

Апатит из кимберлитовой трубки Манчары (Центральная Якутия)

Н.А. Опарин^{1,*}, О.Б. Олейников^{1,**}, Л. Н. Баранов^{2,3}

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

²Научно-исследовательское геологическое предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия

³Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

*nik3256-1989@yandex.ru, ** olei-oleg@yandex.ru

Аннотация. Апатит – распространенный минерал магматических систем. Этот кальциевый фосфат выступает в роли минерала-концентратора галогенов и стронция, что делает его индикатором эволюции расплава на позднемагматическом этапе. Кимберлиты являются одними из немногих пород, где апатит изучен в ограниченном числе объектов. В настоящей работе обсуждаются результаты исследования зерен апатита кимберлитовых пород, слагающих среднепалеозойскую кимберлитовую трубку Манчары (Хомпу-Майское поле, Центральная Якутия). Рассматриваются химический состав и зональность апатита из кимберлитовых пород трубки Манчары, а также проводится сравнительная характеристика с апатитами кимберлитовых пород (Канада, ЮАР), карбонатитов (ЮАР), ксенолитов перидотитов из базальтов (Китай) и ксенолитов эклогитов из кимберлитов (Канада). Установлено, что минерал из кимберлитовой трубки Манчары является стронциевым фторапатитом. Изучение зонального строения отдельных кристаллов позволило отразить характер поведения SrO в процессе формирования кимберлитовых пород трубки Манчары. Определена позднемагматическая природа исследуемого апатита, состав которого связан с влиянием флюидов, обогащенных F и Sr. Различия апатита из трубки Манчары и алмазоносных кимберлитовых тел, карбонатитов, ксенолитов перидотитов и эклогитов ЮАР, Канады и Китая указывают на наличие типоморфных особенностей минерала для конкретных магматических систем, флюиды которых обогащены летучими компонентами и стронцием, что позволяет использовать примесный состав апатита в сравнительном изучении кимберлитовых и других пород.

Ключевые слова: апатит, стронций, кимберлитовая трубка, Хомпу-Майское поле, Центральная Якутия.

Благодарности. Работа выполнена в рамках НИР ИГАБМ СО РАН (№ 0381-2019-003).

Введение

Кимберлит является сложной гибридной породой, состав которой значительно искажен контаминацией мантийных и коровых пород, потерями летучих и гидротермальными изменениями [1]. Минералы основной массы могут служить индикаторами состава кимберлитовых магм и флюидного поведения на позднемагматической стадии. Апатит содержит галогены и стронций, что позволяет использовать этот минерал для исследования эволюции расплава [1]. Типоморфизм апатита изучен в многочисленных породах: карбонатитах [2, 3], гранитоидах [4, 5], перидотитах [6, 7], эклогитах [8], габброидах [9, 10], лампрофирах [11], фойяитах [12], нефелиновых сиенитах [12] и лампроитах [13]. Многие исследователи отмечали присутствие этого минерала в

кимберлитах, однако развернуто он был исследован в алмазоносной дайке Снэп Лэйк (Канада) [1], кимберлитовых породах поля Лак де Гра (Канада) [12] и провинции Кимберли (ЮАР) [14]. Настоящее исследование посвящено изучению кристаллов апатита, отобранных из протолочных проб и диагностированных в аншлифах наименее измененных разностей кимберлитовых пород, слагающих трубку Манчары, расположенную в северной части Алданской антеклизы.

Общая характеристика кимберлитов

В Центральной Якутии установлено шесть кимберлитовых трубок, первой из которых была открыта Манчары [15], находящаяся в 100 км южнее г. Якутск (рис. 1), в пределах среднепалеозойского [16] Хомпу-Майского кимберлитового

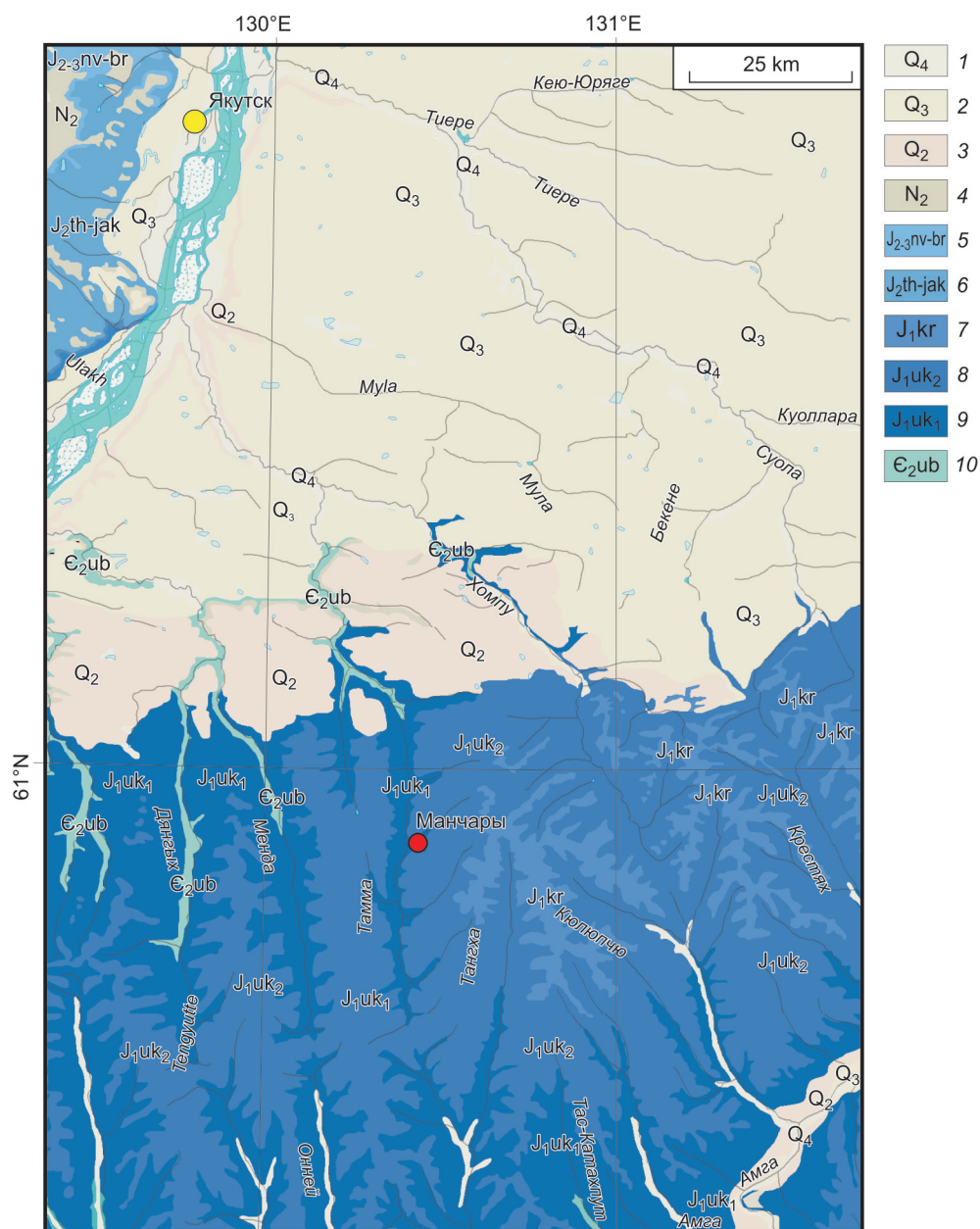


Рис. 1. Геологическая позиция трубки Манчары [17]:

