

Минералы ряда флогопит–киноситалит основной массы кимберлитовых пород трубок Хомпу–Майского поля (Центральная Якутия)

Н.А. Опарин*, О.Б. Олейников

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

*nik3256-1989@yandex.ru

Аннотация. Впервые на примере среднепалеозойских трубок Хомпу–Майского поля (Центральная Якутия) обсуждаются результаты системного исследования микрозерен слюды ряда флогопит–киноситалит, присутствующей в основной массе пород Якутской кимберлитовой провинции. Рассматриваются зональность и химический состав минералов, а также проводится сравнение со слюдой мантийных ксенолитов перидотитов из кимберлитовых трубок Африки, единичных тел кимберлитов Канады, США, Китая и Якутской кимберлитовой провинции, пород карбонатитовых массивов Бразилии и мелилититов России. Установлены разновидности исследуемой слюды – флогопит, барийсодержащий флогопит, бариевый флогопит и калиевый киноситалит. Эти разновидности могут присутствовать в пределах одного зерна, формируя его зональность. Определена позднемагматическая природа исследуемой слюды, состав которой обусловлен обогащением флюидов расплава барием. Изучение зонального строения чешуек позволило отразить характер поведения ВаО в процессе формирования кимберлитовых пород исследуемых трубок. Отличие и сходство в составах слюды из пород трубок Хомпу–Майского кимберлитового поля и ранее изученных кимберлитовых тел, карбонатитов, мантийных ксенолитов и мелилититов указывают на наличие особенностей минерала для различных магматических систем, флюиды которых обогащены ВаО. Это позволяет использовать состав слюд в сравнительном изучении кимберлитовых и других щелочно-ультраосновных пород.

Ключевые слова: флогопит, бариевый флогопит, барийсодержащий флогопит, калиевый киноситалит, кимберлитовая трубка, Хомпу–Майское поле, Якутская кимберлитовая провинция.

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

Введение

Кимберлит представляет собой ультраосновную со щелочным уклоном, петрографически сложную, гибридную горную породу [1], первичные минералы которой часто в различной степени изменены. Слюда исследуемых пород является одним из немногих магматических минералов, сохранившихся в неизменном виде в породах кимберлитовых трубок Эрэл (аномалия Thm-03-11), Турахская (аномалия Thm-10-11), им. Артемова (аномалия Thm-04-11), Манчары и Апрельская Хомпу–Майского поля. Она является концентратором бария, что позволяет использовать ее состав для изучения поведения флюида на позднемагматической стадии. Ранее слюды с повышенным содержанием бария были изучены в основной массе кимберлитовых пород, слагающих дайки Снэп Лейк [2] и Джос (Канада), тела кимберлитовых комплексов Чикен Парк, Айрон

Маунтин (США) и Бунуду (Гвинея), силлы Бенфонтейн (ЮАР), а также кимберлитовые трубки Элвин Бэй (Канада) и Шенгли (Китай) [3]. В Якутской кимберлитовой провинции такие разновидности слюды зафиксированы в единичных экземплярах в кимберлитовых породах трубок Мир, Интернациональная, Айхал и Удачная [4]. Наиболее представительно бариевые слюды основной массы пород трубки Юбилейная изучены Митчеллом [3]. Позднемагматические слюды, содержащие в своем составе барий, были описаны в айкилитах [5], мелилититах [6], лейцититах [7], совитах, раухгитах, бефорситах, якупирангитах [8], мантийных ксенолитах базанитовых лав [9] и оливиновых нефелинитах [10]. Настоящее исследование посвящено изучению микрозерен слюды, диагностированных в основной массе наименее измененных разновидностей кимберлитовых пород, слагающих трубки Хомпу–Майского поля,

расположенного в северной части Алданской антеклизы.

Общая характеристика кимберлитов

Среднепалеозойские кимберлитовые трубки Эрэл, Турахская, им. Артемова, Манчары и Апрельская установлены в пределах Хомпу-Майского кимберлитового поля, относящегося к Якутской кимберлитовой провинции [11]. Исследуемые тела прорывают карбонатные отложения верхнего кембрия и перекрыты юрскими терригенно-осадочными отложениями мощностью до 150 м (рис. 1).

Все кимберлитовые трубки являются однофазными и выполнены порфировым кимберлитом и кимберлитовой брекчией, между которыми по мере сокращения количества ксенолитов осадочных, метаморфических пород и включений серпентинитов существуют постепенные переходы. Породы верхних горизонтов карбонатизированы и гипергенно изменены на глубину до 30 м [12–14]. Во всех трубках диагностированы макро- и мегакристы пикроильменита, макрокристы хромшпинелидов [15–17] и пироба. Порфировые выделения оливина в породах каждой из исследуемых трубок нацело замещены

