.966	0.953	0.966
Y	0.003	0.003	—	0.003	0.006	0.003	0.004	0.004
Fe <sup>2+</sup>	0.006	0.008	0.010	0.012	0.013	0.034	0.042	0.015
Сумма	0.986	0.985	0.995	0.991	0.993	1.003	0.999	0.985
Ti	0.976	0.949	0.958	0.967	0.971	0.956	0.940	0.980
Zr	0.004	0.005	0.004	0.003	0.004	0.004	0.009	0.004
Nb	0.003	0.005	0.011	0.005	0.020	0.017	0.014	0.009
Al <sup>VI</sup>	0.006	0.021	0.014	0.023	0.002	0.007	0.016	0.005
Cr	0.006	0.022	0.006	—	0.002	0.003	0.004	0.003
V	0.019	0.013	0.012	0.011	0.008	0.010	0.018	0.014
Сумма	1.014	1.015	1.005	1.009	1.007	0.997	1.001	1.015
Si	0.982	0.985	0.979	0.991	0.969	0.975	0.992	0.993
Al <sup>IV</sup>	0.018	0.015	0.021	0.009	0.031	0.025	0.008	0.007
Сумма	1	1	1	1	1	1	1	1
F	0.104	0.093	0.093	0.090	—	—	—	—
O	0.941	0.937	0.938	0.946	0.997	0.969	0.974	1
ОН	—	—	—	—	0.003	0.031	0.026	—

Примечание. Na, Mn, P, REE, Th, U не обнаружены.

зах и метабазах ксенолитов и окружающих толщ, очевидно, вследствие различия состава протолитов.

*Брусит* в отдельных участках метакимберлитов совместно с антигоритом слагает псевдоморфозы по оливину. Иногда образует небольшие гнезда в агрегатах антигорита. Большею частью замещен доломитом.

*Доломит* метакимберлитов развит в ассоциации с антигоритом (рис. 10а, 10б) и с тремолитом — актинолитом (рис. 11д). Состав доломита варьирует от мало железистого до железистого (анкерита).

*Кальцит* метакимберлитов развит в ассоциации с хлоритами и тремолитом — актино-

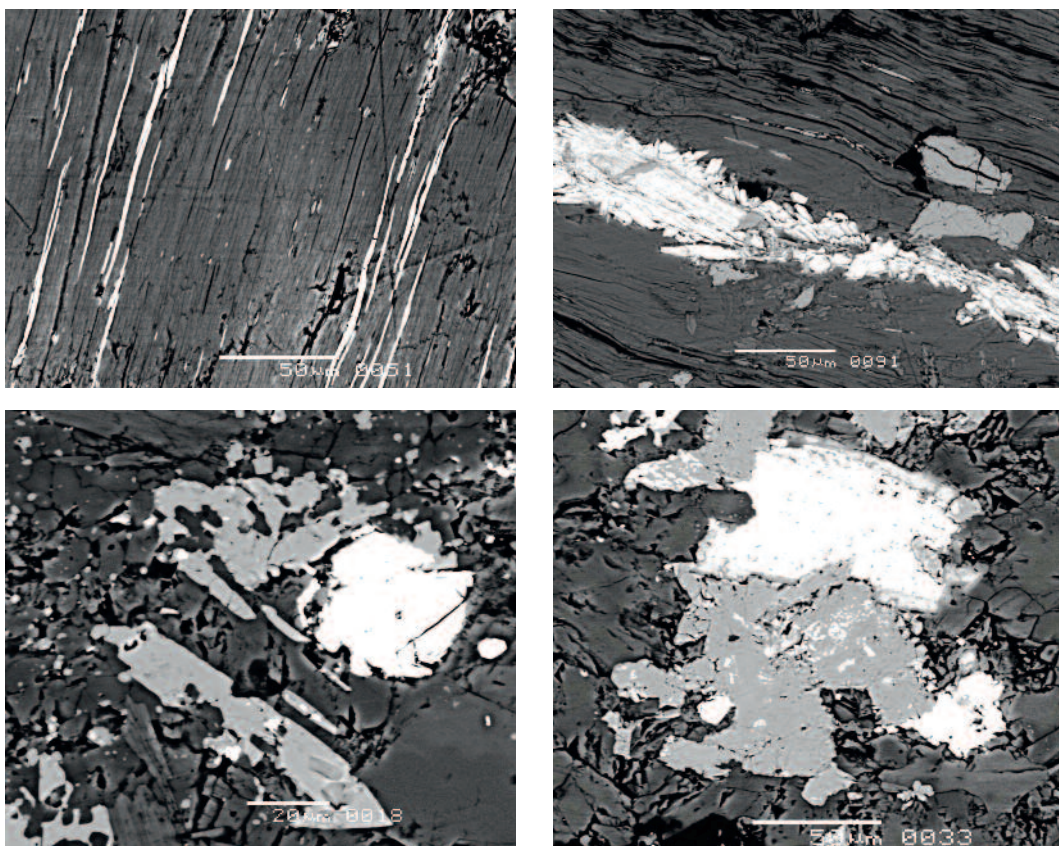


Рис. 12. Алланит метакимберлитов Кимозера: а, b — скопления мелких призматических кристаллов алланита (белые, а — ан. 134–136, b — ан. 137–138) в псевдоморфозе клинохлора с включениями титанита (светло-серый) по флогопиту; с — неправильной формы алланит (белый, ан. 143–145) и титанит (светло-серый, ан. 127) среди тремолита; d — сростание алланита и титанита (ан. 130) в агрегате тремолита, алланит различного состава: справа внизу (белый) обогащен Ce (ан. 142), в центре (бело-серый) обогащен Fe и со стандартным содержанием REE (ан. 140), в кайме вокруг него алланит (светло-серый) обеднен Fe и REE (ан. 141). В отраженных электронах.

литом (рис. 10), реже с антигоритом. Кальцит содержит (мас.%): MgO 0–0.62; FeO 0.28–0.50; MnO 0–0.32. Средний состав:  $\text{Ca}_{0.981}\text{Mg}_{0.008}\text{Fe}_{0.007}\text{Mn}_{0.004}$ .

**Титанит.** Метаморфогенный титанит заместил заметную часть минералов группы ильменита и титаномagnetит, образуя частичные или полные псевдоморфозы (рис. 2а, 2с, 2d, 5). В псевдоморфозах по ильмениту развиты и ферропсевдобрукит  $\text{FeTi}_2\text{O}_5$  и сростания рутила и гематита. Титанит слагает и обособленные кристаллы, и неправильной формы выделения в псевдоморфозах клинохлора по Ti флогопиту (рис. 12b) и в связующей массе метакимберлитов, нередко в сростании с алланитом (рис. 12с, 12d). По составу выделены две группы титанита: с заметным содержанием фтора (ан. 123–126) и не содержащие фтора (ан. 127–130). Те и другие содержат заметное количество Nb, Y, Zr и Fe (табл. 17).

Среднее содержание ниобия в титаните (0.67 мас.%,  $n = 10$ ) выше, чем в исходном ильмените (0.46%,  $n = 56$ ). Это позволяет предположить, что титанит заместил не только ильменит, но и перовскит, наиболее богатый Nb минерал кимберлитов (Друсон, 1983; Melluso *et al.*, 2008).

**Хроммагнетит** слагает каймы замещения и микропрожилки в первичных хромшпинелидах. Его состав (ан. 131, мас.%): FeO 30.59; MnO 0.65;  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  21.66;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  46.51;  $\text{TiO}_2$  0.03; сумма 99.44%; Mg, Ni, Zn, Al, V не обнаружены. Состав минерала в миналах (мол.%):  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  32.8,  $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$  0.1,  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$  65.0,  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  2.1.

**Магнетит** широко развит в агрегатах антигорита, заместивших оливин (рис. 9а, 9b, ан. 132). Размер неправильной формы выделений магнетита — от долей микрона до 100–300 мкм, изредка до 1–2 мм. В метакимберлитах с убогим количеством сульфидов

Таблица 18. Химический состав (мас.%) аллани-та-(Ce) среди псевдоморфоз клинохлора по флогопиту (134–138) и в сростаниях с тремолитом и актинолитом, кальцитом и титанитом (139–142). Метакимберлиты Кимозера