1 – голоцен, Q₄; 2 – плейстоцен, верхнее звено, Q₃; 3 – плейстоцен, среднее звено, Q₂; 4 – отложения неогена, N₂; 5 – юрские отложения, средний отдел, келловейский ярус, нижневильюйская свита – верхний отдел, кимериджский – волжский ярусы, берегинская свита, J_{2-3nv-br}; 6 – юрские отложения, ааленский ярус, верхний подъярус–батский ярус, лохайнские слои (J_{2lh}) – якутская свита, J_{2jak}; 7 – юрские отложения, плинсбахский ярус, красноалданская свита, J_{1kr}; 8 – юрские отложения, плинсбахский ярус, укугитская свита, верхняя подсвита, J_{1uk2}; 9 – юрские отложения, плинсбахский ярус, укугитская свита, нижняя подсвита, J_{1uk1}; 10 – карбонатные отложения кембрия, E_{2ub}.

Fig. 1. Geological position of the manchary pipe [17]:

1 – the Holocene, Q₄; 2 – the Pleistocene, Upper, Q₃; 3 – the Pleistocene, Middle, Q₂; 4 – the Neocene, N₂; 5 – the Jurassic, Middle, the Callovian, the Lower Vilyuiskaya suite – Upper, the Kimmeridgian – the Volgian stages, Beregeinskaya suite J_{2-3nv-br}; 6 – the Jurassic, the Aalenskiy stage, the Upper Substage – Batskiy stage, the Lokhainskiy layers (J_{2lh}) – the Yakutskaya suite J_{2jak}; 7 – the Jurassic, the Plinsbakhskiy stage, the Krasoaldanskaya suite, J_{1kr}; 8 – the Jusrassic, the Plinsbakhskiy stage, the Ukugitskaya suite, the lower subsuite, J_{1uk2}; 9 – the Jurassic, the Plinsbakhskiy stage, the Ukugitskaya suite, the lower subsuite, J_{1uk1}; 10 – Cambrian carbonate deposits, E_{2ub}.

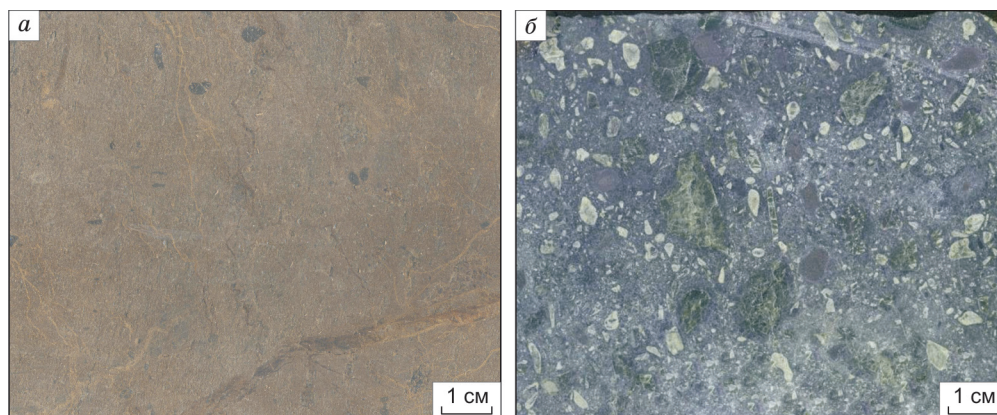


Рис. 2. Образцы кимберлита из трубки Манчары:

a – интенсивно карбонатизированный кимберлит с нечетко выраженными структурными признаками, текстура неоднородная, глубина 15 м от поверхности диатремы; *б* – крупнопорфировый кимберлит, структура порфировая, текстура неоднородная, глубина 56 м от поверхности диатремы.

Fig. 2. Kimberlite samples from the Manchary pipe:

a – intensively carbonitized kimberlite with light structural characteristics, uneven texture, 15 m deep from the diatreme surface; *b* – magnophyric kimberlite, porphyritic structure, uneven structure, 56 m deep from the diatreme surface.

поля. Трубка Манчары, диатрема которой достигает 250 м в диаметре, перекрыта юрскими терригенными толщами мощностью около 100 м [15] и вскрыта скважинами на глубину более 100 м. Тело сложено порфировым кимберлитом и кимберлитовой брекчией, между которыми, по мере сокращения количества ксенолитов осадочных пород, существуют постепенные переходы. Породы верхних горизонтов (рис. 2, *a*) сильно карбонатизированы, окварцованы и гипергенно изменены на глубину около 20 м, о чем свидетельствует присутствие большого количества вторичных карбонатов переменного состава (доломита, магнезита, сидерита, анкерита и магнезиального кальцита), кварца и монтмориллонита. В кимберлитовых породах, слагающих трубку Манчары, присутствуют ксенолиты серпентинитов, осадочных пород, измененных метаморфических пород и слюдитов. Также встречаются мега-, макрокристаллы флогопита, пиропы, пикроильменита, макрокристаллы хромшпинелида и псевдоморфозы серпентина по вкрапленникам оливина. Основная масса наименее измененных кимберлитов глубоких горизонтов (рис. 2, *б*) сложена преимущественно мелкопластинчатым флогопитом, ксеноморфными выделениями серпентина и карбоната. Кроме того, в мезостазисе установлены перовскит, апатит и минералы ряда магнетит–хромшпинелид. К настоящему времени в публикациях рассмотрены общие петрографи-

ческие особенности состава трубки [15] и результаты изучения флогопита [17], хромистой шпинели [18] и пикроильменита [19].

Методика исследования

Строение кристаллов, их зональность и взаимоотношение апатита с другими минералами изучены в аншлифах в ИГАБМ СО РАН на сканирующем электронном микроскопе JSM6480LV с энергетическим спектрометром INCA-Energy 350 при напряжении на катоде 20 кВ и токе электронов 1 нА. Определение химического состава зерен апатита ($n = 45$) из протоочных проб, наименее измененных кимберлитовых пород, заключенных в отполированные шашки из эпоксидной смолы, проводилось рентгеноспектральным методом на микрозондовом анализаторе JXA-8230 с волновым спектрометром в Центральной аналитической лаборатории НИГП АК «АЛРОСА» (аналитик А.С. Иванов).