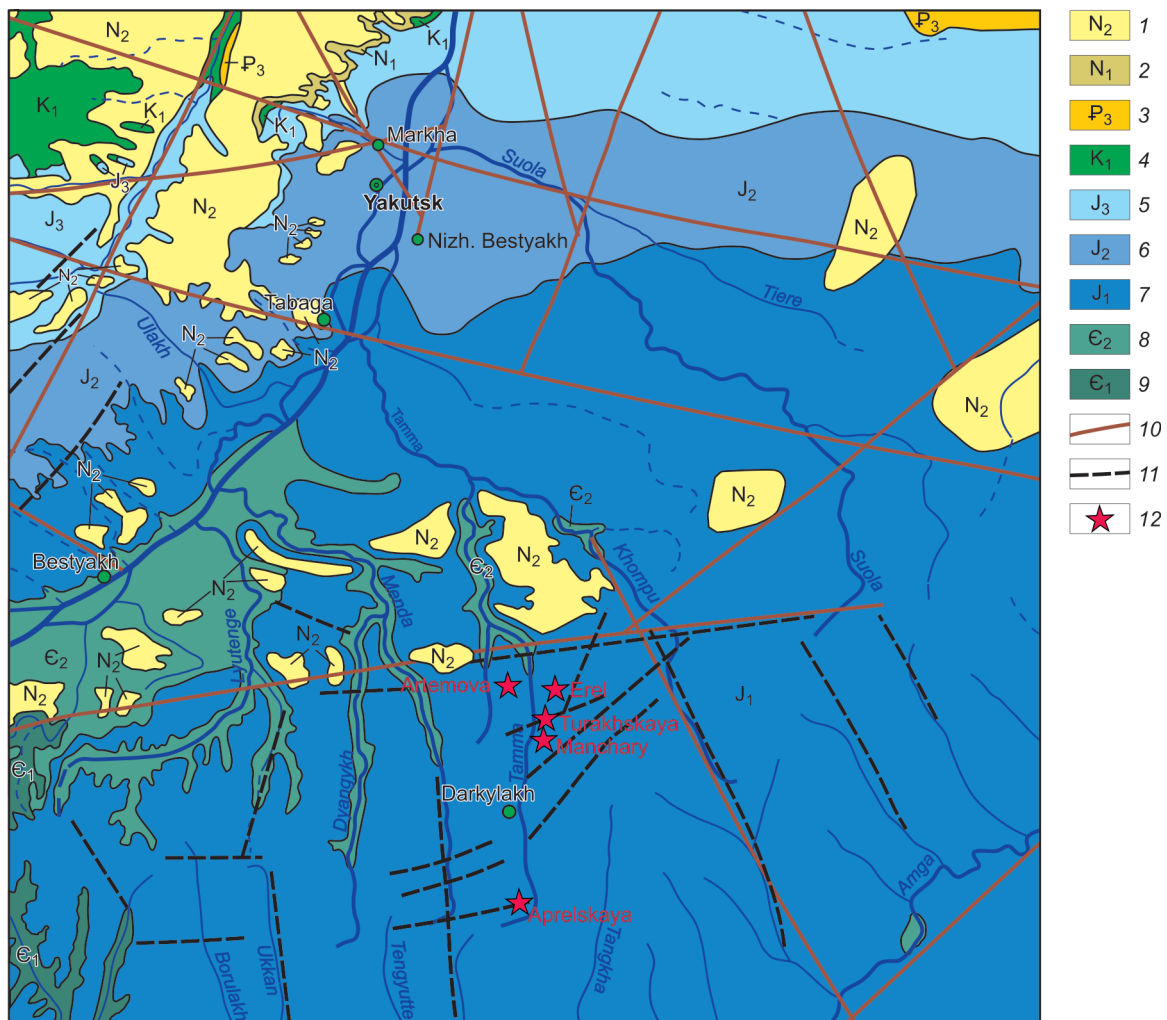


Рис. 1. Геологическая позиция Хомпу-Майского кимберлитового поля:

1 – верхний неоген, 2 – нижний неоген, 3 – верхний палеоген, 4 – нижний мел, 5 – верхняя юра, 6 – средняя юра, 7 – нижняя юра, 8 – средний кембрий, 9 – нижний кембрий, 10 – линейные элементы предположительно разломной природы, 11 – разломы неустановленной морфологии, 12 – кимберлитовые трубки.

Fig. 1. Geological position of the Khompu-May kimberlite field:

1 – Upper Neogene, 2 – Lower Neogene, 3 – Upper Palaeogene, 4 – Lower Cretaceous, 5 – Upper Jurassic, 6 – Middle Jurassic, 7 – Lower Jurassic, 8 – Middle Cambrian, 9 – Lower Cambrian, 10 – linear elements presumably caused by fault, 11 – faults of undefined morphology, 12 – kimberlite pipes.

серпентином и карбонатом. Их количество варьирует от 7 до 20 %, на отдельных участках – до 50 %. В трубке Манчары также установлены макро- и мегакристы слюды и ксенолиты слюдитов, флогопит которых содержит оксид бария [18, 19]. Мезостазис наименее измененных кимберлитовых пород сложен мелкопластинчатой слюдой, ксеноморфными выделениями серпентина, кальцита и доломита. Кроме того, в основной массе установлены перовскит, апатит [20] и минералы ряда магнетит–хромшпинелид. В целом, петрографический состав кимберлитовых пород всех изучаемых тел однотипен, а некоторые различия обусловлены наличием в трубке Манчары ранних парагенезисов флогопита и различиями в интенсивности проявления постмагматических и гипергенных процессов в пределах каждого тела.

Методика исследования

Строение зерен и зональность минералов ряда флогопит–киноситалит изучены в ИГАБМ СО РАН в шлифах на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axioscop 40 и в аншлифах на сканирующем электронном микроскопе JSM6480LV с энергетическим спектрометром INCA-Energy 350 при напряжении на катоде 20 кВ и токе электронов 1 нА. Поверхности полированных аншлифов напылялись проводящим углеродным слоем (до синего цвета). При съемке использовались следующие стандарты для линий: Ca K_{α} , Mg K_{α} , Si K_{α} – голубой диопсид, Mn K_{α} – марганцевый гранат ИГЕМ, Ti K_{α} и Fe K_{α} – пикроильменит ГФ55, K K_{α} – ортоклаз OR-1, Na K_{α} , Al K_{α} – альбит, Cr K_{α} – хромит, Ba L_{α} – барит, F K_{α} .

Морфология зерен и химический состав слюды

Минералы ряда флогопит–киноситалит (рис. 2) встречаются в основной массе кимберлитовых пород, слагающих трубки Хомпу-Майского поля, и являются одними из первичных магматических минералов. Слюда присутствует в виде разнонаправленных идиоморфных удлиненных пластинок размером от 20 до 200 мкм и в отдельных случаях до 300 мкм. В наиболее измененных вторичными процессами микроблоках породы количество чешуек слюды и рудных минералов уменьшается (рис. 3, а).

Пластины исследуемых минералов размером 20–40 мкм частично или полностью гидратированы и карбонатизированы (рис. 3, б). В пределах таких участков количество слюды варьирует

от 7 до 11 %, карбонатов – от 30 до 64 и серпентина – от 40 до 60 %.

Менее измененные разности кимберлитов содержат 12–22 % слюды, 15–30 % карбонатов, 24–40 % серпентина (см. рис. 2) и призматические кристаллы фторапатита.

В оптическом микроскопе изученные слюды выглядят однотонными (см. рис. 2), однако рентгеноспектральным методом в обратнорассеянных электронах (BSE) установлены разноокрашенные индивиды, демонстрирующие резко выраженную химическую неоднородность (рис. 3, б, ж, и; рис. 4), которая обусловлена наличием зон с различным содержанием BaO (см. таблицу).