№ ан.	134	135	136	137	138	139	140	141	142
SiO <sub>2</sub>	29.64	30.01	31.17	29.46	28.72	30.22	30.18	30.68	29.39
TiO <sub>2</sub>	0.95	0.50	0.43	0.98	0.75	2.00	1.59	1.45	1.45
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	нпо	нпо	нпо	0.16	нпо	0.30	нпо	нпо	нпо
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.32	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.70	0.93
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.39	14.79	14.94	11.84	12.69	10.61	10.61	13.92	12.90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.55	5.21	4.03	5.85	—	6.63	7.44	4.01	—
FeO	9.29	9.48	11.74	10.45	12.48	11.74	11.46	11.45	12.23
MnO	нпо	0.14	нпо	0.24	следы	0.38	0.34	0.15	нпо
MgO	0.12	0.19	0.37	0.66	следы	1.09	0.90	0.08	нпо
CaO	10.63	10.54	9.73	9.75	8.63	9.15	9.44	10.83	9.77
Na <sub>2</sub> O	0.23	0.15	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.09	8.24	4.74	5.47	4.96	9.35	10.16	7.77	6.77
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.80	14.45	13.92	12.96	26.50	13.32	13.80	13.77	24.05
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.96	1.00	1.58	1.34	нпо	0.76	0.52	1.07	нпо
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.21	2.78	6.35	5.42	3.98	2.56	2.05	3.58	нпо
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	нпо	нпо	0.38	0.60	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	нпо	нпо	нпо	0.29	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	нпо	нпо	0.34	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Сумма	97.18	97.48	99.92	97.47	98.71	98.34	98.49	99.46	97.49
Число атомов в формуле в расчете на 8 катионов									
Si	2.925	2.952	2.999	3.000	2.990	2.998	2.999	2.966	2.999
Ti	0.071	0.037	0.031	0.075	0.058	0.149	0.119	0.105	0.111
Cr	—	—	—	0.013	—	0.023	—	—	—
V	0.025	—	—	—	—	—	—	0.055	0.076
Al	1.674	1.714	1.694	1.421	1.556	1.237	1.242	1.586	1.551
Fe <sup>3+</sup>	0.412	0.384	0.292	0.449	—	0.495	0.556	0.292	—
Fe <sup>2+</sup>	0.766	0.780	0.945	0.890	1.085	0.974	0.952	0.926	1.042
Mn	—	0.012	—	0.021	—	0.032	0.028	0.012	—
Mg	0.018	0.028	0.082	0.100	—	0.166	0.133	0.012	—
Ca	1.124	1.111	1.003	1.064	0.857	0.972	1.005	1.122	1.068
Na	0.044	0.028	—	—	—	—	—	—	—
La	0.295	0.299	0.168	0.206	0.190	0.349	0.372	0.277	0.255
Ce	0.499	0.520	0.490	0.483	1.116	0.484	0.502	0.487	0.898
Pr	0.034	0.036	0.055	0.050	—	0.028	0.019	0.038	—
Nd	0.113	0.097	0.218	0.197	0.148	0.090	0.073	0.124	—
Sm	—	—	0.013	0.021	—	—	—	—	—
Gd	—	—	—	0.010	—	—	—	—	—
Yb	—	—	0.010	—	—	—	—	—	—
ΣREE	0.941	0.952	0.954	0.967	1.454	0.951	0.966	0.926	1.153

Примечание. Sr, P, Th, U, Y, Eu не обнаружены.

магнетит содержит заметное количество никеля. Состав магнетита (ан. 132, мас.%): MgO 0.26; NiO 0.68; FeO 29.54; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 68.09; сумма 98.57%; Mn, Zn, Cr, Al, V, Ti не обнаружены. Состав минерала в миналах (мол.%): FeFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 96.3, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 2.0, MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 1.7. Магнетит лишен Ni в метакимберлитах, богатых сульфидами.

Рутил совместно с гематитом слагает каймы замещения вокруг ильменита и ферропсевдобрукита. Размер призматических зерен рутила и гематита не превышает 10 мкм. Состав рутила (ан. 133, мас.%): TiO<sub>2</sub> 97.67; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.38; V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.69; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.10; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.09; сумма 98.93%; формула: (Ti<sub>0.986</sub>V<sub>0.007</sub>Fe<sub>0.004</sub>Al<sub>0.002</sub>Cr<sub>0.001</sub>)<sub>1</sub>O<sub>2</sub>.

Anatum — гидроксилapatит, реже гидроксилфторапатит — образует сростания с антиторитом (рис. 10d) и иными метаморфическими минералами, содержит следы REE.

Алланиит-(Ce). Алланиит метакимберлитов Кимозера слагает скопления мелких призматических и длиннопризматических кристаллов среди пластин клинохлора (в псевдоморфозах по деформированным вкрапленникам флогопита) (рис. 12a) и среди агрегатов тремолита, актинолита и карбонатов (рис. 12b), а также неправильной формы выделения среди агрегатов тремолита и актинолита, обычно в сростаниях с титанитом (рис. 12c, 12d). Размер скоплений кристаллов алланиита — до 0.7 x 0.06 мм, величина индивидуальных кристаллов не превышает 0.03 мм. Алланиит изредка содержит мелкие включения пентландита. В агрегатах клинохлора алланиит беден Ti и содержит следы Cr и V (ан. 134–138); в сростаниях с титанитом в агрегатах кальцита и тремолит-актинолита содержит 1.5–2 мас.% TiO<sub>2</sub> (ан. 139–142); в сростаниях с титанитом на контакте с феррихромитом содержит 1–2 мас.% TiO<sub>2</sub> и до 9 мас.% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ан. 143–148). Во всех этих трех типах алланиита из лантанидов преобладает Ce, вариации содержания Ce, La, Nd и Pr однотипны (табл. 18–19). Заметные количества Sm, Gd и Yb обнаружены только в алланиите среди псевдоморфоз клинохлора по флогопиту. Специфика кимозерского метаморфогенного алланиита: его кристаллы незональные, значительна изменчивость содержания лантанидов и соотношения Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup> в кристаллах, удаленных друг от друга на первые десятки мкм (рис. 12d); состав лантанидов разнообразен: одни кристаллы селективно Ce, в составе других обилие La, в составе третьих Nd > La (табл. 18–19, рис. 13a). Большая часть алланиита принадлежит ряду алланиит — ферриалланиит (до 30% минала ферриалланиита), меньшая — ряду ал-

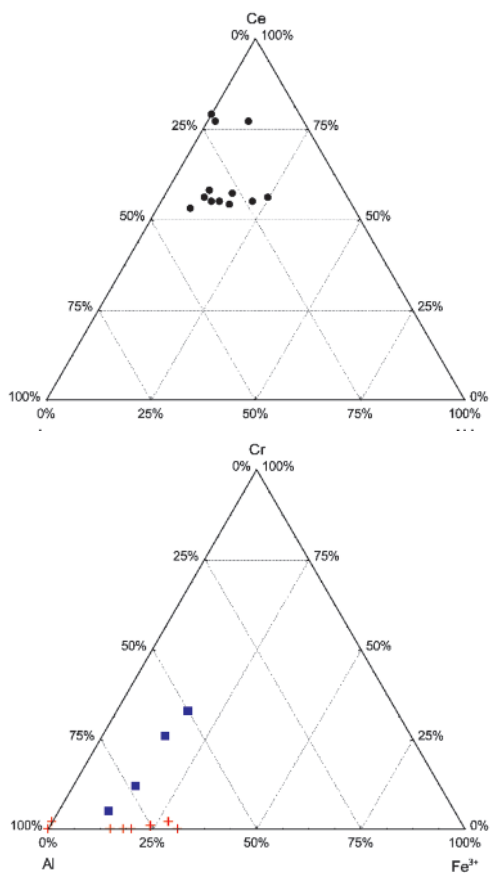


Рис. 13. Алланит метакимберлитов Кимозера: а – состав на диаграмме Ce – La – Nd; б – состав на диаграмме Al – Fe<sup>3+</sup> – Cr. Минералы ряда алланит – ферриалланит – кресттики. Минералы ряда алланит – хромалланит – квадраты.

ланит – хромалланит (рис. 13б). Средний состав алланита-(Ce) в метакимберлитах Кимозера (n = 15), мас. %: SiO<sub>2</sub> 30.05; TiO<sub>2</sub> 1.24; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1.50; V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.36; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 12.50; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 4.27; FeO 10.40; MnO 0.22; MgO 0.43; CaO 9.98; La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 7.47; Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15.61; Pr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.91; Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3.29; сумма 98.40, что отвечает формуле (Ca<sub>1.06</sub>Na<sub>0.03</sub>)<sub>1.09</sub>(Ce<sub>0.57</sub>La<sub>0.27</sub>Nd<sub>0.12</sub>Pr<sub>0.03</sub>)<sub>0.99</sub>(Fe<sup>2+</sup><sub>0.86</sub>Mg<sub>0.06</sub>Mn<sub>0.02</sub>)<sub>0.94</sub>(Al<sub>1.43</sub>Fe<sup>3+</sup><sub>0.32</sub>Cr<sub>0.12</sub>Ti<sub>0.09</sub>V<sub>0.03</sub>)<sub>1.99</sub>[O/OH/(Si<sub>0.97</sub>Al<sub>0.03</sub>)<sub>1</sub>O<sub>4</sub>/Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>]. При более поздних процессах метаморфизма алланит частью был замещен бастнезитом и паризитом или монацитом.