Морфология кристаллов и химический состав минерала

Зерна апатита встречаются в мелкозернистой серпентин-карбонатной матрице вместе с лейстами флогопита и ксеноморфными зернами перовскита (рис. 3, *a*). В протоочных пробах и аншлифах апатит диагностирован большей частью в виде водяно-прозрачных кристаллов, имеющих гексагонально-призматический габитус со степе-

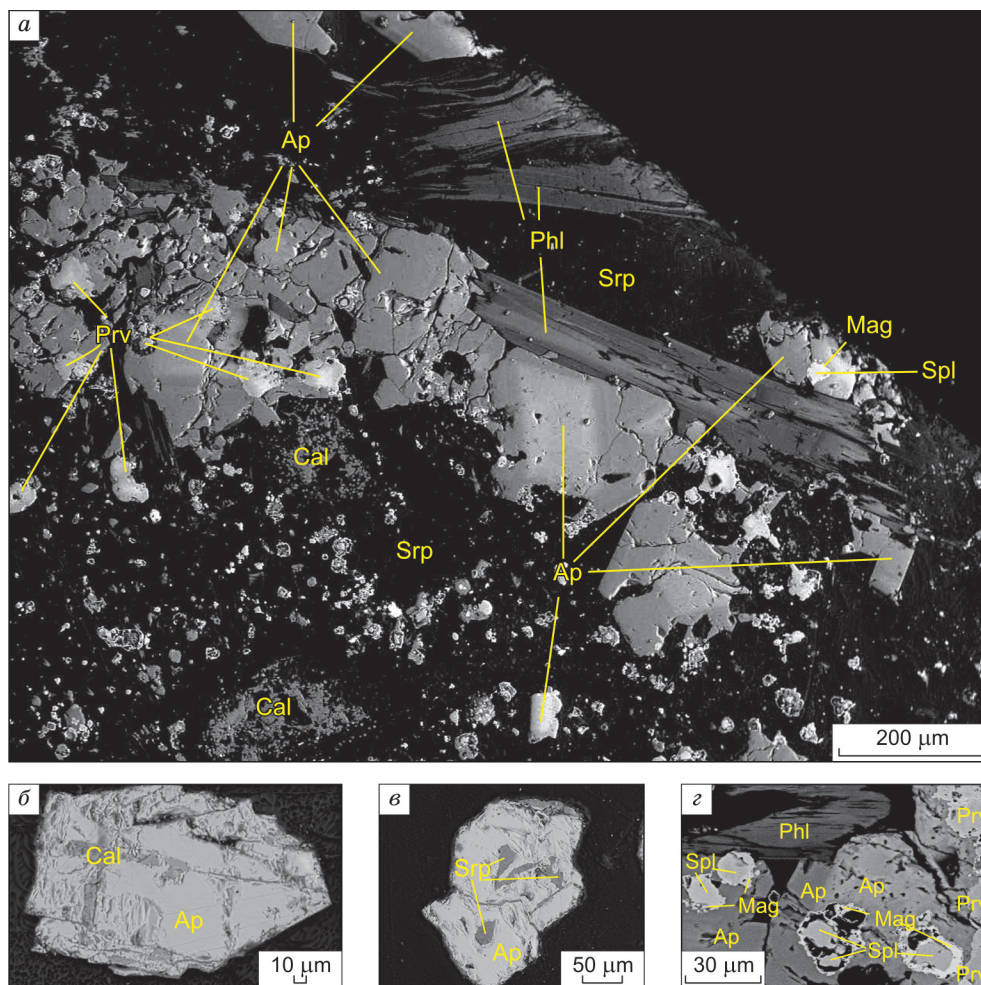


Рис. 3. Апатит из кимберлитовых пород трубки Манчары:

a – зерна апатита в кимберлите трубки Манчары; *б* – зерно апатита с выделениями кальцита; *в* – ксеноморфное зерно апатита с выделениями серпентина; *г* – край зонального зерна апатита со сростками перовскита и с питтингами, заполненными атоллоидными агрегатами феррошпинели и магнетита; Ap – апатит, Spl – феррошпинель, Mag – магнетит, Prv – перовскит, Cal – кальцит, Srp – серпентин, Phl – флогопит. BSE.

Fig. 3. Apatite from kimberlite rocks of the Manchary pipe:

a – apatite grains in kimberlite of the Manchary pipe; *б* – apatite grain with calcite; *в* – anhedral apatite grain with serpentinite; *г* – rim of zoned apatite grain with perovskite splices and pittings filled with atoll aggregates of ferrospinel and magnetite; Ap – apatite, Spl – ferrospinel, Mag – magnetite, Prv – perovskite, Cal – calcite, Srp – serpentinite, Phl – phlogopite. BSE.

нью удлинения от 1:3 до 1:5, размером от 20 до 500 мкм и иногда образующих скопления в породе (рис. 3, *a*). Изредка встречаются резорбированные ксеноморфные зерна апатита размером от 50 до 100 мкм с питтингами (кавернами) (рис. 3, *б*, *в*). Каверны выполнены выделениями кальцита (см. рис. 3, *б*) и серпентина (см. рис. 3, *в*) и перовскита (рис. 2, *г*). Питтинги также бывают заполнены атоллоидными агрегатами, кайма которых сформирована губчатыми образованиями или пластинчатыми скелетными кристаллами магнетита. Ядра атоллоидных агрегатов (до 25 мкм) представлены феррошпинелью (рис. 3, *г*).

Минералы мезостазиса, выполняющие питтинги, образовались после растворения апатита.

Довольно часто встречаются кристаллы апатита, демонстрирующие химическую зональность (рис. 4), которая обусловлена наличием зон с различным содержанием SrO (табл. 1). Такая зональность апатита устанавливается на сканирующем электронном микроскопе в обратнорассеянных электронах (BSE) (рис. 4). Участки более яркого оттенка отличаются повышенными содержаниями SrO и пониженного CaO, более темного – наоборот (табл. 1). Сканирование по линии, секущей такие зоны, фиксирует различные со-

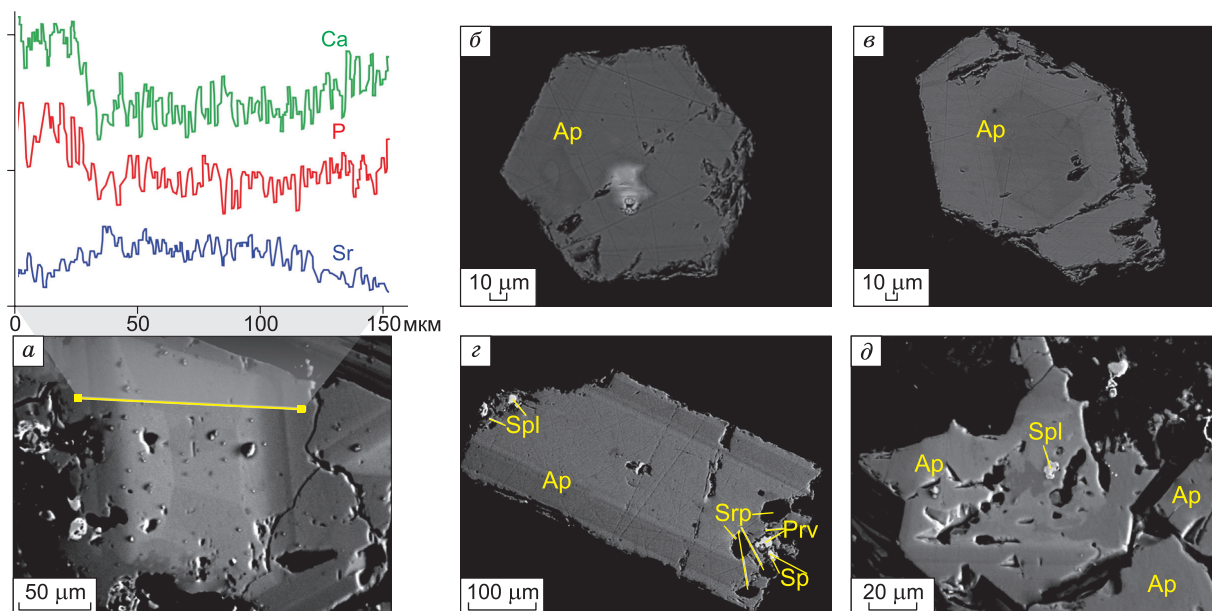


Рис. 4. Зональные кристаллы апатита из трубки Манчары:

а – визуализация сканирования по линии зонального кристалла апатита; *б* – кристалл апатита с обратной зональностью; *в* – кристалл апатита с прямой зональностью; *г* – кристалл апатита с «полоскообразным узором» зональности; *д* – ксеноморфное зерно апатита с диффузной зональностью; Ap – апатит, Spl – феррошпинель, Prv – перовскит, Srp – серпентин. BSE.

Fig. 4. Zoned apatite crystals from the Manchary pipe:

a – visualization of linear scanning of a zoned apatite crystal; *б* – apatite crystal with reverse zoning; *в* – apatite crystal with direct zoning; *г* – apatite crystal with a «stripe pattern» of zoning; *д* – anhedronal apatite grain with diffuse zoning; Ap – apatite, Spl – ferrospinel, Prv – perovskite, Srp – serpentine. BSE.

Таблица 1

Представительные анализы зональных зерен апатита из трубки Манчары, %

Table 1

Representative analyses of zonal apatite grains from the Manchary pipe, wt. %

Компонент	№ 1		№ 2	
	Светлая зона	Темная зона	Светлая зона	Темная зона
	Центр	Край	Центр	Край
F	2,85	3,12	3,18	3,21
CaO	47,46	50,22	49,47	51,17
P ₂ O ₅	39,44	40,59	39,63	39,46
SiO ₂	0,10	0,00	0,01	0,33
BaO	0,53	0,03	0,08	0,02
Cl	0,09	0,03	0,05	0,09
Ce ₂ O ₃	0,06	0,00	0,03	0,00
La ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,06
SrO	7,54	4,66	5,78	3,53
Nd ₂ O ₃	0,07	0,00	0,00	0,00
Nb ₂ O ₅	0,38	0,34	0,28	0,20
Gd ₂ O ₃	0,00	0,28	0,00	0,20
Total	99,25	98,52	98,51	98,32

Таблица 2

Представительные анализы апатита из трубки Манчары, %

Table 2

Representative analyses of apatite from the Manchary pipe, wt. %

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
F	2,92	3,42	3,08	3,14	3,36	3,05	3,53	2,85	3,36	3,12	2,85	3,11	3,14	3,21	3,53	3,12	3,13	3,46	3,17	3,12	3,21
CaO	45,37	52,52	42,23	48,80	41,53	49,60	52,91	47,46	41,53	48,81	47,46	49,12	48,80	49,10	52,91	48,47	48,55	51,07	48,71	48,60	48,85
P ₂ O ₅	38,55	41,96	37,10	39,18	35,93	40,41	42,12	39,44	35,93	40,67	39,44	40,05	39,18	39,72	42,12	39,64	39,50	41,63	39,97	39,60	39,85
SiO ₂	0,00	0,00	0,08	0,06	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,10	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,02	0,00
BaO	0,44	0,02	0,10	0,03	0,09	0,10	0,00	0,53	0,09	0,10	0,53	0,02	0,03	0,06	0,00	0,00	0,18	0,00	0,10	0,08	0,17
Cl	0,03	0,04	0,00	0,03	0,03	0,00	0,14	0,09	0,03	0,01	0,09	0,00	0,03	0,00	0,14	0,00	0,03	0,02	0,11	0,04	0,00
Ce ₂ O ₃	0,02	0,36	2,56	0,01	0,00	0,04	0,19	0,06	0,00	0,00	0,06	0,00	0,01	0,00	0,19	0,00	0,01	0,16	0,01	0,01	0,03
La ₂ O ₃	0,05	0,12	2,28	0,03	3,03	0,01	0,16	0,00	3,03	0,00	0,00	0,00	0,03	0,01	0,16	0,00	0,04	0,09	0,01	0,03	0,00
SrO	9,64	0,07	3,71	6,13	5,04	5,77	0,16	7,54	5,04	5,72	7,54	5,97	6,13	4,86	0,16	6,10	5,96	0,14	5,99	5,43	4,92
Nd ₂ O ₃	0,00	0,28	3,53	0,00	5,49	0,00	0,10	0,07	5,49	0,01	0,07	0,07	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,26	0,00	0,00	0,03
MnO	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	0,00	0,00	0,00
Nb ₂ O ₅	0,04	0,17	0,30	0,28	0,25	0,18	0,01	0,38	0,25	0,12	0,38	0,23	0,28	0,61	0,01	0,25	0,37	0,10	0,28	0,31	0,05
Yb ₂ O ₃	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
Sm ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,45	0,00	0,12	0,04
Dy ₂ O ₃	0,00	0,51	0,00	0,65	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	0,22	0,03	0,04	0,00	1,67	0,01	0,00	0,00
Gd ₂ O ₃	0,00	0,96	0,43	0,82	0,35	0,59	0,00	0,00	0,35	0,56	0,00	0,60	0,82	0,00	0,00	0,48	0,64	0,92	0,00	1,28	0,05
Total	97,07	100,47	95,44	99,18	95,10	99,87	99,35	98,52	95,10	99,12	98,52	99,35	99,18	97,78	99,35	98,13	98,57	100,44	98,36	98,64	97,19
X(Fap)	0,82	0,96	0,87	0,88	0,94	0,86	0,99	0,80	0,94	0,88	0,80	0,87	0,88	0,90	0,99	0,88	0,88	0,97	0,89	0,88	0,90
X(Cap)	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00
X(Oap)	0,17	0,03	0,13	0,11	0,05	0,14	0,00	0,19	0,05	0,12	0,19	0,13	0,11	0,10	0,00	0,12	0,12	0,02	0,09	0,12	0,10

держания SrO и CaO в зонах и свидетельствует о выдержанности концентраций этих окислов в пределах каждой отдельной зоны (см. рис. 4, а). По типу узора зональные кристаллы являются концентрическими [1]. В поперечном сечении каждая из зон представлена в виде фигуры, повторяющей контуры внешних границ кристалла – шестиугольники (см. рис. 4, б, в). Зерна, разрезанные при полировке параллельно длинной оси кристалла, в силу отсутствия пирамидальных вершин демонстрируют «полоскообразный» узор (см. рис. 4, г). В обоих случаях встречаются зерна, демонстрирующие как обратный, так и прямой типы зональности. Обратная зональность обусловлена снижением концентраций стронция от центра к краю (см. рис. 4, б), а прямая – увеличением этого компонента в том же направлении (см. рис. 4, в). Наличие этих двух типов зональности говорит о том, что начало формирования минерала на позднемагматической стадии проходило не одномоментно, а как при высокой концентрации стронция в остаточном расплаве, так и при более низких его содержаниях.