Количество таких индивидов на отдельных участках достигает 30 %. В основной массе кимберлитовых пород исследуемых трубок флогопит представлен следующими разновидностями по содержанию BaO – флогопит, барийсодержащий флогопит (Ba < 0,1 ф.е.) [3], бариевый флогопит (Ba 0,1–0,5 ф.е.) [3] и калиевый киноситалит (Ba > 50 % от межслоевых катионов) [21] (см. таблицу). В пределах одного зерна могут присутствовать несколько разновидностей слюды. Флогопит и бариевый флогопит (BaO от 6,79 до 15,03 %) характерны для пород всех исследуемых трубок (см. таблицу). Барийсодержащий флогопит (BaO 0,86–3,34 %) фиксируется в труб-

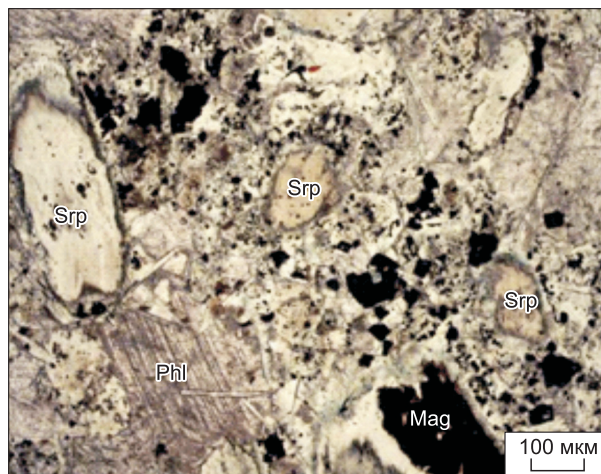


Рис. 2. Основная масса порфирового кимберлита трубки Эрэл. Резорбированная пластинка слюды и псевдоморфозы серпентина по оливину. Николи параллельны. Srp – серпентин, Phl – минералы ряда флогопит–киноситалит, Mag – магнетит.

Fig. 2. The porphyritic kimberlite groundmass of the Erel pipe. Resorbed mica plate and pseudomorphoses of serpentine by olivine. Parallel nicols. Srp – serpentine, Phl – minerals of the phlogopite-kinoshitalite series, Mag – magnetite.

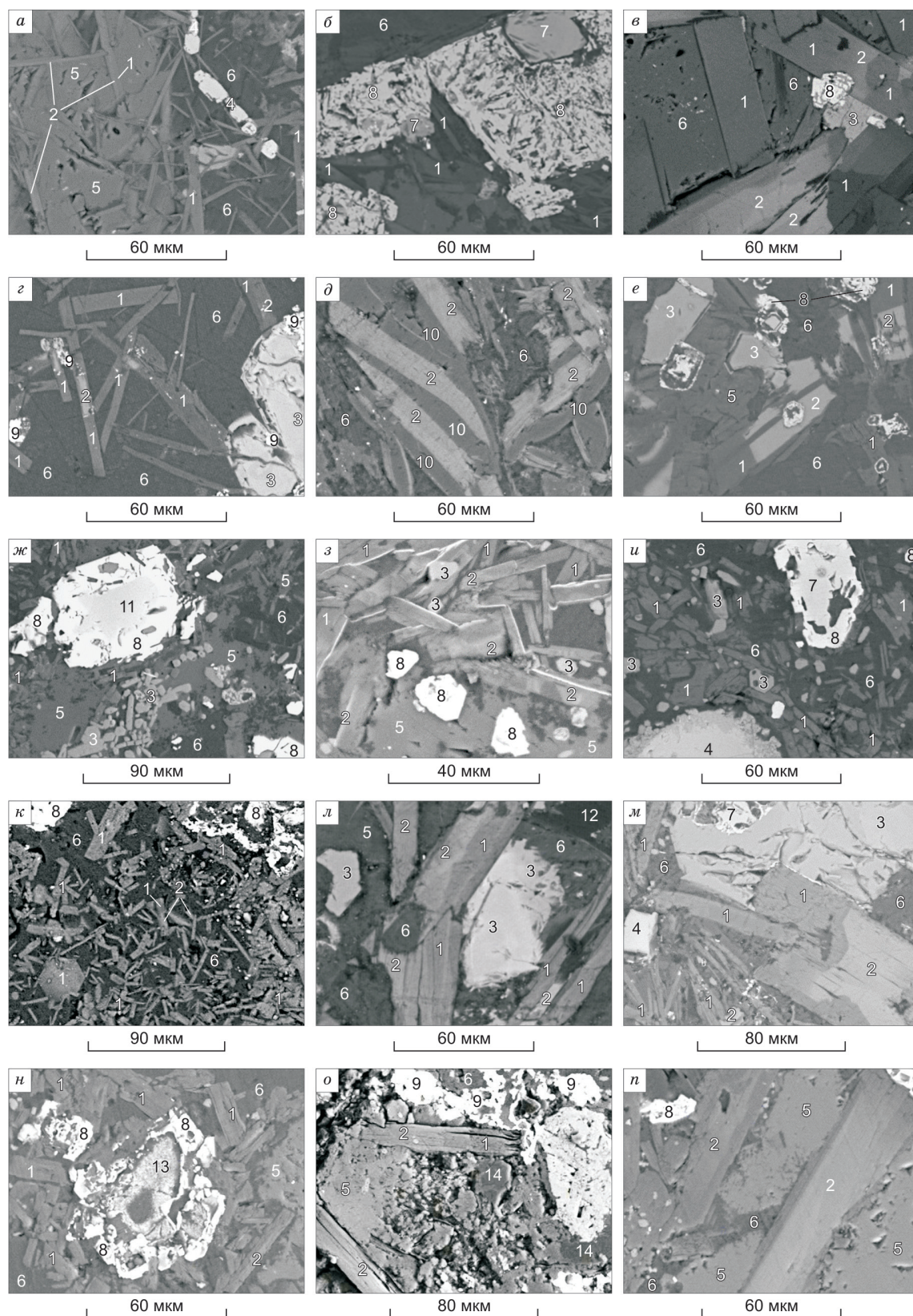


Рис. 3. Слюда из основной массы кимберлитовых пород трубок Хомпу-Майского поля:

а-в – трубка Эрэл, *з-е* – трубка Турахская, *ж-и* – трубка им. Артемова, *к-м* – трубка Манчары, *н-п* – трубка Апрельская;
1 – флогопит, 2 – барийсодержащий флогопит, бариевый флогопит и калиевый киноштиталит, 3 – апатит, 4 – перовскит, 5 –

МИНЕРАЛЫ РЯДА ФЛОГОПИТ-КИНОСИТАЛИТ ОСНОВНОЙ МАССЫ КИМБЕРЛИТОВЫХ ПОРОД

кальцит, 6 – серпентин, 7 – хромшпинелид, 8 – магнетит, 9 – сульфиды, 10 – доломит, 11 – ферришпинель, 12 – магнезит, 13 – пикроильменит, 14 – кварц. BSE.

Fig. 3. Groundmass mica from kimberlite rocks of Khompu-May field pipes:

a-b – Erel pipe, *г-е* – Turakhskaya pipe, *ж-и* – Artemova pipe, *к-м* – Manchary pipe, *н-п* – Aprelskaia pipe; 1 – phlogopite, 2 – barium-bearing phlogopite, 3 – apatite, 4 – perovskite, 5 – calcite, 6 – serpentine, 7 – chromspinellide, 8 – magnetite, 9 – sulfides, 10 – dolomite, 11 – ferrosphenel, 12 – magnesite, 13 – picroilmenite, 14 – quartz. BSE.