Фторкарбонаты REE – фторгидроксилбастнезит-(Ce), фторгидроксилпаризит-(Ce), фторгидроксилбастнезит-(La), фторгидроксилпаризит-(La), гидроксилфторбастнезит-(Ce) и гидроксилфторпаризит-(Ce) – относительно широко развиты в отдельных участках метакимберлитов Кимозера (рис. 14). Фторкар-

Таблица 19. Химический состав (мас.%) алланита-(Ce) в сростаниях с титанитом на контакте с феррихромитом. Метакимберлиты Кимозера

№ ан.	143	144	145	146	147	148
SiO <sub>2</sub>	30.32	28.61	31.04	29.80	30.95	30.53
TiO <sub>2</sub>	0.99	1.45	1.92	0.88	1.32	2.03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.25	0.37	1.13	2.99	6.90	9.12
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.77	нпо	0.55	0.47	0.84	0.58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.13	11.24	13.08	12.42	10.55	9.35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.75	–	1.62	3.91	4.16	4.88
FeO	10.18	11.57	12.40	9.91	8.49	7.88
MnO	нпо	0.23	0.20	0.14	0.43	0.75
MgO	0.10	1.40	0.50	0.22	0.38	0.45
CaO	10.62	7.65	10.24	10.32	11.24	11.14
Na <sub>2</sub> O	0.17	нпо	0.23	0.16	0.38	0.48
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.75	11.38	8.47	8.43	6.07	5.45
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.75	19.21	14.33	14.02	11.83	11.36
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.24	1.22	0.82	1.06	1.01	1.00
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.13	3.40	2.28	2.53	3.73	3.31
Сумма	99.05	97.73	98.81	97.26	98.32	98.31
Число атомов в формуле в расчете на 8 катионов						
Si	2.925	3.000	3.004	2.965	2.992	2.946
Ti	0.072	0.114	0.139	0.066	0.095	0.147
Cr	0.019	0.031	0.087	0.235	0.527	0.696
V	0.060	–	0.043	0.038	0.065	0.045
Al	1.607	1.388	1.493	1.456	1.202	1.064
Fe <sup>3+</sup>	0.417	–	0.218	0.293	0.303	0.355
Fe <sup>2+</sup>	0.821	1.015	1.004	0.824	0.686	0.636
Mn	–	0.020	0.017	0.012	0.039	0.061
Mg	0.014	0.219	0.072	0.033	0.055	0.064
Ca	1.098	0.807	1.062	1.100	1.165	1.152
Na	0.032	–	0.044	0.031	0.071	0.090
La	0.263	0.441	0.302	0.309	0.217	0.194
Ce	0.486	0.791	0.507	0.510	0.419	0.401
Pr	0.044	0.047	0.029	0.038	0.035	0.035
Nd	0.142	0.127	0.079	0.090	0.129	0.114
ΣREE	0.935	1.353	0.917	0.947	0.800	0.744

Примечание. Sr, P, Th, U, Y, Sm, Eu, Gd, Yb не обнаружены.

бонаты лантанидов обрастают и замещают алланит (рис. 14а). Распространены как отдельные клиновидной формы кристаллы размером до 10–25 мкм и их сростания размером до 50–100 мкм, так и неправильной формы (несколько диффузные) отдельные кристаллы, а чаще – их сростания размером до 50 мкм. Обычно это агрегатные выделения, которые слагают гидроксидоминантные бастнезит-(Ce) или бастнезит-(La) и окружающий его паризит-(Ce) или паризит-(La)



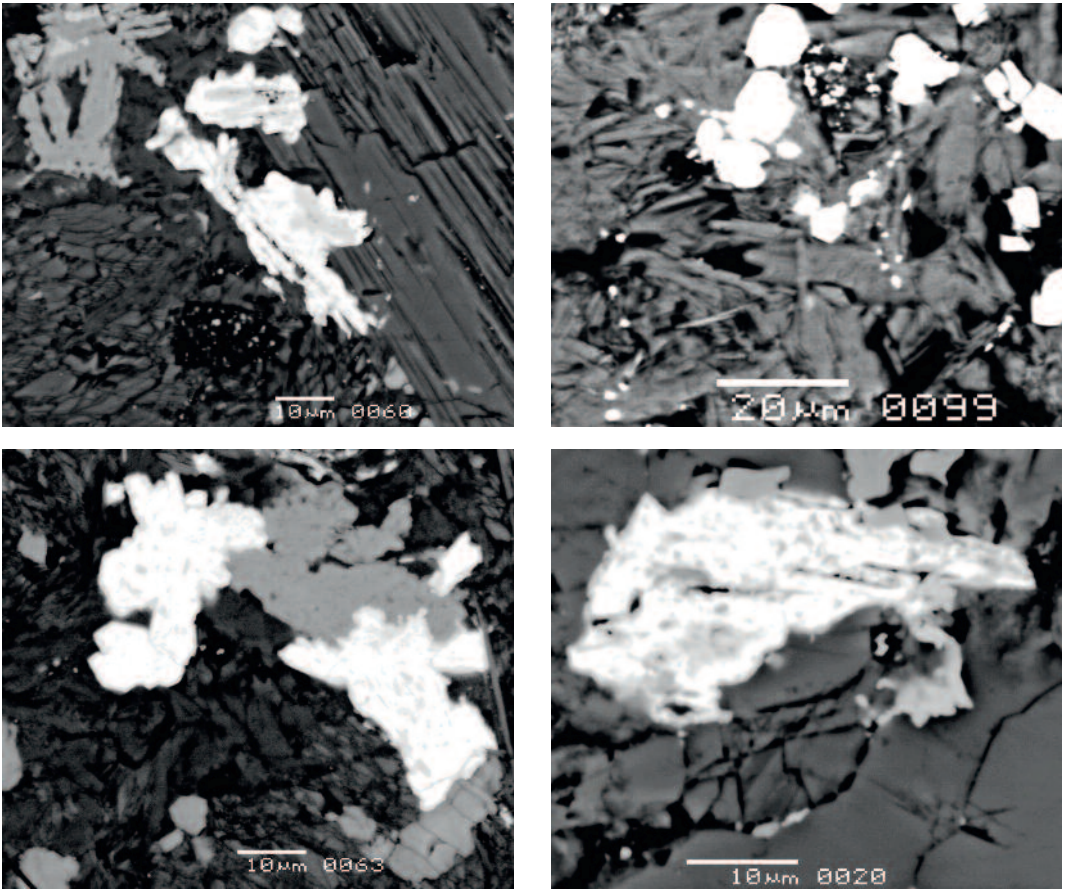


Рис. 14. Бастнезит и паризит метакимберлитов Кимозера: а – каймы замещения гидроксилбастнезита-(Ce) (белый, ан. 149) вокруг алланита-(Ce) (серый, ан. 139), темно-серый – титанит (ан. 123) среди агрегатов тремолита; б – группа кристаллов гидроксилбастнезита-(Ce) (белый, ан. 153) и титанита (светло-серый, ан. 125) среди агрегатов тремолита; в – кристалл гидроксилбастнезита-(La) (верхний белый, ан. 156) с каймой гидроксилпаризита-(La) (светло-серый) и кристалл гидроксилбастнезита-(Ce) (нижний белый, ан. 155) с каймой гидроксилпаризита-(Ce) (светло-серый) в агрегате тремолита и актинолита; д – срастание бастнезита-(Ce) (белый, ан. 157–158) и паризита-(Ce) (светло-серый, ан. 159) с титанитом (ан. 123). В отраженных электронах.

(рис. 14с); разновидности с преобладанием лантана значительно более редкие. Фтордоминантные бастнезит-(Ce) и паризит-(Ce) образуют аналогичные по форме срастания (рис. 14д). Менее распространены мономинеральные выделения – мелкие кристаллы гидроксилбастнезита-(Ce) (рис. 14б). Гидроксилдоминантный бастнезит содержит (мас.%) 2.5–3.5 F, 0.6–1.2 Th, 1.7–2.4 CaO, 0.4–2.2 FeO, 0.2–0.6 MgO (ан. 149–156). В его составе  $Ce \approx La > Nd \gg Pr \gg Gd$ . Для гидроксилдоминантного бастнезита отношение числа анализированных кристаллов с преобладанием церия к числу кристаллов с преобладанием лантана 7:1 (табл. 20), возможно, соответствует их распространенности. Фтордоминантный бастнезит содержит (мас.%) 5–5.2 F, 1 Th, 4.2–4.8 CaO, 2–3 FeO, 0.2 MgO и NiO,

следы хлора (ан. 157–158). Его состав существенно цериевый,  $Ce > La \gg Nd \gg Pr$  (табл. 21). Фтордоминантный паризит содержит (мас.%) 5.2 F, 0.4 Th, 1 FeO, 0.2 MgO, 0.1 NiO (ан. 159). Его состав существенно цериевый,  $Ce > La \gg Nd \gg Pr$  (табл. 21). Фторкарбонаты наиболее обогащены La из всех метаморфогенных минералов, содержащих лантаниды. Интересно наличие в их составе никеля.

Монацит-(Ce) обычно развит в антигортитовых метакимберлитах (рис. 15), редок в тремолитовых. Возник за счет алланита (рис. 15а). Распространены сингенетичные срастания монацита с магнетитом (рис. 15б) и с антигортитом (рис. 15с, 15д). Размер кристаллов монацита от долей до 35 мкм. В составе монацита  $Ce > La \gg Nd \gg Pr \gg Eu = Gd$  (табл. 22). Минерал содержит 0.3–0.8 мас.%

**Таблица 20. Химический состав (мас.%) гидроксилбастнезита-(Ce) (149–155) и гидроксилбастнезита-(La) (156) метакимберлитов Кимозера**

№ ан.	149	150	151	152	153	154	155	156
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32.67	30.17	30.94	28.94	28.45	29.68	28.51	27.73
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.23	23.86	24.70	26.45	27.08	27.53	27.83	28.27
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.45	2.70	2.78	2.50	2.64	2.59	2.74	2.68
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.26	7.86	6.92	6.82	7.09	7.23	6.65	7.18
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	нпо	нпо	0.30	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
ThO <sub>2</sub>	0.62	0.59	0.64	1.12	0.61	0.69	0.99	1.23
CaO	1.92	2.12	1.70	2.25	1.94	2.05	2.41	1.99
MgO	0.28	0.29	0.19	0.25	0.33	0.33	0.20	0.63
FeO	1.14	2.23	1.12	0.56	0.97	0.35	0.39	1.00
MnO	0.23	нпо	0.16	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
F	2.50	2.56	2.49	2.74	2.89	2.67	2.75	3.25
Сумма	72.37	72.38	71.94	71.63	72.00	73.12	72.47	73.96
Число атомов в формуле в расчете на один атом металлов								
Ce	0.434	0.391	0.415	0.390	0.382	0.394	0.383	0.360
La	0.310	0.311	0.333	0.359	0.366	0.367	0.376	0.368
Nd	0.094	0.100	0.091	0.090	0.093	0.094	0.088	0.091
Pr	0.033	0.035	0.037	0.034	0.035	0.034	0.037	0.035
Gd	—	—	0.004	—	—	—	—	—
Th	0.005	0.005	0.005	0.009	0.005	0.006	0.018	0.012
Ca	0.077	0.079	0.066	0.088	0.075	0.079	0.093	0.075
Mg	0.014	0.014	0.010	0.012	0.013	0.016	0.010	0.030
Fe <sup>2+</sup>	0.026	0.065	0.034	0.017	0.029	0.011	0.004	0.029
Mn	0.007	—	0.005	—	—	—	—	—
CO <sub>3</sub>	1	1	1	1	1	1	1	1
ОН	0.603	0.584	0.611	0.545	0.558	0.458	0.590	0.549
F	0.278	0.277	0.279	0.308	0.324	0.295	0.308	0.348

Примечание. Количество ОН рассчитано по балансу зарядов; U, Sm и иные лантаниды не обнаружены.