Увеличение содержания SrO в апатите приводит к снижению количества CaO (табл. 1). Такие взаимоотношения компонентов были изучены в работе [12] и связаны с изоморфным замещением этих элементов [20] по схеме $\text{Sr}^{2+} \rightarrow \text{Ca}^{2+}$. Разница в содержании стронция между зонами составляет от 2,25 до 4,7 %. Единичные зерна апатита демонстрируют сложную диффузную зональность с наличием ксеноморфных зон (рис. 4, д). Центральная часть такого зерна представляет собой скелетный кристалл, сформировавшийся при пересыщении [21] элементов под влиянием диффузии в присутствии флюидов на позднемагматической стадии. В центре отмечаются зоны как с пониженным (до 4,46 %), так и с повышенным содержанием SrO (до 9,15 %). Краевая часть имеет плоскогранные формы, образование которых связано с падением пересыщения [21] и пониженными концентрациями SrO. В кимберлитовых породах трубки Манчары присутствующий в мезостазисе апатит имеет позднемагматическое происхождение, на что указывает его гексагонально-призматический габитус, предполагающий кристаллизацию из расплава в присутствии флюида [22]. Исследуемый минерал в основной массе кимберлитов трубки Манчары находится в ассоциации с флогопитом, который также зонален по содержанию бария [17]. При этом включения апатита в лейстах флогопита

и включения флогопита в кристаллах апатита обнаружены не были. Таким образом, можно предположить, что образование этих двух минералов проходило одновременно на позднемагматическом этапе в остаточном расплаве под влиянием флюидов, обогащенных барием и стронцием.

Апатит из кимберлитовой трубки Манчары характеризуется повышенными содержаниями SrO (до 9,64 %) (табл. 2), по сравнению с минералами из кимберлитовых трубок Бенфонтейн (ЮАР) [14], Кимберли (ЮАР) [14], Де Бирс (ЮАР) [14], Вэссэлтон (ЮАР) [14], кимберлитовой дайки Снэп Лэйк (Канада) [1], карбонатитов Палаборы (ЮАР) [2], ксенолитов перидотитов из базальтов Яньюань (Китай) [6] и ксенолитов эклогитов из кимберлитовой трубки Иерихон (Канада) [8], где содержания этого оксида не превышают 4 % (рис. 5, б). В единичных случаях в кимберлите из трубки Манчары отмечаются зерна с низким содержанием оксида стронция – от 0,07 до 0,16 % (см. табл. 2).

На диаграмме $\text{SrO}-\text{SiO}_2$ (см. рис. 5, б) апатиты трубки Манчары образуют отдельное поле составов, отличаясь от минерала из вышеперечисленных пород за счет высокого содержания стронция. Механизм образования высокостронциевого апатита [23–25] в базальтоидах связан с влиянием отделившихся на позднемагматическом этапе флюидов, богатых Sr [26, 27]. Находки высокостронциевого апатита в кимберлитах могут свидетельствовать о сходных механизмах накопления Sr.

Одна из основных типоморфных особенностей апатита – соотношение в нем F и Cl [4], поскольку концентрации этих элементов выявляют существенные различия в составе апатита из различных кимберлитовых трубок [1]. Количество F в изученных зернах составляет от 2,85 до 3,53 %, Cl – от 0,01 до 0,27 % (см. табл. 2). Большинство исследуемых зерен соответствует фтор-apatиту, что выражается в преобладании фтор-apatитового минала (от 0,82 до 0,99 ф.е.) над хлорапатитовым (от 0,01 до 0,04 ф.е.) и гидроксил-apatитовым (от 0,02 до 0,19 ф.е.). Содержание F в изученных зернах превышает концентрацию фтора в апатите алмазоносной дайки Снэп Лэйк (Канада), где содержание этого элемента составляет от 1,67 до 2,75 % [1]. На диаграмме F–Cl (см. рис. 5, а) фигуративные точки состава апатита из трубки Манчары образуют обособленное поле, не пересекаясь с апатитами из Снэп Лэйк [1], карбонатитов Палаборы (ЮАР) [2],

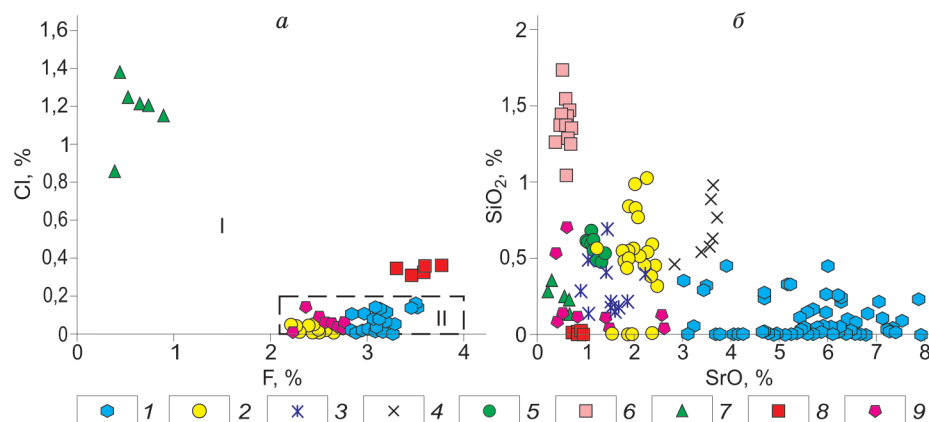


Рис. 5. Особенности состава апатита в координатах F–Cl (а) и SrO–SiO₂ (б):

1 – кимберлитовая трубка Манчары; 2 – кимберлитовая дайка Снэп Лэйк (Канада) [1]; 3 – кимберлиты рудника Де Бирс (ЮАР) [14]; 4 – кимберлиты рудника Кимберли (ЮАР) [14]; 5 – кимберлитовые силлы Весселтон (ЮАР) [14]; 6 – кимберлитовые силлы Бенфонтейн (ЮАР) [14]; 7 – ксенолиты перидотитов Яньюань (Китай) [6]; 8 – ксенолиты эклогитов из кимберлитовой трубки Иерихон (Канада) [8]; 9 – карбонатиты из карбонатитового комплекса Палабора (ЮАР) [2]. I – апатиты высокотемпературных сухих магм [4], II – апатиты низкотемпературных водных магм [4].