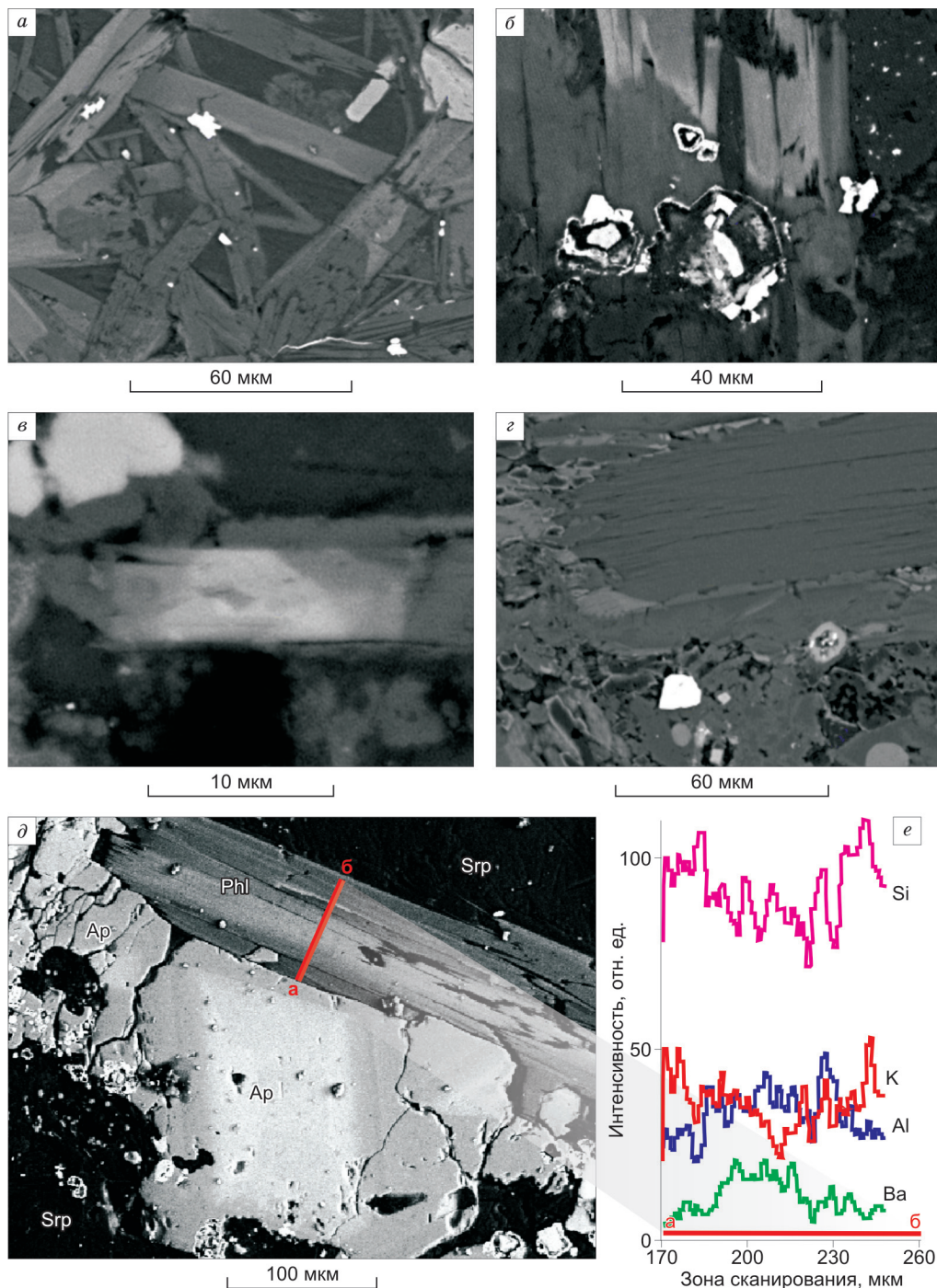


Рис. 4. Зональность слюды из основной массы кимберлитовых трубок Хомпу-Майского поля:

a – слюда с пятнистой обратной зональностью из основной массы кимберлитовой трубки Эрэл; *б* – слюда с обратной геометрической зональностью из основной массы кимберлитовой трубки Турахская; *г* – слюда с геометрической обратной зональностью из основной массы кимберлитовой трубки Турахская; *д* – слюда с прямой зональностью из основной массы

кимберлитовой трубки Турахская; *d, e* – визуализация линейного сканирования зональной слюды из основной массы кимберлитовой трубки Манчары; *Ap* – апатит, *Phl* – минералы ряда флогопит–киношталит, *Srp* – серпентин. BSE.

Fig. 4. Zoning of groundmass mica from kimberlite pipes of the Khompu-May field:

a – groundmass mica with a patchy reverse zoning from the Erel kimberlite pipe; *b* – groundmass mica with a reverse geometric zoning from the Turakhskaya kimberlite pipe; *c* – groundmass mica with a geometric reverse zoning from the Turakhskaya kimberlite pipe; *d* – groundmass mica with a normal zoning from the Turakhskaya kimberlite pipe; *e* – visualization linear scanning of zonal groundmass mica from the Manchary kimberlite pipe; *Ap* – apatite, *Phl* – minerals of the phlogopite-kinoshitalite series, *Srp* – serpentine. BSE.

ках Эрэл, им. Артемова и Манчары (см. таблицу). Калиевый киношталит зафиксирован в единичном случае в основной массе породы трубки Турахская (BaO 15,14 %).

Мелкие изометричные, идиоморфные и ксеноморфные зерна бариевой слюды основной массы кимберлитов даек Снэп Лейк [2] и Джос, кимберлитовых комплексов Чикен Парк, Айрон Маунтин и Бунуду, кимберлитовых трубок Элвин Бэй, Шенгли и Юбилейная [3] также характеризуются зональным строением. По составу эти слюды являются барийсодержащими и бариевыми флогопитами. Содержания BaO в барийсодержащем флогопите мезостазиса дайки Снэп Лейк, трубки Элвин Бэй и пород комплекса Чикен Парк составляют 0,40–3,51 % [2], 2,54 и 0,78–2,05 % [3] соответственно. Бариевый флогопит основной массы дайки Снэп Лейк, трубки Элвин Бэй, трубки Шенгли, дайки Джос, пород комплексов Айрон Маунтин и Чикен Парк характеризуются содержаниями BaO 3,76–15,65 % [2], 5,82–12,63, 7,69–12,58, 3,58–6,15, 4,74–11,24 и 3,67–5,10 % [3] соответственно. Данные по зональной слюде из трубки Юбилейная представлены пятью анализами – это барийсодержащий флогопит (BaO 0,37 и 2,62 %), бариевый флогопит (BaO от 4,93 до 9,25 %) и калиевый киношталит (BaO 16,01 %) [3]. Калиевый киношталит (BaO от 16,23 до 21,22 %) также отмечается в кимберлитах дайки Джос [3] и силлов Бенфонтейн. В последнем случае минерал представлен незональными пластинками с высокими концентрациями BaO (15,9–23,8 %) [3].