SiO<sub>2</sub>, беден торием, изредка содержит до 0.3 мас.% ThO<sub>2</sub>. Очевидная причина почти полного отсутствия тория в монаците, минерале-концентраторе тория, — наличие сингенетического торита. Весьма низкое содержание Y — свидетельство невысокой, не выше 300°C, температуры образования монацита, судя по данным Gratz, Heinrich, 1997. Эта оценка соответствует тому, что описанный монацит — один из поздних минералов в метакимберлитах прениит-пумпеллиитовой фации.

Циркон метаморфогенный относительно широко развит в отдельных участках метакимберлитов Кимозера. Он отличен от циркона кимберлитов по морфологии: это цемент брекчированных кристаллов магматического бадделеита (рис. 16а) и каймы замещения вокруг них, «корявые», или «диффузные», кристаллы (рис. 16б), и по составу: ми-

**Таблица 21. Химический состав бастнезита-(Ce) (157–158) и паризита-(Ce) (159) метакимберлитов Кимозера**

№ ан.	Компоненты, мас.%			Число атомов в формуле			
	157	158	159	№ ан.	157	158	159
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32.96	33.31	28.82	Ce	0.393	0.400	1.082
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.56	20.51	16.41	La	0.247	0.248	0.621
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.42	2.66	2.31	Pr	0.029	0.032	0.086
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.09	6.12	5.85	Nd	0.071	0.072	0.214
ThO <sub>2</sub>	1.01	1.14	0.40	Th	0.007	0.009	0.010
CaO	4.25	4.78	7.67	Ca	0.148	0.168	0.844
FeO	3.22	2.09	1.18	Fe	0.088	0.057	0.101
MgO	0.28	0.23	0.21	Mg	0.014	0.011	0.033
NiO	0.16	0.16	0.11	Ni	0.004	0.004	0.009
F	4.96	5.18	5.17	F	0.511	0.537	1.676
Cl	0.06	нпо	нпо	Cl	0.003	—	—
Сумма	75.91	76.18	68.13	ОН	0.242	0.235	0.301
				(O)	—	—	(0.023)
Сумма	73.82	74.00	65.95	CO <sub>3</sub>	1	1	3
— O =							
F <sub>2</sub> + Cl <sub>2</sub>							

Примечание. Mn, Na, Y, Nb, U, Sm и иные лантаниды не обнаружены.

**Таблица 22. Химический состав монацита-(Ce) метакимберлитов Кимозера**

№ ан.	Компоненты, мас.%				Число атомов в формуле в расчете на два атома металлов				
	160	161	162	163	№ ан.	160	161	162	163
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37.03	35.14	34.11	34.40	Ce	0.533	0.505	0.491	0.489
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.51	27.64	28.12	27,75	La	0.312	0.401	0.406	0.397
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.07	0.98	1.83	1.89	Pr	0.015	0.014	0.026	0.027
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.69	4.42	4.88	5.28	Nd	0.136	0.062	0.068	0.073
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	нпо	0.34	нпо	нпо	Eu	—	0.004	—	—
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	нпо	нпо	нпо	0.32	Gd	—	—	—	0.004
ThO <sub>2</sub>	нпо	0.29	нпо	нпо	Th	—	0.003	—	0.006
FeO	0.13	0.17	0.23	—	Fe <sup>2+</sup>	0.004	0.005	0.007	—
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	0.32	Fe <sup>3+</sup>	—	—	—	0.010
CaO	0.07	0.08	нпо	0.08	Ca	0.003	0.003	—	0.003
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	29.65	29.24	29.51	29.42	P	0.986	0.972	0.980	0.966
SiO <sub>2</sub>	0.27	0.79	0.55	0.81	Si	0.011	0.031	0.022	0.031
Сумма	99.42	99.09	99.23	100.27	O	4	4	4	4

Примечание. Mn, Na, Y, Ti, Nb, U, лантаниды не обнаружены.

нерал беден Hf, Th, Y, Ti. Состав циркона «диффузного» кристалла (рис. 16б, ан. 164, мас.%): ZrO<sub>2</sub> 63.94; HfO<sub>2</sub> 0.64; TiO<sub>2</sub> 0.13; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.64; Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.18; Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.35; Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.28; Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.37; SiO<sub>2</sub> 32.21; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.07; сумма 98.81; P, Ti, Th, U, Y, La, Pr не обнаружены; формула цир-

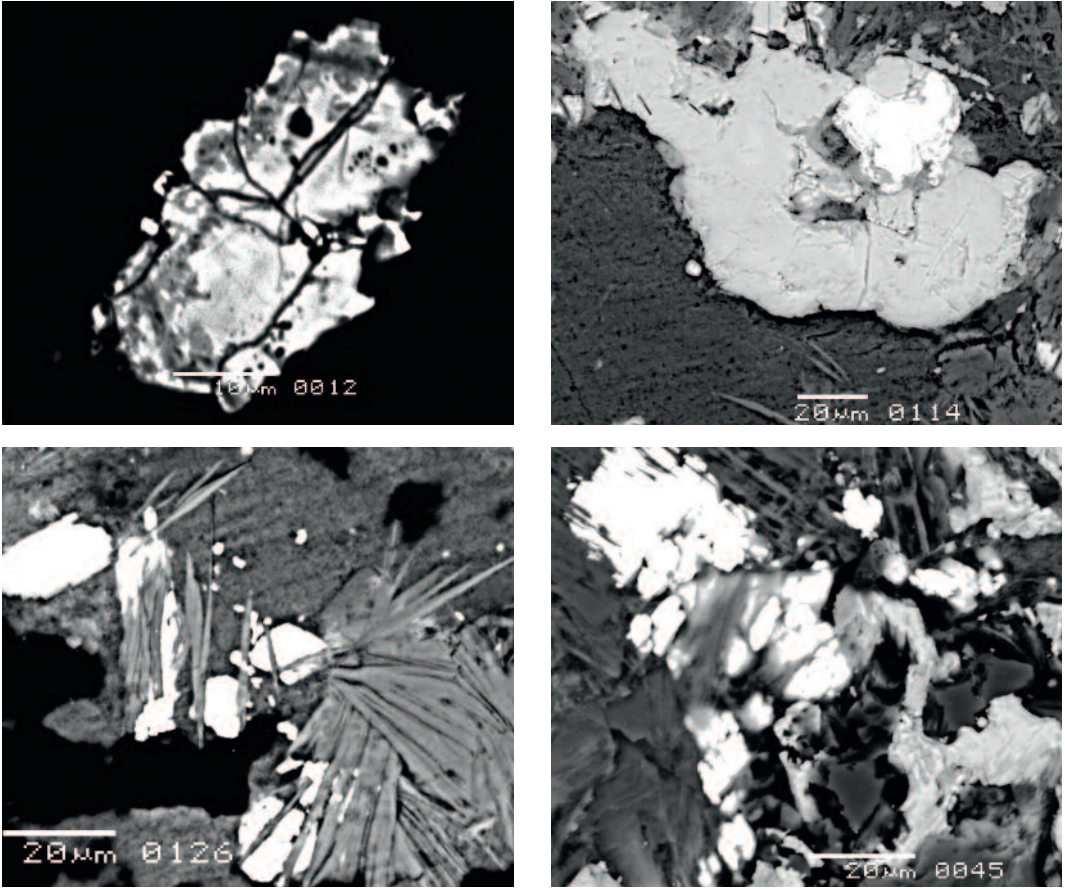


Рис. 15. Монацит метакимберлитов Кимозера: а – мелкие выделения монацита (ярко-белый) по периферии частично разложившегося алангита; б – сростание метаморфогенных монацита (белый, ан. 160), магнетита (светло-серый) и пластинчатого антигорита; с – сростание монацита (белый, ан. 162), апатита (светло-серый) и пластинчатого антигорита; д – сростание монацита-(Ce) (белый, ан. 163), титанита (серый, ан. 126), антигорита и доломита. В отраженных электронах.

кона:  $(Zr_{0.965}Hf_{0.006}Fe^{3+}_{0.014}Gd_{0.004}Nd_{0.003}Ti_{0.003}Sm_{0.003}Ce_{0.002})_1[(Si_{0.998}Al_{0.002})_1(O_{3.972}OH_{0.028})_4]$ , содержание гидроксила рассчитано по балансу зарядов.