Fig. 5. Features of apatite composition in coordinates F–Cl (a) and SrO–SiO₂ (b):

1 – the Manchary kimberlite pipe; 2 – the Snap Lake kimberlite dike (Canada) [1], 3 – the De Beers mine kimberlites (South Africa) [14]; 4 – kimberlites of the Kimberly mine (South Africa) [14]; 5 – the Wesselton kimberlite sills (South Africa) [14]; 6 – the Benfontein kimberlite sills (South Africa) [14]; 7 – xenoliths of the Yangyuan peridotites (China) [6]; 8 – xenoliths of eclogites from the Jericho Kimberlite pipe (Canada) [8]; 9 – carbonatites from the Palabora carbonatite complex (South Africa) [2]. I – apatites of high-temperature dry magmas [4], II – apatites of low-temperature water magmas [4].

ксенолитов перидотитов из базальтов Яньюань (Китай) [6] и ксенолитов эклогитов из кимберлитовой трубки Иерихон (Канада) [8] (см. рис. 5). Таким образом, необычно высокое содержание фтора при низком хлоре является типоморфным признаком апатита из Хомпу-Майского поля.

Содержания фтора в апатите выдержаны и не зависят от концентрации SrO. В бариевом флогопите [17], находящемся в ассоциации с исследуемым апатитом, содержания фтора установлены не были, что также косвенно свидетельствует об одновременной кристаллизации флогопита и апатита, забравшего весь фтор из остаточного расплава.

Содержание хлора в апатите из трубки Манчары, как и из дайки Снэп Лэйк [1], не превышает 0,27 % (см. табл. 2). Наиболее высокие содержания хлора (см. рис. 5, а) отмечаются в ксенолитах перидотитов [6] и эклогитов [8].

По соотношению галогенов апатит из кимберлитов трубки Манчары, как и из кимберлитовой дайки Снэп Лэйк [1], и карбонатитов [2] на диаграмме F–Cl попадает в область фосфатов низкотемпературных водных магм [4] (см. рис. 5), что согласуется с позднемагматическим происхождением исследуемого минерала.

Изучение химического состава апатита из кимберлитовой трубки Манчары показало, что кро-

ме основных компонентов присутствуют примеси Ce₂O₃ (от 0,01 до 2,56 %) и Nb₂O₅ (от 0,01 до 0,61 %) (см. табл. 2). Другие примеси: SiO₂, BaO, MnO, La₂O₃, Nd₂O₃, Yb₂O₃, Sm₂O₃, Dy₂O₃, Gd₂O₃, в пределах чувствительности метода зафиксированы только в отдельных зернах (см. табл. 2). Таким образом, состав апатита показывает, что флюид, участвующий в кристаллизации пород, обогащен прежде всего стронцием и фтором.

Заключение

Проведенные исследования показали, что апатит из кимберлитовой трубки Манчары является стронциевым фторапатитом. Это выражается в преобладании фторапатитового минала (см. табл. 1) и высоком содержании стронция (до 9,64 %). В результате изучения зонального стронциевого фторапатита установлено изменение поведения SrO на позднемагматической стадии формирования кимберлитовой трубки Манчары. Начало формирования минерала на позднемагматической стадии проходило не одномоментно – как при высокой концентрации стронция в остаточном расплаве, так и при низких его содержаниях, что в ряде случаев проявляется в виде обратного и прямого типов зональности. Высокие содержания стронция, совместная кристал-

лизация с бариевым флогопитом, а также морфологические особенности зерен апатита из трубки Манчары указывают на его кристаллизацию на позднемагматическом этапе из остаточного расплава при участии флюида. Присутствие минералов мезостазиса, заполняющих питтинги в зернах апатита, – кальцита, серпентина и атоллоидных агрегатов феррошпинели и магнетита – свидетельствует об их кристаллизации после апатита. Различия в составах апатита из трубки Манчары и из алмазонасных кимберлитовых тел [1, 14], карбонатитов [2], ксенолитов перидотитов [6] и эклогитов [8] ЮАР, Канады и Китая указывают на наличие типоморфных особенностей минерала для каждого объекта, что позволяет использовать примесный состав апатита в сравнительном изучении кимберлитовых и других пород.

Литература

1. Milligan R.S. Features of apatite in kimberlite from Ekati Diamond Mine and Snap Lake: modelling kimberlite composition // Thesis for the degree of Master of Science. Dalhousie University. 2017. 97 p. <https://dalspace.library.dal.ca/handle/10222/73521>
2. Giebel R.J., Marks M.A.W., Gauert C.D.K., Markl G. A model for the formation of carbonatite-phoscorite assemblages based on the compositional variations of mica and apatite from the Palabora Carbonatite Complex, South Africa // *Lithos*. 2019. Vol. 324–325. P. 89–104.
3. Anzolin H. de M., Dani N., Remus M.V.D., Ribeiro R. da R., Nunes A.R., Ruppel K.M.V. Apatite multi-generations in the Três Estradas Carbonatite, Southern Brazil: physical and chemistry meaning and implications to phosphate ore quality // *Brazilian Journal of Geology*. 2019. Vol. 49(2). P. 1–17.
4. Бушляков И.Н., Холоднов В.В. Галогены в петрогенезисе гранитоидов. М.: Недра, 1986. 192 с.
5. Macdonald R., Baginski B., Dzierzanowski P., Jokubauskas P. Apatite-supergrain minerals in UK Palaeogene granites: Composition and relationship to host-rock composition // *European Journal of Mineralogy*. 2013. Vol. 25 (3). P. 461–471.
6. Zhao X.-M., Zhang H.-F., Zhu X.-K., Zhu B., Cao H. Effects of melt percolation on iron isotopic variation in peridotites from Yangyuan, North China Craton // *Chemical Geology*. 2015. Vol. 401. P. 96–110.
7. Morishita T., Hattori K.H., Terada K., Matsumoto T., Yamamoto K., Takebe M., Arai S. Geochemistry of apatite-rich layers in the Finero phlogopite-peridotite massif (Italian Western Alps) and ion microprobe dating of apatite // *Chemical Geology*. 2008. Vol. 251(1–4). P. 99–111.
8. Heaman L.M., Creaser R.A., Cookenboo H.O., Chacko T. Multi-stage modification of the Northern Slave mantle lithosphere: Evidence from zircon- and diamond-bearing eclogite xenoliths entrained in Jericho kimberlite, Canada // *Journal of Petrology*. 2006. Vol. 47(4). P. 821–858.
9. Рахимов И.Р., Холоднов В.В., Салихов Д.Н. Акцессорные апатиты из габброидов позднего девона-раннего карбона Западно-Магнитогорской зоны: особенности морфологии и химического состава, индикаторная металлогеническая роль // *Геологический вестник*. 2018. № 3. С. 109–123.
10. Zhang C., Koepeke J., Albrecht M., Horn I., Holtz F. Apatite in the dike-gabbro transition zone of mid-ocean ridge: Evidence for brine assimilation by axial melt lens // *American Mineralogist*. 2017. Vol. 102 (3). P. 558–570.
11. Vasyukova E. Trace elements of apatite from alkaline lamprophyres from the rocks SE Altay-NE Mongolia // *Geophysical Research Abstracts*. 2019. Vol. 21. EGU2019-19184.
12. Chakhmouradian A.R., Reguir E.P., Mitchell R.H. Strontium-apatite: new occurrences, and the extent of Sr-for-Ca substitution in apatite-group minerals // *The Canadian Mineralogist*. 2002. Vol. 40 (1). P. 121–136.
13. Scott B.H. Kimberlite and Lamproite Dykes from Holsteinsborg, West Greenland // *Meddelelser om Grønland. Geoscience*. 1981. Vol. 4. 24 p.
14. Soltys A., Giuliani A., Phillips D. Apatite from the Kimberley kimberlites (South Africa): petrography and mineral chemistry // *International Kimberlite Conference, Gaborone 2017*. Vol. 11.
15. Смеров А.П., Андреев А.П., Алтухова З.А. и др. Кимберлиты трубки Манчары: новое кимберлитовое поле Центральной Якутии // *Геология и геофизика*. 2010. № 1. С. 153–159.
16. Зайцев А.И., Смеров А.П., Алтухова З.А. Первые данные по изотопному составу стронция и возрасту кимберлитовой трубки Манчары (Центральная Якутия) // *Отечественная геология*. 2010. № 5. С. 51–59.
17. Опарин Н.А., Олейников О.Б., Бабушкина С.А. Флогопит из трубок Манчары и Апрельская (Хомпу-Майское кимберлитовое поле, Центральная Якутия) // *Отечественная геология*. 2017. № 5. С. 37–44.
18. Опарин Н.А., Олейников О.Б. Хромшпинелиды из трубок Хомпу-Майского кимберлитового поля (Центральная Якутия) // *Отечественная геология*. 2018. № 5. С. 35–41.
19. Опарин Н.А., Олейников О.Б. Макрокристаллы пикроильменита кимберлитовых трубок Хомпу-Майского кимберлитового поля (Центральная Якутия) // *Отечественная геология*. 2019. № 6. С. 43–49.
20. Пушарковский Д.Ю., Надежина Т.Н., Хомяков А.П. Кристаллическая структура стронций-apatита из Хибин // *Кристаллография*. 1987. Т. 32, № 4. С. 891–895.
21. Краснова Н.И., Петров Т.Г. Генезис минеральных индивидов и агрегатов. СПб.: Невский курьер, 1995. 228 с.
22. Wyllie P.J., Cox K.G., Biggar G.M. The habit of apatite in synthetic systems and igneous rocks // *Journal of Petrology*. 1962. Vol. 3. P. 238–243.