Вариации состава слюды прослеживаются на графике Al–Ba/(Ba+K) Тапперта [22], иллюстрирующем изменение кристаллохимии исследуемых минералов от барийсодержащего флогопита до калиевого киношталита (рис. 5). Барийсодержащий флогопит из трубки Манчары характеризуется пониженными концентрациями оксида алюминия (см. рис. 5). Такие низкие содержания Al_2O_3 , по всей видимости, связаны с ранней кристаллизацией макро- и мегакристаллов флогопита в трубке Манчары [18].

Для слюды основной массы наблюдаются два морфологически различных типа зональности – геометрическая (см. рис. 3, *a, z, e, k-n*; рис. 4, *b, v, z*) и пятнистая (см. рис. 3, *v, z*, рис 4, *a*). В большинстве случаев особенности зонирования зерен проявляются в хаотичном расположении ксеноморфных (пятнистая зональность) и кристаллографически оформленных (геометрическая зональность), разноокрашенных в обратнорассеянных электронах участков (см. рис. 3, 4). Формирование геометрического типа зональности связано с понижением концентрации бария от центра к краю (см. рис. 3, 4) в результате падения пересыщения [23]. Центральные части таких зональных зерен представлены барийсодержащим флогопитом (BaO 1,77–3,34 %), бариевым флогопитом (BaO 6,79–10,54 %) и в единичных случаях калиевым киношталитом (BaO 15,14 %), а периферийные – флогопитом. В этом случае речь идет об обратной зональности по содержанию бария, которая характерна для слюды основной массы всех изученных трубок. Присутствие в центральных частях отдельных зерен зон с неровными границами (см. рис. 3, *z, l, m, o*) может свидетельствовать о перерыве в кристаллизации чешуек слюды и частичном их растворении.

Прямой тип зональности выявлен только для единичных зерен слюды мезостазиса кимберлитов трубки Турахская (см. рис. 4, *z*), где наблюдаются внешние дискретные каймы бариевого флогопита (Ba 0,24 ф.е.), появление которых может быть связано либо с кристаллизацией, либо с реакционным замещением на позднемагматической стадии [3].

Локальные повышения концентраций BaO в слюде, проявляющиеся в виде пятнистой зональности кристаллов, по всей видимости, также связаны с реакционным замещением (см. рис. 3, *v, z*) [24]. Таким типом зональности характеризуются слюды из трубок Эрэл и им. Артемова.

Во флогопитах основной массы дайки Снэп Лейк также преобладает обратная зональность и в меньшей степени встречается прямая [2]. Прямой тип зональности установлен для слюды из

Представительные анализы слюды основной массы кимберлитовых пород Хомпу–Майского поля

Representative analyses of groundmass mica of kimberlite rocks of the Khompu-May field

Объект/Object	Оксиды, %/Oxides, %								Атомы, ф.е. (на 11 кислорода) / Atoms, apfu (11 oxygens)							
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _{общ}	MgO	BaO	K ₂ O	Сумма	Si	Ti	Al	Fe	Mg	Ba	K	Сумма
Флогопит/Phlogopite																
Эрэл/Erel	38,09	2,29	14,88	5,73	24,66	0,00	10,37	96,02	2,72	0,12	1,25	0,34	2,62	0,00	0,94	8,00
Турахская/Turakhskaya	40,56	4,05	14,11	5,75	22,88	0,00	9,72	97,07	2,84	0,21	1,16	0,34	2,38	0,00	0,87	7,80
Артемова/ Artemova	40,27	2,26	11,00	7,27	24,99	0,00	10,16	95,95	2,89	0,12	0,93	0,44	2,67	0,00	0,93	7,99
Апрельская/Аprelskaya	39,35	1,88	12,67	6,09	24,29	0,00	9,78	94,06	2,86	0,10	1,08	0,37	2,63	0,00	0,91	7,95
Манчары/Manchary	41,72	0,94	9,40	7,31	24,84	0,00	10,03	94,24	3,04	0,05	0,81	0,45	2,70	0,00	0,93	7,97
Барийсодержащий флогопит/Barium-bearing phlogopite																
Эрэл/Erel	37,35	0,00	17,36	3,47	23,22	3,34	10,29	95,03	2,68	0,00	1,47	0,21	2,49	0,09	0,94	7,89
Эрэл/Erel	37,18	1,17	17,87	4,02	23,71	0,86	10,34	95,15	2,66	0,06	1,51	0,24	2,52	0,02	0,94	7,96
Артемова/ Artemova	38,50	1,52	12,84	5,73	23,69	2,30	9,61	94,19	2,81	0,08	1,10	0,35	2,58	0,07	0,89	7,89
Артемова/ Artemova	38,60	1,65	9,32	8,97	24,94	1,77	9,78	95,03	2,85	0,09	0,81	0,55	2,74	0,05	0,92	8,02
Манчары/Manchary	39,37	0,31	9,83	5,95	27,02	3,25	9,10	94,83	2,87	0,02	0,84	0,36	2,93	0,09	0,85	7,96
Манчары/Manchary	39,73	0,00	9,15	6,50	26,01	2,87	10,38	94,64	2,92	0,00	0,79	0,40	2,85	0,08	0,97	8,02
Бариевый флогопит/Barian phlogopite																
Эрэл/Erel	33,45	0,00	19,41	3,27	21,79	9,36	7,46	94,74	2,43	0,00	1,66	0,20	2,36	0,27	0,69	7,62
Эрэл/Erel	33,29	0,00	20,37	4,43	21,87	8,64	6,90	95,50	2,40	0,00	1,73	0,27	2,35	0,24	0,63	7,63
Турахская/Turakhskaya	33,80	0,00	13,92	2,23	25,16	15,03	5,50	95,64	2,46	0,00	1,19	0,14	2,73	0,43	0,51	7,46
Турахская/Turakhskaya	34,92	2,21	17,52	3,83	22,62	8,55	7,04	96,69	2,48	0,12	1,47	0,23	2,40	0,24	0,64	7,57
Артемова/ Artemova	31,61	0,00	21,23	4,27	22,16	7,45	7,10	93,82	2,32	0,00	1,84	0,26	2,42	0,21	0,66	7,72
Апрельская/Аprelskaya	34,74	0,00	16,43	4,32	22,35	9,80	6,80	94,44	2,54	0,00	1,42	0,26	2,44	0,28	0,63	7,58
Апрельская/Аprelskaya	36,43	0,00	15,54	6,31	22,33	6,79	7,90	95,30	2,65	0,00	1,33	0,38	2,42	0,19	0,73	7,71
Манчары/Manchary	35,94	0,00	13,38	4,41	26,42	10,31	6,32	96,78	2,57	0,00	1,13	0,26	2,82	0,29	0,58	7,65
Манчары/Manchary	34,48	0,00	16,26	3,63	24,77	10,54	6,72	96,40	2,48	0,00	1,38	0,22	2,65	0,30	0,62	7,63
Калиевый кинситалит/Potassium kinoshitalite																
Турахская/Turakhskaya	32,06	0,00	14,94	2,79	25,04	15,14	4,31	94,28	2,36	0,00	1,30	0,17	2,75	0,44	0,41	7,43