*Baggelleum* метаморфогенный относительно широко развит в отдельных участках метакимберлитов Кимозера. Обычно это мелкие кристаллы и неправильной формы выделения в сростании с метаморфогенными магнетитом, монацитом и титанитом (рис. 16с) или с цирконом и преобладающим титанитом (рис. 16д). Данный бадделеит беден Hf; Th, U, REE в его составе не обнаружены (ан. 165, мас.%):  $ZrO_2$  96.05;  $HfO_2$  1.44;  $TiO_2$  0.70;  $Fe_2O_3$  0.94; сумма 99.13; формула:  $(Zr_{0.966}Hf_{0.008}Fe^{3+}_{0.015}Ti_{0.011})_1(O_{1.985}OH_{0.015})_2$ , содержание гидроксила рассчитано по балансу зарядов. Ранее авторами (Spiridonov, Putintseva, 2015) высказано предположение, что сростания метаморфогенных бадделеита, циркона и титанита

могли возникнуть за счет магматического кальцитрита, характерного минерала Zr кальцитовых карбонатов и некоторых богатых кальцитом кимберлитов (Jones, Wylley, 1985). Вероятная реакция образования ассоциации бадделеита, циркона и титанита за счет кальцитрита:  $Ca_3Zr_5Ti_3O_{16} + 5SiO_2$  (раствор)  $\rightarrow 3CaTi[O/SiO_4] + 3ZrO_2 + 2Zr[SiO_4]$ .

Избыточный кремнезем в растворах мог появиться при замещении флогопитом каолинхлором и при иных метаморфических реакциях.

*Torint* слагает мелкие, до 15 мкм, кристаллы, нередко это двойники, в агрегатах антигорита или тремолита недалеко от выделений монацита. Состав торита (ан. 166, мас.%):  $ThO_2$  53.26;  $UO_2$  2.04;  $ZrO_2$  8.57;  $TiO_2$  0.89;  $Fe_2O_3$  2.99;  $Ce_2O_3$  2.61;  $Pr_2O_3$  0.46;  $Nd_2O_3$  3.51;  $Sm_2O_3$  0.65;  $Gd_2O_3$  0.86;  $CaO$  0.86;  $SiO_2$  18.27;  $P_2O_5$  3.93;  $Al_2O_3$  1.27; сумма 99.57; Y, Nb, La, Eu, Yb, Hf не обнаружены; формула:  $(Th_{0.523}Zr_{0.180}Fe^{3+}_{0.092}$



$\text{Nd}_{0.054}\text{Ce}_{0.041}\text{Ca}_{0.040}\text{Ti}_{0.029}\text{U}_{0.020}\text{Sm}_{0.010}\text{Pr}_{0.007}\text{Gd}_{0.004}1$   
 $[(\text{Si}_{0.787}\text{P}_{0.144}\text{Al}_{0.065}\text{Fe}^{3+}_{0.005})_1(\text{O}_{3.790}\text{OH}_{0.210})_4]$ ; распределение лантанидов специфическое:  $\text{Nd} > \text{Ce} \gg \text{Sm} > \text{Pr} > \text{Gd}$ . По составу описанный торит является ограниченным твердым раствором торит — циркон (монацит). Это единственный минерал метакимберлитов Кимозера с заметным содержанием урана.

*Ниобозинит* (*Ce*) слагает редкие мелкие, до 10 мкм, кристаллы в агрегатах антигорита или тремолита и актинолита. Состав ниобозинита (ан. 167, мас. %):  $\text{La}_2\text{O}_3$  1.44;  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  20.96;  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  1.01;  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  6.26;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  2.91;  $\text{CaO}$  7.11;  $\text{TiO}_2$  19.75;  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  37.21;  $\text{ThO}_2$  2.83; сумма 99.48; Y, Eu, Yb, Hf не обнаружены; формула:  $(\text{Ce}_{0.435}\text{Ca}_{0.432}\text{Nd}_{0.127}\text{La}_{0.030}\text{Pr}_{0.021})_{1.045}(\text{Nb}_{0.953}\text{Ti}_{0.842}\text{Fe}^{3+}_{0.124}\text{Th}_{0.036})_{1.955}(\text{O}_{5.352}\text{OH}_{0.648})_6$ ; распределение лантанидов специфическое:  $\text{Ce} \gg \text{Nd} \gg \text{La} > \text{Pr}$ . По составу ниобозинит селективно цериевый, высокотитанистый, богат кальцием.

*Биксбит* слагает небольшие выделения в сростаниях с хлоритом и титанитом около гнезд и прожилков кальцита. Состав биксбита (ан. 168, мас. %):  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  48.10;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  50.93;  $\text{Ni}_2\text{O}_3$  2.87;  $\text{MgO}$  0.65;  $\text{TiO}_2$  1.21; сумма 100.92; формула:  $(\text{Mn}_{0.955}\text{Fe}_{0.946}\text{Ni}_{0.051}\text{Mg}_{0.024}\text{Ti}_{0.024})_2\text{O}_3$ .

*Пирротин*. Минералы группы пирротина относительно широко распространены в метакимберлитах, слагающих эндоконтактовую часть залежи. Форма их выделений — от мелкой сыпи до скелетных (антискелетных) кристаллов с поперечником до 3 мм. Состав бедных никелем и кобальтом минералов группы пирротина варьирует от обогащенных железом, близких к троилиту, до обогащенных серой, близких к стандартному моноклинному пирротину  $\text{Fe}_7\text{S}_8$ . Обычно пирротин в значительной степени замещен пиритом, в приповерхностных условиях полностью замещен гетитом и выщелочен.

*Пентландит* обычно образует включения в разнообразных метаморфических минералах, в том числе в клинохлоре и аланите. По составу это никелистый пентландит (ан. 169 и 170, мас. %): Ni 39.57 и 37.78; Fe 23.19 и 26.39; Co 3.50 и 2.03; S 32.93 и 32.81; сумма 99.19 и 99.01; формулы:  $(\text{Ni}_{5.27}\text{Fe}_{3.25}\text{Co}_{0.46})_{8.98}\text{S}_{8.02}$  и  $(\text{Ni}_{5.03}\text{Fe}_{3.70}\text{Co}_{0.27})_9\text{S}_8$ .

*Полидимит* и более редкий *зигенит* — тиошинели существенно никелевого состава — слагают мелкие рассеянные выделения. Состав полидимита (ан. 171 и 172, мас. %): Ni 52.54 и 49.52; Fe 3.48 и 4.55; Co 1.54 и 3.07; S 42.05 и 41.78; суммы 99.61 и 98.92; формулы:  $(\text{Co}_{0.08}\text{Fe}_{0.19}\text{Ni}_{0.73})_1\text{Ni}_2\text{S}_4$  и  $(\text{Co}_{0.16}\text{Fe}_{0.25}\text{Ni}_{0.59})_1\text{Ni}_2\text{S}_4$ . Состав Co зигенита (ан. 173, мас. %): Ni 31.65; Co 25.04; Fe 0.91; Cu следы; S 41.92; сумма 99.52; формула:  $(\text{Fe}_{0.05}\text{Co}_{0.95})_1(\text{Co}_{0.35}\text{Ni}_{1.65})_2\text{S}_4$ .

*Миллерит* реликтовый, слагает мелкие неправильной формы включения в полидимите. Его состав (ан. 174, мас. %): Ni 57.69; Co 5.79; Fe 0.11; Cu 0.06; S 35.01; сумма 99.16; формула:  $(\text{Ni}_{0.90}\text{Co}_{0.09}\text{Fe}_{0.01})_1\text{S}$ . Возможно, это был один из распространенных минералов ранних лизардитовых метакимберлитов.

Поздние образования — мелкие метасомагматические вроски, микро- и макропрожилки, гнезда — слагают серпофит (лизардит), кальцит, *пирит* состава  $(\text{Fe}_{0.990}\text{Ni}_{0.008}\text{Co}_{0.003}\text{Cu}_{0.002})_{1.003}\text{S}_{1.997}$ , *бравойт*, *ваэсит*, *кобальтпентландит*, *годевскит*, *миллерит* со средним составом  $(\text{Ni}_{0.97}\text{Co}_{0.02}\text{Fe}_{0.01})_1\text{S}$  ( $n = 3$ ), *ангит* состава  $(\text{Ca}_{0.99}\text{Sr}_{0.01})_1[\text{SO}_4]$ , барит состава  $(\text{Ba}_{0.93}\text{Sr}_{0.05}\text{Ca}_{0.02})_1[\text{SO}_4]$ , кварц, калишпат, гематит. Состав кимозерского бравойта (ан. 175, мас. %): Ni 26.04; Fe 12.81; Co 1.43; S 51.20; сумма 98.48; формула:  $(\text{Ni}_{0.55}\text{Fe}_{0.44}\text{Co}_{0.03})_{1.02}\text{S}_{1.98}$ . Состав кимозерского ваэсита (ан. 176 и 177, мас. %): Ni 42.23 и 47.06; Fe 0.72 и 0.09; Co 4.42 и 0.67; S 51.69 и 52.08; сумма 99.06 и 99.90; формулы:  $(\text{Ni}_{0.89}\text{Co}_{0.09}\text{Fe}_{0.02})_1\text{S}_2$  и  $(\text{Ni}_{0.99}\text{Co}_{0.01})_1\text{S}_2$ . Состав железистого кобальтпентландита (ан. 178, мас. %): Ni 17.38; Fe 35.58; Co 13.27; S 33.01; сумма 99.24; формула:  $(\text{Ni}_{2.30}\text{Fe}_{4.95}\text{Co}_{1.75})_9\text{S}_8$ . Состав кимозерского годевскита (ан. 179, мас. %): Ni 66.38; Fe 0.14; Co 0.30; S 32.60; сумма 99.42; формула:  $(\text{Ni}_{8.92}\text{Co}_{0.04}\text{Fe}_{0.02})_{8.98}\text{S}_{8.02}$ , близкая к теоретической  $\text{Ni}_9\text{S}_8$ . Годевскит — типичный минерал ультраосновных пород, метаморфизованных в условиях цеолитовой фации (Спиридонов и др., 1997).