23. Watson E.B., Green T. H. Apatite/liuid partition coefficients for the rare earth elements and strontium // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1981. Vol. 56. P. 405–421.

24. Prowatke S., Klemme S. Trace element partitioning between apatite and silicate melts // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2006. Vol. 70. P. 4513–4527.

25. Ayers J.C., Watson E.B. Apatite/fluid partitioning of rare-earth elements and strontium: Experimental results at 1.0 GPa and 1000° C and application to models of fluid-rock interaction // *Chemical Geology*. 1993. Vol. 110. P. 299–314.

26. Соловова И.П., Гирнис А. В., Рябчиков И.Д., Конюшкова Н.Н. Механизмы образования высокобариевого флогопита и высокостронциевого апита на заключительных стадиях эволюции щелочных магм // *Геохимия*. 2009. № 6. С. 613–627.

27. Соловова И.П., Гирнис А.В., Рябчиков И.Д., Симакин С.Г. Высокотемпературный карбонатитовый расплав и его взаимоотношения с щелочными магмами Дункельдыкского комплекса, юго-восточный Памир // *Докл. РАН*. 2006. Т. 409. С. 1–4.

Поступила в редакцию 18.06.2020

Принята к публикации 11.08.2020

Об авторах

ОПАРИН Николай Александрович, младший научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-3019-1245>, nik3256-1989@yandex.ru;

ОЛЕЙНИКОВ Олег Борисович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-1010-7592>, olei-oleg@yandex.ru;

БАРАНОВ Леонид Николаевич, младший научный сотрудник, инженер-исследователь, Научно-исследовательское геологическое предприятие, Акционерная компания «АЛРОСА» (публичное акционерное общество), 678170, Мирный, Чернышевское шоссе, 16, Россия; Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/1, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-6526-3635>, baranovln95@gmail.com.

Информация для цитирования

Опарин Н.А., Олейников О.Б. Баранов Л.Н. Апатит из кимберлитовой трубки Манчары (Центральная Якутия) // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020, Т. 25, № 3. С. 15–26. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-2>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-2

Apatite from the Manchary kimberlite pipe (Central Yakutia)

N.A.Oparin^{1,*}, O.B.Oleinikov^{1,**}, L.N. Baranov³

¹*Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Novosibirsk, Russia*

²*PJSC «ALROSA», Mirny, Russia*

³*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia*

**nik3256-1989@yandex.ru, ** olei-oleg@yandex.ru*

Abstract. Apatite is a common magmatic mineral. This calcium phosphate acts as a mineral concentrating halogens and strontium, which suggests that it is an indicator of late-stage melt evolution. Kimberlites represent few rocks where apatite has been studied in a limited number of reservoirs. The present paper discusses the results of the analysis of kimberlite apatite grains from the middle Paleozoic kimberlite pipe Manchary (Khompuy-May field, Central Yakutia). The paper reports chemical composition and zone distri-

bution of apatite from kimberlites of the Manchary pipe. We also provide comparative analysis with kimberlite apatites (Canada, RSA), carbonatites (RSA), peridotite xenoliths in basalt (China), and eclogite xenoliths in kimberlite (Canada). It was found that the mineral in the Manchary kimberlite pipe is a strontium fluorapatite. Analysis of zoning in crystals allowed us to show the behavior of SrO in the formation of kimberlites of the Manchary pipe. Apatite under study was found to be late-stage magmatic, with its composition being affected by F- and Sr-rich fluids. Differences of apatite from the Manchary pipe and diamond-bearing kimberlite bodies, carbonatites, peridotite xenoliths, and eclogites in RSA, Canada and China indicate typomorphic characteristics of the mineral for particular magmatic systems with strontium- and volatile-rich fluids which allows one to use doped apatite for comparative studies of kimberlites and other rocks.

Key words: apatite, strontium, kimberlite pipe, Khompu-May field, Central Yakutia.

Acknowledgements. The work was carried out as part of the scientific research of the Diamond and Precious Metal Geology Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (No. 0381-2019-0003).