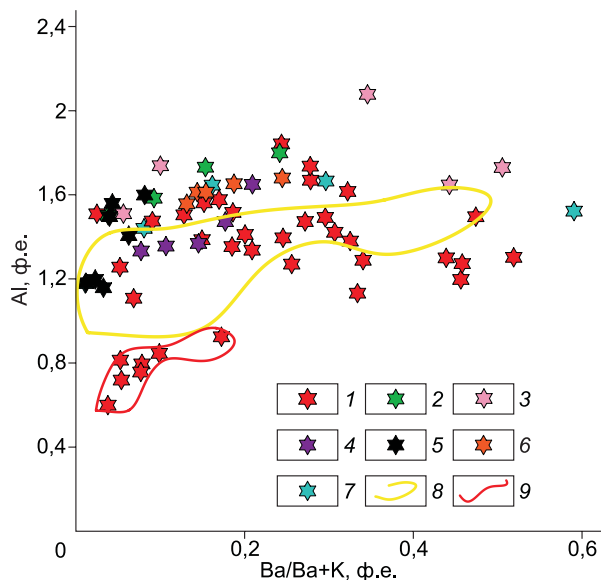


Рис. 5. Особенности состава минералов ряда флогопит–киноситалит основной массы из трубок Хомпу-Майского поля в координатах Al–Ba/(Ba+K) [21]:

1 – Хомпу-Майское поле, 2 – Элвин Бэй, 3 – Джос, 4 – Айрон Маунтин, 5 – Чикен Парк, 6 – Шенгли Бэй, 7 – Юбилейная, 8 – область составов бариевой слюды Снэп Лейк, 9 – область составов барийсодержащего флогопита трубки Манчары.

Fig. 5. Al versus Ba/(Ba+K) [21] compositional variation of groundmass minerals of phlogopite-kinoshitalite series from pipes of the Khompu-May field:

1 – Khompu-May field, 2 – Elwin Bay, 3 – Jos, 4 – Iron Mountain, 5 – Chiken Park, 6 – Shengli, 7 – Yubileynaya, 8 – composition field of barium mica from Snap Lake, 9 – composition field of barium-bearing phlogopite from the Manchary pipe.

основной массы дайки Джос [3], кимберлитовых комплексов Чикен Парк и Айрон Маунтин [3], кимберлитовых трубок Элвин Бэй, Шенгли и Юбилейная [3]. В слюдах мезостазиса пород трубки Шенгли установлен еще и осцилляторный тип зональности [3], связанный с периодическим обогащением расплава барием. В кимберлитовых породах поля Бунуду диагностированы слюды с пятнистой зональностью [3]. Обратная геометрическая зональность по барию ранее была выявлена в пластинках флогопита, слагающих ксенолиты слюдитов в кимберлитовой брекчии трубки Манчары [18]. Центральные части зональных зерен из ксенолитов слюдитов содержат BaO до 14,63 %, а периферийные – до 4,84 %. Наличие различных типов зональности говорит о том, что начало формирования минерала на позднемагматической стадии проходило как при высокой концентрации бария в остаточном расплаве, так и при более низких его содержаниях. Бариевые разновидности

слюды из ксенолитов слюдитов кристаллизовались на ранних стадиях магматического процесса под влиянием бариевого метасоматоза [18].

Микрозондовое сканирование по линии фиксирует различные содержания примеси BaO и свидетельствует о выдержанности его концентраций в пределах каждой отдельной зоны (см. рис. 4, д, е). На графике видно, что содержания BaO и Al_2O_3 изменяются обратно пропорционально K_2O и SiO_2 (см. рис. 4, д). Такие взаимоотношения компонентов связаны с изоморфным замещением этих элементов по схеме $Ba^{2+}Al^{3+} \rightarrow K^{+}Si^{4+}$. Наиболее темные в обратнорассеянных электронах зоны не содержат барий (флогопит). Светлые зоны характеризуются более высокими содержаниями BaO и соответствуют барийсодержащему флогопиту, бариевому флогопиту и, в единичных случаях, калиевому киноситалиту. В режиме обратнорассеянных электронов в 70 % случаев наблюдаются только темноокрашенные чешуйки. В этих пластинках, а также в темных участках зональных зерен, в пределах чувствительности метода концентрации бария установлены не были. Такие флогопиты, по всей видимости, кристаллизовались после бариевых разновидностей слюды, о чем свидетельствует преобладание обратного типа зональности в исследуемых минералах. Для слюды основной массы трубок Эрэл, им. Артемова, Манчары и Апрельская максимальные концентрации оксида бария составляют 8,64 %, 7,45, 10,54 и 9,80 % соответственно (см. таблицу) и установлены в центральных зонах, выполненных бариевым флогопитом. Максимальное содержание BaO 15,14 % (центральная светлоокрашенная зона) зафиксировано в минерале из трубки Турахская (см. таблицу). Такой кристаллохимический состав соответствует калиевому киноситалиту. Калиевый киноситалит с содержанием BaO 16,01 % ранее был также зафиксирован в мезостазисе кимберлитовых пород трубки Юбилейная [3]. Кроме того, калиевый киноситалит (BaO от 16,23 до 21,22 %) диагностирован в основной массе кимберлитовых пород дайки Джос. Как в трубке Юбилейная, так и в дайке Джос этот минерал выполняет дискретные каймы на пластинках безбариевой слюды [3]. В целом, для слюд основной массы всех изученных трубок характерны близкие диапазоны содержания бария, что может свидетельствовать о схожих механизмах позднемагматического флюидного режима.