## Итоги исследования

**Кимберлиты Кимозера.** Изученные минералы — индикаторы кимберлитов Кимозера хромшпинелиды и ильменит — в целом соответствуют мировым типам, при этом обладая рядом особенностей. Установлено, что в кимберлитах первой фазы хромшпинелиды значительно более глиноземистые, со сложной историей формирования, в кимберлитах второй фазы — значительно более железистые, то есть это продукты более продвинутой дифференциации, более низкотемпературные и более низкобарные. Эволюция состава хромшпинелидов II — III генераций в кимберлитах первой фазы и хромшпинелидов I — III генераций в кимберлитах второй фазы отвечает стандартному тренду в ультраосновных и основных магматических породах — от магнезиохромита и хромита к феррихромиту и хроммагнетиту с накоплением Fe и Ti. Особенность хромшпинелидов Кимозера — существенное накопление Zn и Mn в ходе эволюции, что свидетельствует о повышенной

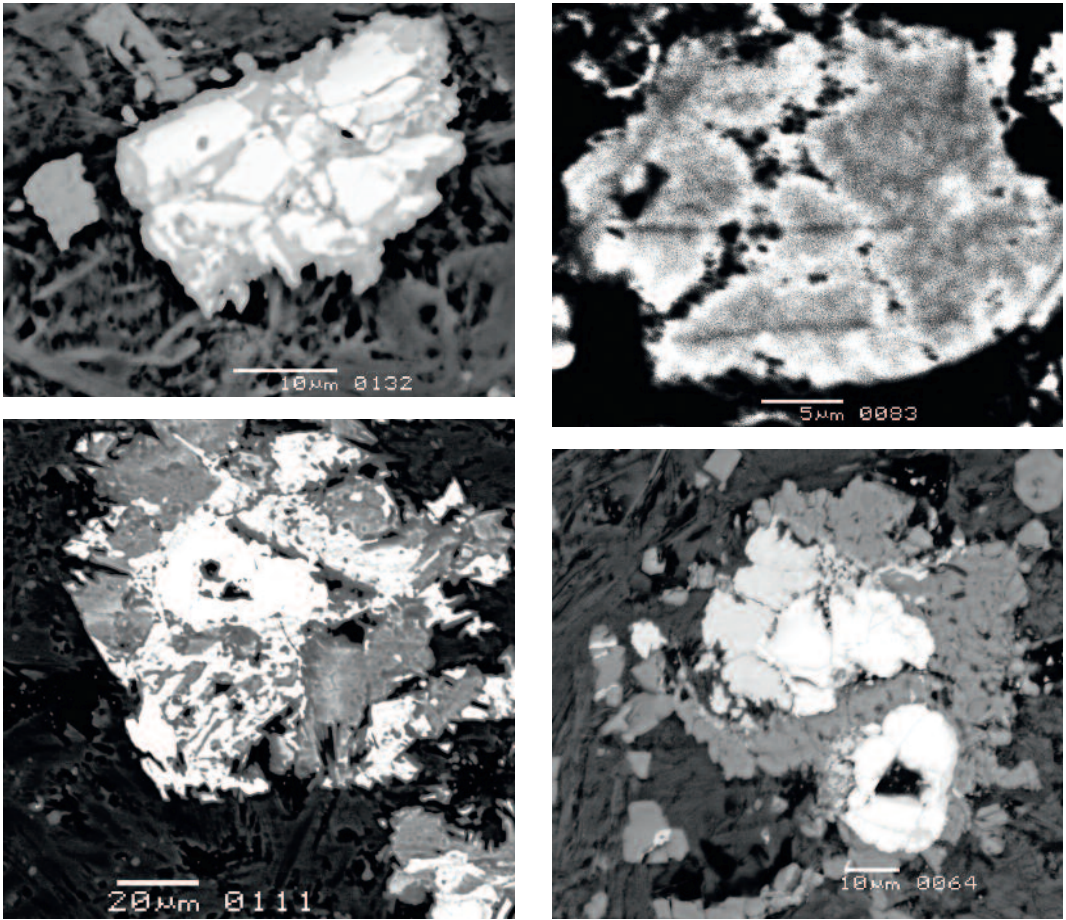


Рис. 16. Циркон и бадделейт метакимберлитов Кимозера: а – метаморфогенный циркон (серый) цементирует и замещает брекчированный кристалл магматического бадделейта (белый, ан. 87–89) среди антигорита; б – «диффузный» циркон (ан. 164); в – срастание небольших кристаллов бадделейта (ярко-белые внизу слева) в агрегате магнетита, монацита (белый в центре) и титанита (светло-серый) среди антигорита; д – срастание метаморфогенных бадделейта (белый, ан. 166) и циркона (светло-серый) с титанитом (серый, ан. 124) в матрице тремолита и актинолита. В отраженных электронах.

щелочности материнских расплавов. При этом в кимберлитах Кимозера мало крайне высокохромистых хромшпинелидов, но они содержат массу кристаллов высокохромистых шпинелидов, в том числе с небольшой, до 4%, примесью минала кандилита. Вероятно, данные характеристики коррелируют с невысокой степенью алмазности кимберлитов Кимозера.

Овальной формы Mn пикроильменит и Fe гейкит вкрапленников в кимберлитах обеих фаз Кимозера сходны по морфологии и по составу и близки к мегакристам стандартных алмазных кимберлитов. Небольшое количество такого типа минералов в кимберлитах Кимозера соответствует невысокой степени их алмазности. Распространенные

в связующей массе кимберлитов II фазы ильменит, манганийльменит и пирофанит вдвое богаче Nb и существенно богаче Mn, чем ильменит до манганийльменита связующей массы кимберлитов I фазы. По содержанию ниобия в ильмените (до 3.5% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) кимберлитовые породы Кимозера не отличаются от кимберлитов мира. Общая особенность состава минералов группы ильменита кимберлитов Кимозера – значительная обогащенность Mn. Можно предположить, что кимберлиты, в которых все типы минералов группы ильменита обогащены марганцем, возникли при участии карбонатитовых расплавов повышенной щелочности.

**Метакимберлиты Кимозера.** Метаморфизованные кимберлиты Кимозера – петро-

тип метакимберлитов пренит-пумпеллиитовой фации. Их слагают серпентины (антигорит, реликтовый лизардит), тремолит, актинолит, кальцит, доломит, клинохлор, магнетит, титанит, корренсит, тальк, брусит, ферропсевдобрукит, рутил, гематит, алланит, бастнезит, паризит, монацит, апатит, циркон, бадделейт, пентландит, пирротин, полидимит, зигенит, торит, биксбит. Минералов Sr в них нет. Минералы REE метакимберлитов — алланит-(Ce), гидроксилбастнезит-(Ce), гидроксилбастнезит-(La), гидроксилпаризит-(Ce), гидроксилпаризит-(La), бастнезит-(Ce), паризит-(Ce), монацит-(Ce), ниобозшинит-(Ce) — наследовали Ce, Ce-La и Ce-La-Nd специфику магматических кальцита, перовскита и апатита кимберлитов. Границы кристаллов минералов REE и титанита, антигорита, тремолита — индукционные поверхности совместного роста. Наиболее распространен алланит-(Ce). Его кристаллы незональны, со значительной изменчивостью содержания REE и соотношения  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  в кристаллах, удаленных друг от друга на первые десятки микрон. Характерно разнообразие состава: одни кристаллы селективно Ce, в составе других обилеи La, в третьих Nd > La. Алланит в агрегатах клинохлора беден Ti, Sr и V; в сростаниях с титанитом содержит 1–2 мас.%  $TiO_2$ , на контакте с феррихромитом — до 9 мас.%  $Cr_2O_3$ . Большая часть алланита Кимозера принадлежит ряду алланит — ферриалланит. При последующих процессах метаморфизма алланит замещали бастнезит и паризит или монацит. Распространены сростания гидроксилбастнезита-(Ce) и гидроксилпаризита-(Ce), гидроксилбастнезита-(La) и гидроксилпаризита-(La), менее — бастнезита-(Ce) и паризита-(Ce). Монацит-(Ce) беден Nd и обогащен La, крайне беден Th, поскольку сосуществует с торитом. Торит метакимберлитов обогащен цирконием (9%  $ZrO_2$ ), лантанидами (до 9% суммы REE, преобладают Nd и Ce), содержит 2% U. Ниобозшинит метакимберлитов селективно цериевый, содержит (мас.%) 37  $Nb_2O_5$ , 20  $TiO_2$ , 21  $Ce_2O_3$ , 7 CaO, 6  $Nd_2O_3$ , по 3  $ThO_2$  и  $Fe_2O_3$ . Метакимберлиты Кимозера содержат выделения незональных циркона и бадделейта неправильной формы, до «диффузных». Эти минералы лишены Nb, Th, Y; циркон беден гафнием, содержит 0.5–0.7%  $HfO_2$ . Сростания метаморфогенных бадделейта, циркона и титанита, возможно, возникли за счет магматического кальциртитита, вероятная реакция:  $Ca_3Zr_5Ti_3O_{16} + 5SiO_2$  (раствор)  $\rightarrow 3CaTi[O/SiO_4] + 3ZrO_2 + 2Zr[SiO_4]$ . Избыточный кремнезем мог появиться при замещении флогопита клинохлором. В метакимберлитах

присутствуют биксбиты  $Mn^{3+}Fe^{3+}O_3$ . Выделяется новый генетический тип минерализации — REE-Zr-Nb-Th минерализация в метакимберлитах ППФ. В эндоконтактной части тела кимберлитов у границ с шунгитоносной толщей метакимберлиты содержат графитоид и сульфиды Fe-Ni-Co, немного магнетита. Сульфиды — пирротин (от высокожелезистого до моноклинного  $Fe_9S_8$ ), пирит, никелистый пентландит  $(Ni_{5.53}Fe_{3.33}Co_{0.30.5})_9S_8$ , полидимит  $(Co_{0.1}Fe_{0.2}Ni_{0.7})_1Ni_2S_4$  с реликтами миллерита  $(Ni_{0.9}Co_{0.1})_1S$ , кобальтистый зигенит  $(Fe_{0.1}Co_{0.9})_1(Co_{0.4}Ni_{1.6})_2S_4$ .