References

1. Milligan R.S. Features of apatite in kimberlite from Ekati Diamond Mine and Snap Lake: modelling kimberlite composition // Thesis for the degree of Master of Science. Dalhousie University. 2017. 97 p. <https://dalspace.library.dal.ca/handle/10222/73521>
2. Giebel R.J., Marks M.A.W., Gauert C.D.K., Markl G. A model for the formation of carbonatite-phoscorite assemblages based on the compositional variations of mica and apatite from the Palabora Carbonatite Complex, South Africa // *Lithos*. 2019. Vol. 324–325. P. 89–104.
3. Anzolin H. de M., Dani N., Remus M.V.D., Ribeiro R. da R., Nunes A.R., Ruppel K.M.V. Apatite multi-generations in the Três Estradas Carbonatite, Southern Brazil: physical and chemistry meaning and implications to phosphate ore quality // *Brazilian Journal of Geology*. 2019. Vol. 49(2). P. 1–17.
4. Bushlyakov I.N., Holodnov V.V. Galogeny v petrogenезе гранитоидов. Москва: Nedra, 1986. 192 p.
5. Macdonald R., Baginski B., Dzierzanowski P., Jókubauskas P. Apatite-supergroup minerals in UK Palaeogene granites: Composition and relationship to host-rock composition // *European Journal of Mineralogy*. 2013. Vol. 25 (3). P. 461–471.
6. Zhao X.-M., Zhang H.-F., Zhu X.-K., Zhu B., Cao H. Effects of melt percolation on iron isotopic variation in peridotites from Yangyuan, North China Craton // *Chemical Geology*. 2015. Vol. 401. P. 96–110.
7. Morishita T., Hattori K.H., Terada K., Matsumoto T., Yamamoto K., Takebe M., Arai S. Geochemistry of apatite-rich layers in the Finero phlogopite–peridotite massif (Italian Western Alps) and ion microprobe dating of apatite // *Chemical Geology*. 2008. Vol. 251(1–4). P. 99–111.
8. Heaman L.M., Creaser R.A., Cookenboo H.O., Chacko T. Multi-stage modification of the Northern Slave mantle lithosphere: Evidence from zircon- and diamond-bearing eclogite xenoliths entrained in Jericho kimberlite, Canada // *Journal of Petrology*. 2006. Vol. 47(4). P. 821–858.
9. Rahimov I.R., Holodnov V.V., Salihov D.N. Акцессорные апатиты из габброидов позднего девона – раннего карбона Заpadно-Magnitогорской зоны: особенности морфологии и химического состава, индикаторная металлогенетическая роль // *Геологический вестник*. 2018. No. 3. P. 109–123.
10. Zhang C., Koepke J., Albrecht M., Horn I., Holtz F. Apatite in the dike-gabbro transition zone of mid-ocean ridge: Evidence for brine assimilation by axial melt lens // *American Mineralogist*. 2017. Vol. 102 (3). P. 558–570.
11. Vasyukova E. Trace elements of apatite from alkaline lamprophyres from the rocks SE Altay-NE Mongolia // *Geophysical Research Abstracts*. 2019. Vol. 21. EGU2019-19184.
12. Chakhmouradian A.R., Reguir E.P., Mitchell R.H. Strontium-apatite: new occurrences, and the extent of Sr-for-Ca substitution in apatite-group minerals // *The Canadian Mineralogist*. 2002. Vol. 40 (1). P. 121–136.
13. Scott B.H. Kimberlite and Lamproite Dykes from Holsteinsborg, West Greenland // *Meddelelser om Grønland. Geoscience*. 1981. Vol. 4. 24 p.
14. Soltys A., Giuliani A., Phillips D. Apatite from the Kimberley kimberlites (South Africa): petrography and mineral chemistry // *International Kimberlite Conference, Gaborone* 2017. Vol. 11.
15. Smelov A.P., Andreev A.P., Altuhova Z.A. et al. Kimberлиты трубки Манчары: новое кимберлитовое поле Центральной Якутии // *Геология и геофизика*. 2010. No. 1. P. 153–159.
16. Zajcev A.I., Smelov A.P., Altuhova Z.A. Первые данные по изотопному составу стронция и возрасту кимберлитовой трубки Манчары (Центральная Якутия) // *Отечественная геология*. 2010. No. 5. P. 51–59.
17. Oparin N.A., Olejnikov O.B., Babushkina S.A. Флогопит из трубок Манчары и Апрельская (Хомпу-Маякское кимберлитовое поле, Центральная Якутия) // *Отечественная геология*. 2017. No. 5. P. 37–44.
18. Oparin N.A., Olejnikov O.B. Хромшпинелиды из трубок Хомпу-Маякского кимберлитового поля (Центральная Якутия) // *Отечественная геология*. 2018. No. 5. P. 35–41.
19. Oparin N.A., Olejnikov O.B. Макрокристаллы пикроил’менита кимберлитовых трубок Хомпу-Маякского

kimberlitovogo polya (Central'naya Yakutiya) // *Otechestvennaya geologiya*. 2019. No. 6. P. 43–49.

20. *Pushcharkovskij D.Yu., Nadezhina T.N., Homyakov A.P.* Kristallicheskaya struktura stroncij-apatita iz Hibirina // *Kristallografiya*. 1987. Vol. 32, No. 4. P. 891–895.

21. *Krasnova N.I., Petrov T.G.* Genezis mineral'nykh individov i agregatov. SPb.: Nevskij kur'er, 1995. 228 p.

22. *Wyllie P.J., Cox K.G., Biggar G.M.* The habit of apatite in synthetic systems and igneous rocks // *Journal of Petrology*. 1962. Vol. 3. P. 238–243.

23. *Watson E.B., Green T. H.* Apatite/liquid partition coefficients for the rare earth elements and strontium // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1981. Vol. 56. P. 405–421.

24. *Prowatke S., Klemme S.* Trace element partitioning between apatite and silicate melts // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2006. Vol. 70. P. 4513–4527.

25. *Ayers J.C., Watson E.B.* Apatite/fluid partitioning of rare-earth elements and strontium: Experimental results at 1.0 GPa and 1000° C and application to models of fluid-rock interaction // *Chemical Geology*. 1993. Vol. 110. P. 299–314.

26. *Solovova I.P., Girnis A. V., Ryabchikov I.D., Kononkova N.N.* Mekhanizmy obrazovaniya vysokobarievogo flogopita i vysokostroncievogo apita na zaklyuchitel'nykh stadiyah evolyucii shchelochnykh magm // *Geokhimiya*. 2009. No. 6. P. 613–627.

27. *Solovova I.P., Girnis A.V., Ryabchikov I.D., Simakin S.G.* Vysokotemperaturnyj karbonatitovyy rasplav i ego vzaimootnosheniya s shchelochnymi magmami Dunkel'dybskogo kompleksa, yugo-vostochnyj Pamir // *Doklady RAN*. 2006. Vol. 409. P. 1–4.

About the authors

OPARIN Nikolay Alexandrovich, junior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenin pr., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-3019-1245>, nik3256-1989@yandex.ru;

OLEYNIKOV Oleg Borisovich, candidate of geological and mineralogical sciences, leading researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenin pr., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-1010-7592>, olei-oleg@yandex.ru;

BARANOV Leonid Nickolaevich, junior researcher, research engineer, Geo-Scientific Research Enterprise Public Joint Stock Company «Alrosa», 16 Chernyshevskoe rd., 678170 Mirny, Russia; V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3/1 Acad. Koptug pr., Novosibirsk 630090, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-6526-3635>, baranovln95@gmail.com.

Citation

Oparin N.A., Oleinikov O.B., Baranov L.N. Apatite from the Manchary kimberlite pipe (Central Yakutia) // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020, Vol. 25, No. 3. P. 15–26. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-2>