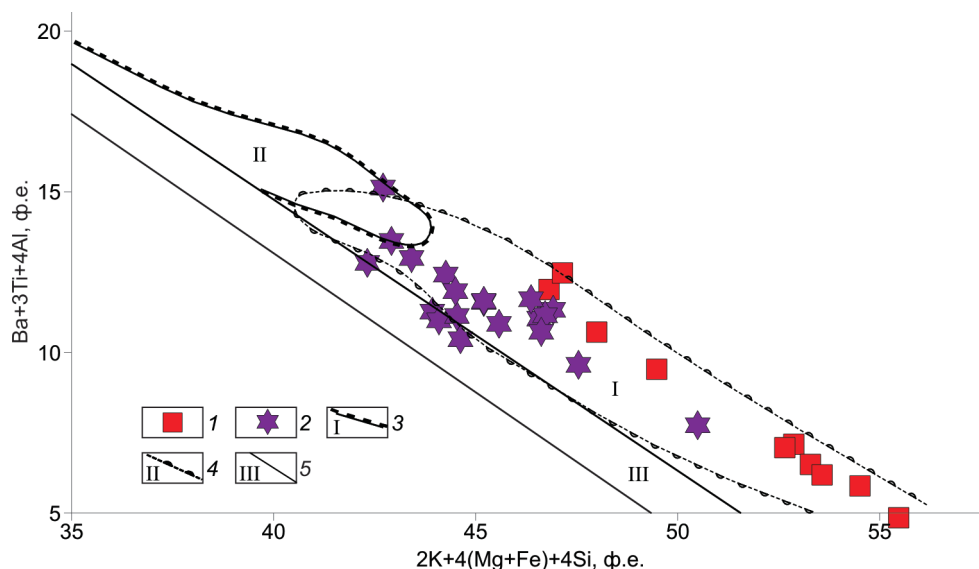


Рис. 6. Составы слюды основной массы из трубок Хомпу-Майского поля в координатах $Ba+3Ti+4Al-K+4(Mg+Fe)+4Si$ [26]. 1 – барийсодержащий флогопит, 2 – бариевый флогопит и калиевый киноситалит, 3 – поле фенокристаллов магматической слюды, 4 – поле магматической слюды основной массы, 5 – поле слюды метаморфических пород.

Fig. 6. $Ba+3Ti+4Al$ versus $K+4(Mg+Fe)+4Si$ compositional variation [26] of groundmass mica from pipes of the Khompu-May field.

1 – barium-bearing phlogopite, 2 – barium phlogopite and potassium kinoshitalite, 3 – field of magmatic mica phenocrystals, 4 – field of magmatic groundmass mica, 5 – field of mica from metamorphic rocks.

Исследуемые разновидности флогопита на диаграмме, предложенной Райтером [25], попадают в поле слюд фенокристаллов магматического генезиса, выделенное для лампроитов, лампрофиров и других щелочных лав [25] (рис. 6). Относить слюду из основной массы кимберлитов Хомпу-Майского поля к фенокристаллам исходя из петрографических данных нельзя. Таким образом, данный график иллюстрирует лишь магматическую принадлежность исследуемой слюды.

В исследуемом флогопите, не содержащем BaO , постоянно присутствует примесь TiO_2 в количестве от 0,94 до 4,05 % (см. таблицу). В единичных случаях он также установлен в бариевых разновидностях слюды основной массы пород всех исследуемых трубок. Его содержания здесь варьируют от 0,31 до 2,21 % (см. таблицу). Такое поведение титана может свидетельствовать о сложной одновременной кристаллизации слюды и оксидных титаносодержащих минералов в основной массе кимберлитовых пород Хомпу-Майского поля. Полученные нами данные подтверждают сделанный ранее Р.Х. Митчеллом вывод о том, что концентрации титана в слюдах кимберлитовых пород не зависят от содержания бария [3].

В кимберлитовых породах Хомпу-Майского поля присутствующая в мезостазисе слюда на-

ходится в ассоциации с апатитом, который также имеет обратную зональность по содержанию стронция и кристаллизовался на позднемагматическом этапе [20] в присутствии флюида [26]. Барий и стронций являются типичными некогерентными микроэлементами в магматических процессах [24, 27], которые синхронно обогащают флюиды в остаточном расплаве и при кристаллизации могут входить в состав слюд и апатита, формируя зональные кристаллы.

В разновидностях слюды основной массы всех исследуемых тел в пределах чувствительности рентгеноспектрального метода концентрации фтора зафиксированы не были. Это связано, по всей вероятности, с совместной кристаллизацией слюды и фторапатита, забирающего фтор из расплава [20].

На диаграмме, предложенной Дж. Гаспаром [8], фигуративные точки составов бариевой слюды основной массы кимберлитовых пород трубок Хомпу-Майского поля образуют единое поле составов и, в целом, не попадают в область слюд из карбонатитов, мелилититов [6] и мантийных перидотитов [8]. Это связано с тем, что слюды из кимберлитов менее железистые, чем из мелилититов, и более железистые, чем из карбонатитов. Слюды основной массы пород тру-

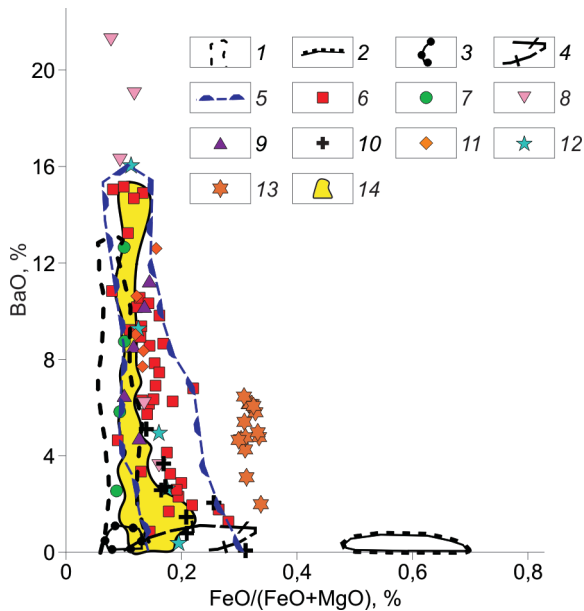


Рис. 7. Особенности состава бариевой слюды основной массы из трубок Хомпу-Майского поля в координатах FeO/(FeO+MgO)–BaO [7]:

1 – карбонатиты массива Якупиранга, 2 – кимберлиты типа I, 3 – мантийные перидотиты, 4 – кимберлиты типа II, 5 – выделенное поле составов слюды кимберлитов Хомпу-Майского поля, 6 – слюда Хомпу-Майского поля, 7 – слюда Элвин Бэй [3], 8 – слюда Джос [3], 9 – слюда Айрон Маунтин [3], 10 – слюда Чикен Парк [3], 11 – слюда Шенгли [3], 12 – слюда Юбилейной [3], 13 – слюда мелилититов [5], 14 – поле составов слюды Снэп Лейк [2].