При процессах метаморфизма произошла мобилизация REE и возникли собственные минералы лантанидов. Поэтому Sm-Nd датировка метакимберлитов пренит-пумпеллиитовой фации отражает время их метаморфизма, а не время внедрения кимберлитов.

Итак, для метакимберлитов пренит-пумпеллиитовой фации типоморфны антигорит, тремолит, актинолит, новообразованные алланит, бастнезит, паризит, монацит, циркон, бадделейт, ниобозшинит, торит; минералы стронция отсутствуют. Для метакимберлитов цеолитовой фации типоморфны лизардит, гётит, минералы группы гидроталькита, целестин, стронцианит; новообразованных амфиболов и минералов REE, Zr, Nb, Th в них нет.

Авторы благодарны Н.Н. Коротяевой (МГУ), И.М. Куликовой и О.А. Набелкину (ИМГРЭ), Е.Л. Грузовой (ВСЕГЕИ) за высокое качество фотографий и анализов, выполненных с помощью электронного микронзонда.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-05-00241).

## Литература

- Артёмов В.Р. Еще раз о лизардите в дунитах, перидотитах и серпентинитах // Зап. ВМО. **1973**. Ч. 102. Вып. 1. С. 115–121.
- Афанасьева З.А. Типизация и особенности состава кимозерских алмазоносных кимберлитов Онежского прогиба Карелии. Автореф. канд. дисс. СПбГУ. **2009**. 21 с.
- Багдасаров Э.А. Микрокристаллические хромшпинелиды кимберлитов и щелочно-ультраосновных пород // Докл. АН СССР. **1988**. Т. 301. С. 427–430.
- Багдасаров Э.А., Илупин И.П. Сосуществующие ильмениты и титаномагнетиты связующей массы кимберлитов // Докл. АН СССР. **1986**. Т. 290. С. 945–948.
- Багдасаров Э.А., Илупин И.П. Эволюция составов микро- и макрокристаллических



- кимберлитовых ильменитов // Докл. АН СССР. **1988**. Т. 302. С. 1201–1203.
- Благулькина В.А., Губанов В.А., Уманец В.Н., Футергендлер С.И.* Микрористаллы ильменита из кимберлитов Лучаканского района // Минералы и парагенезисы минералов эндогенных месторождений. Л.: Наука. **1975**. С. 11–18.
- Варлаков А.С.* Серпентинизация гипербазитов и формирование месторождений хризотил-асбеста // Зап. ВМО. **2000**. Ч. 129. Вып. 1. С. 3–15.
- Войтковский Ю.Б., Пограецкий А.В., Генералов О.Н. и др.* Ильменит в ксенолитах и основной массе кимберлитов трубок Мир и Сытыкапская // Докл. АН СССР. **1991**. Т. 317. С. 1215–1219.
- Гаранин В.К., Кургявцева Г.П., Лапин А.В.* Типоморфные особенности ильменитов из кимберлитов и массивов щелочных ультраосновных пород и карбонатитов // Геология рудных месторождений. **1978**. №4. С. 3–32.
- Геншафт Ю.С., Илупин И.П.* Глубинные парагенезисы ильменита в кимберлитах Якутии // Исследования высокобарических минералов. М.: ИФЗ АН СССР. **1987**. С. 25–68.
- Джейкс А., Луис Дж., Смит К.* Кимберлиты и лампроиты Западной Австралии. М.: Мир. **1989**. 268 с.
- Доусон Дж.* Кимберлиты и ксенолиты в них. М.: Мир. **1983**. 300 с.
- Дудкин О.Б., Минаков Ф.В., Кравченко М.П. и др.* Карбонатиты Хибин. Апатиты: КФ АН СССР. **1984**. 99 с.
- Илупин И.П., Ваганов В.И., Прокопчук Б.И.* Кимберлиты. М.: Недра. **1990**. 248 с.
- Каминский Ф.В., Белоусова Е.А.* Манганоильменит как минерал — спутник алмаза в кимберлитах // Геология и геофизика. **2009**. Т. 50. С. 1560–1570.
- Костровицкий С.И.* Геохимические особенности минералов кимберлитов. Новосибирск: Наука. **1986**. 263 с.
- Костровицкий С.И., Алымова Н.В., Серов И.В. и др.* Типохимизм пикроильменита из алмазоносных полей Якутской провинции // Докл. РАН. **2006**. Т. 406. С. 350–354.
- Костровицкий С.И., Спецус З.В., Яковлев Д.А. и др.* Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции. Мирный: ООО «ПТ», НИГП АК «АЛРОСА». **2016**. 480 с.
- Куликова И.М., Набелкин О.А.* Рентгеноспектральный микроанализ минералов, содержащих редкоземельные элементы // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. **2014**. Т. 80. №4. С. 20–27.
- Левинсон-Лессинг Ф.Ю.* Олонецкая диабазовая формация // СПб. общ. естествоисп. Отд. геологии и минералогии. **1888**. Т. XIX. 99 с.
- Лукьянова Л.И., Лобкова Л.П., Алехина В.В.* Особенности вещественного состава кимберлитовых пород Кимозерского проявления Карелии // Алмазы и благородные металлы Тимано-Урал. региона. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УРО РАН. **2006**. С. 86–88.
- Мальков Б.А., Филиппов В.Н.* Барифлогопит и аксессуарный пиррофанит в алмазоносном кимберлите из трубки Ермаковская-7 на Кольском полуострове // Вест. ИГ КНЦ РАН. **2005**. Т. 128. №6. С. 5–10.
- Махоткин И.А.* Возраст и петрология кимберлитов и связанных с ними пород из района Кимозера, северное побережье Онежского озера, Карелия // Геохимия магматических пород. Апатиты: КНЦ РАН. **2003**. С. 107–109.
- Милашев В.А.* Эволюция кимберлитового магматизма. СПб.: ВНИИОкеангеология. **2015**. 225 с.
- Никишов К.Н.* Петролого-минералогическая модель кимберлитового процесса. М.: Наука. **1984**. 213 с.
- Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минералогия) / Ред. Л.В. Глушанин, А.И. Голубев, Н.В. Шаров, В.В. Щипцов. Петрозаводск: Карел. НЦ РАН. **2011**. 431 с.
- Путинцева Е.В.* Опыт количественной характеристики структуры кимберлитов с целью их прогнозной оценки // Зап. ВМО. **1991**. Ч. 120. Вып. 1. С. 116–122.
- Путинцева Е.В.* Геодинамическая обстановка формирования щелочных комплексов Карело-Кольского региона и особенности их металлогении: новая трактовка с позиции мантийных плюмов // Мантийные плюмы и металлогения. Петрозаводск-Москва. **2002**. С. 183–188.
- Путинцева Е.В.* Кимберлиты и метакимберлиты Кимозера (Карелия). В кн.: Петрография магматических и метаморфических горных пород, Петрозаводск: Карел. НЦ РАН. **2016**. С. 481–483.
- Путинцева Е.В., Житникова И.А., Полякова Е.И. и др.* Анализ геолого-геофизических «очаговых» неоднородностей коры и верхней мантии как основа для прогноз-но-минерагенического районирования Карелии на алмазы // Связь поверхностных структур земной коры с глубинными. Ч. 2. Петрозаводск: Карел. НЦ РАН. **2008**. С. 129–132.

- Путинцева Е.В., Житникова И.А., Полякова Е.И. и др. Оценка перспектив алмазоносности Карелии // Минерагенез докембрия. Петрозаводск: Карел. НЦ РАН. **2009**. С. 203 – 205.
- Путинцева Е.В., Спиригонов Э.М. Алланит-(Се) – характерный минерал метакимберлитов Кимозера, Карелия // Зап. РМО. **2016**. Ч. 145. Вып. 4. С. 79 – 91.
- Ровша В.С., Илупин И.П. Хромшпинелиды в кимберлитах Якутии // Геология и геофизика. **1970**. №2. С. 47 – 56.
- Самсонов А.В., Ларионова Ю.О., Сальникова Е.Б. и др. Изотопная геохимия и геохронология палеопротерозойских кимберлитов Кимозерского проявления (Карелия) // Мат. IV Росс. конф. изотоп. геохронол. СПб: ВСЕГЕИ. **2009**. С. 158 – 161.
- Соболев Н.В., Боткунов А.И., Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В. Новые данные о составе минералов, ассоциирующих с алмазами кимберлитовой трубки «Мир» // Геология и геофизика. **1976**. №12. С. 3 – 15.
- Соболев Н.В., Похиленко Н.П., Лаврентьев Ю.Г. и др. Особенности состава хромшпинелидов в алмазах и кимберлитах Якутии // Геология и геофизика. **1975**. №11. С. 7 – 24.
- Соколова Е.А., Спиригонов Э.М. Парагенез гётита и лизардита – типичное образование метакимберлитов цеолитовой фации и заключенных в них метаперидотитов // Новые данные о минералах. **2006**. Вып. 41. С. 86 – 90.
- Соколова Е.А., Спиригонов Э.М. Са-содержащий стронцианит, барит, доломит и кальцит в метакимберлитах трубки Зарница, Якутия // Новые данные о минералах. **2008**. Вып. 42. С. 158 – 162.
- Спиригонов Э.М., Барсукова Н.С., Кононкова Н.Н., Куликова И.М. Годлевскит  $Ni_9S_8$  родингитов Баженовского гипербазитового массива, Средний Урал // Докл. РАН. **1997**. Т. 356. С. 814 – 816.
- Спиригонов Э.М., Ладыгин В.М., Кулагов Э.А. и др. Метавулканисты пренил-пумпеллиитовой и цеолитовой фаций трапповой формации Норильского района Сибирской платформы. М.: МГУ. **2000**. 212 с.
- Спиригонов Э.М., Паутов Л.А., Соколова Е.А. и др. Хлорсодержащий лизардит метакимберлитов трубки Удачная Восточная, Северная Якутия // Докл. РАН. **2010**. Т. 431. №3. С. 396 – 399.
- Тимофеев В.М. Петрография Карелии. Петрография СССР / Ред. акад. Ф.Ю. Левинсон-Лессинг. Сер. I. Региональная петрография. Вып. 5. М.-Л.: АН СССР. **1935**. 256 с.
- Устинов В.Н., Загайный А.К., Смит К.Б., Ушков В.В. Раннепротерозойские алмазоносные кимберлиты Карелии и особенности их формирования // Геология и геофизика. **2009**. Т. 50. №9. С. 963 – 977.
- Ушков В.В. Кимозерское проявление алмазных кимберлитов в Онежской структуре // Геология и полезные ископаемые Карелии. **2001**. №3. С. 94 – 98.
- Францессон Е.В. Петрология кимберлитов. М.: Недра. **1968**. 200 с.
- Францессон Е.В., Гарева Р.Х., Пантелеев В.В., Дугар Л.П. Минералы – спутники алмаза из щелочно-ультраосновных брекчий Среднего Тимана // Тр. ЦНИГРИ. **1982**. Вып. 175. С. 69 – 77.
- Agel J.J., Garrison J.A., Taylor L.A. Petrogenesis of oxide minerals in kimberlite Elliot County, Kentucky // Amer. Mineral. **1982**. Vol. 67. P. 28 – 42.
- Boctor N.Z., Boyd F.R. Oxide minerals in the Lighobong kimberlite, Lesotho // Amer. Mineral. **1980**. Vol. 65. P. 631 – 638.
- Cathelineau M. Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature // Clay Mineral. **1988**. Vol. 23. P. 471 – 485.
- Chakhmouradian A.R., Mitchell R.H. Niobian ilmenite, hydroxylapatite and sulfatian monazite: alternative hosts for incompatible element in calcite kimberlite from International'naya, Yakutia // Canad. Mineral. **1999**. Vol. 37. P. 1177 – 1189.
- Coombs D.S. Lower grade mineral facies in New Zealand // 21<sup>st</sup> Int. Geol. Congr. Copenhagen. **1960**. Sect. 13. P. 339 – 351.
- Danchin R.V., O'Rey F. Chromian spinel exsolution in ilmenite from the Premier mine, Transvaal, South Africa // Contrib. Mineral. Petrol. **1972**. Vol. 35. P. 43 – 49.
- Edwards D., Rock N.M.S., Taylor W.R. et al. Mineralogy and petrology of the Aries diamondiferous kimberlite pipe, Central Kimberley block, Western Australia // J. Petrol. **1992**. Vol. 33. P. 1157 – 1191.
- Fieremans M., Ottenbergs R. The occurrence of zircon and baddeleyite crystals in the kimberlite formations at Mbuji-Mayi (Bakwanga, Zaire) // Bull. Soc. Belge Géol. **1979**. Vol. 88. P. 25 – 31.
- Gaspar J.C., Wylley P.J. Ilmenite (high Mg, Mn, Nb) in the carbonatites from Jacupiranga Complex, Brazil // Amer. Mineral. **1983**. Vol. 68. P. 960 – 971.
- Gaspar J.C., Wylley P.J. The alleged kimberlite – carbonatite relationship: evidence from ilmenite and spinel from Premier and Wesselton mines and the Benfontein sill, South

- Africa // *Contrib. Mineral. Petrol.* **1984**. Vol. 85. P. 133–140.
- Gratz R., Heinrich W. Monazite – xenotime thermobarometry: Experimental calibration of the miscibility gap in the binary system  $\text{CePO}_4$  –  $\text{YPO}_4$  // *Amer. Mineral.* **1997**. Vol. 82. P. 772–780.
- Haggerty S.E., Tompkins L.A. Subsolidus reactions in kimberlitic ilmenites: exsolution, reduction and the redox state of the mantle // *Kimberlites I. Proc. of the Third Int. Kimberlite Conference.* **1984**. Vol. 1. P. 335–357.
- Holmes A. Contribution to the petrology of the kimberlite and its inclusions // *Trans. Geol. Soc. South Africa.* **1936**. Vol. 39. P. 379–428.
- Hood C.T.S., McCandless T.E. Systematic variations in xenocrysts mineral composition at the province scale, Buffalo Hills kimberlites, Alberta, Canada // *Lithos.* **2004**. Vol. 77. P. 733–747.
- Jones A.P., Wylley P.J. Paragenetic trends of oxide minerals in carbonate-rich kimberlites, with new analyses from the Benfontein sill, South Africa // *J. Petrol.* **1985**. Vol. 26. P. 210–222.
- Kjarsgaard I.M., McClenaghan M.B., Kjarsgaard B.A., Henman L.M. Indicator mineralogy of kimberlite boulders from eskers in the Kirkland Lake and Lake Timiskanning areas, Ontario, Canada // *Lithos.* **2004**. Vol. 77. P. 705–751.
- Kostrovitsky S.L., Malkovets V.G., Verichev E.M., Garanin V.K. Megacrysts from the Grib kimberlite pipe (Arkhangelsk Province, Russia) // *Lithos.* **2004**. Vol. 77. P. 511–523.
- Liou J.G., Maruyama S., Cho M. Very low-grade metamorphism of volcanic and volcanoclastic rocks – mineral assemblages and mineral facies. In: Frey M. (ed.) – *Low temperature metamorphism*. Glasgow: Blakie. **1987**. P. 59–113.
- Masum K.M., Doyle B.J., Ball S., Walker S. The geology and mineralogy of the Anuri kimberlite, Nunavut, Canada // *Lithos.* **2004**. Vol. 76. P. 75–96.
- Melluso L., Lustrino M., Ruberti E. et al. Major- and trace-element composition of olivine, perovskite, clinopyroxene, Cr-Fe-Ti oxides, phlogopite and host kamafugites and kimberlites, Alto Paranaíba, Brazil // *Canad. Mineral.* **2008**. Vol. 46. P. 1–19.
- Mitchell R.H. Mangan magnesian ilmenite and titanium clinohumite from the Jacupiranga carbonatite, São Paulo, Brazil // *Amer. Mineral.* **1978**. Vol. 63. P. 544–547.
- Mitchell R.H. *Kimberlites: their mineralogy, geochemistry and petrology*. New York: Plenum Press. **1986**. 454 p.
- Nixon P.H., von Knorring O., Rooke J. Kimberlites and associated inclusions of Basutoland: a mineralogical and geochemical study // *Amer. Mineral.* **1963**. Vol. 48. P. 1090–1132.
- Pasteris J.D. The significance of groundmass ilmenite and megacryst ilmenite in kimberlites // *Contrib. Mineral. Petrol.* **1980**. Vol. 75. P. 315–325.
- Philpotts A.R., Ague J.J. *Principles of igneous and metamorphic petrology*. Cambridge University Press. **2009**. 667 p.
- Priyatkina N., Chudoley A.K., Ustinov V.N. et al. 1.92 Ga kimberlitic rocks from Kimozero, NW Russia: Their geochemistry, tectonic setting and unusual field occurrence // *Precamb. Res.* **2014**. Vol. 249. P. 162–179.
- Spiridonov E.M., Putintseva E.V. New metamorphic-hydrothermal genetic type of baddeleyite // *New ideas Earth Sci. XVII Intern. Conf. M.*: **2015**. Selected Vol. P. 63–64.
- Tompkins L.A., Haggerty S.E. Groundmass oxide minerals in the Koidu kimberlites dikes, Sierra Leone, West Africa // *Contrib. Mineral. Petrol.* **1985**. Vol. 91. P. 245–263.
- Wyatt B.A. Manganian ilmenite from the Premier kimberlite // *Kimberlite Symposium II. Extended Abstracts*. Cambridge. **1979**. P. 274–284.
- Wyatt B.A., Baumgartner M., Anckar E., Grutter H. Compositional classification of «kimberlitic» and «nonkimberlitic» ilmenites // *Lithos.* **2004**. Vol. 77. P. 819–840.
- Zircon /eds. Hanclar J.M., Hoskin P.W. // *Rev. Mineral. Geochem.* **2004**. Vol. 53. 500 p.