Fig. 7. BaO versus FeO/(FeO+MgO) compositional variation of groundmass mica from pipes of Khompu-May field [7]: 1 – carbonatites of the Jakupiranga massif, 2 – kimberlites of type I, 3 – mantle peridotites, 4 – kimberlites of type II, 5 – a single field of mica compositions from kimberlites of the Khompu-May field, 6 – mica from Khompu-May field, 7 – mica from Elwin Bay [3], 8 – mica from Jos [3], 9 – mica from Iron Mountain [3], 10 – mica from Chiken Park [3], 11 – mica from Shengli [3], 12 – mica from the Yubileynaya [3], 13 – mica from melilitites [5], 14 – composition field of mica from the Snap Lake [2].

бок Хомпу-Майского поля образуют единую область составов с таковыми из кимберлитов даек Снэп Лейк [2] и Джос, кимберлитовых комплексов Чикен Парк и Айрон Маунтин, кимберлитовых трубок Элвин Бэй, Шенгли и Юбилейная [3] (рис. 7). Это может свидетельствовать о универсальности режимов кристаллизации минералов ряда флогопит–киноситалит на позднемагматической стадии формирования кимберлитов. Частичное перекрытие области карбонатитовых флогопитов и фигуративных точек состава слюды из дайки Снэп Лейк связано с тем, что кимберлиты дайки Снэп Лейк имели контакт с карбонатита-

ми [28] или карбонатитовый флюид взаимодействовал с кимберлитовым расплавом [2].

Заключение

Проведенные исследования показали, что слюда из основной массы кимберлитовых пород, слагающих трубки Эрэл, Турахская, им. Артемова, Апрельская и Манчары представлена следующими разновидностями: флогопит, барийсодержащий флогопит, бариевый флогопит и калиевый киноситалит. Все эти разновидности могут присутствовать в пределах одного зерна, формируя зоны с различным содержанием оксида бария. В результате изучения зональности слюды установлены особенности поведения BaO на позднемагматической стадии формирования кимберлитовых трубок Хомпу-Майского поля. Начало кристаллизации слюды на позднемагматической стадии проходило при высокой концентрации бария в остаточном расплаве, что проявляется в виде обратного типа зональности, который наиболее распространен в слюдах пород Хомпу-Майского поля и характерен для кимберлитовых слюд в целом [2, 3]. Калиевый киноситалит редок и фиксируется в единичных случаях в метазостазисе пород, слагающих трубку Турахская. Совместная кристаллизация стронциевого фтор-апатита [19] и минералов ряда флогопит–киноситалит может свидетельствовать о том, что в их образовании на позднемагматическом этапе принимали участие флюиды, обогащенные стронцием и барием. При завершении кристаллизации слюды возможно обогащение остаточных расплавов барием, что, в редких случаях, приводит к появлению зональности прямого типа.

Анализ литературных и полученных авторами данных позволяет предположить, что появление высокобариевых слюд может быть связано с высокой долей магматического карбоната в кимберлитовых породах, т. е. с повышенными содержаниями CO₂ в расплаве [29]. Так, например, карбонатный кимберлит силлов Бенфонтейн содержит чистый незональный киноситалит [3], а обогащенные кальцитом кимберлитовые дайки Снэп Лейк и Джос содержат бариевый флогопит [2] и калиевый киноситалит [3]. Определить количество магматического карбоната в кимберлитах Хомпу-Майского поля сложно из-за наложенной постмагматической карбонатизации, однако его присутствие подтверждается данными о наличии идиоморфных включений кальцита в шпинелидах трубки Манчары [15].

Проведенный сравнительный анализ строения зональных слюд кимберлитовых пород Хомпу-Майского поля с таковыми из известных кимберлитовых тел мира показал, что режим обогащения бария может быть различным, о чем свидетельствует появление в кристаллах различных типов зональности. Бариевые слюды мезостазиа Хомпу-Майского поля близки к таковым из кимберлитовых тел Снэп Лейк [2], Джос, Чикен Парк, Айрон Маунтин, Элвин Бэй, Шенгли и Юбилейная [3] и образуют с ними единое поле составов, что может свидетельствовать о типоморфизме бариевых кимберлитовых слюд и близких условиях их кристаллизации на позднемагматическом этапе.

Список литературы

1. Доусон Дж. Кимберлиты и ксенолиты в них. М.: Мир, 1983. 300 с.
2. Kopylova M.G., Mogg T., Smith B.S. Mineralogy of the Snap Lake kimberlite, Northwest territories, Canada, and compositions of phlogopite as records of its crystallization // *The Canadian Mineralogist*. 2010. Vol. 48 (3). P. 549–570.
3. Mitchell R.H. Kimberlites, orangeites, and related rocks. New York: Plenum Press, 1995.
4. Костровицкий С.И., Специс З.В., Яковлев Д.А., Фон-дер-Флаас Г.С., Суворова Л.Ф., Богуш И.Н. Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции. Мирный: ООО «МГТ», 2015. 480 с.
5. Velde D. Trioctahedral micas in melilite-bearing eruptive rocks // *Carnegie Institution of Washington Year Book*. 1979. Vol. 78. P. 468–475.
6. Tappe S., Foley S.F., Stracke A., Romer R.L., Kjarsgaard B.A., Heaman L.M., Joyce N. Craton reactivation on the Labrador Sea margins: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age and Sr–Nd–Hf–Pb isotope constraints from alkaline and carbonatite intrusives // *Earth and Planetary Science Letters*. 2007. Vol. 256(3–4). P. 433–454.
7. Birch W.D. Mineralogy and geochemistry of the leucite at Cosgrave, Victoria // *J. Geol. Soc. Australia*. 1978. Vol. 25. P. 369–385.
8. Gaspar J.C., Wyllie P.J. Barium phlogopite from the Jacupiranga carbonatite, Brazil // *American Mineralogist*. 1982. Vol. 67. P. 997–1000.
9. Kogarko L.N., Kurat G., Naflos T. Carbonate metasomatism of the oceanic mantle beneath Fernondo de Naronha Island, Brasil // *Contrib. Miner. Petrol.* 2001. Vol. 140. P. 577–587.
10. Kogarko L.N., Uvarova Y.A., Sokolova E. et al. Oxykinoshitalite, a new species of mica from Fernondo de Naronha Island, Pernambuco, Brasil: occurrence and crystal structure // *Can. Miner.* 2005. Vol. 43. P. 1501–1510.
11. Сметлов А.П., Андреев А.П., Алтухова З.А., Бабушкина С.А., Бекренев К.А., Зайцев А.И., Избеков Э.Д., Королева О.В., Мишин В.М., Округин А.В., Олейников О.Б., Сурнин А.А. Кимберлиты трубки Манчары: новое кимберлитовое поле Центральной Якутии // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51, № 1. С. 153–159.
12. Опарин Н.А., Олейников О.Б., Заякина Н.В. Особенности состава кимберлитов Хомпу-Майского поля по результатам полуколичественного рентгенофазового анализа // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы Всероссийской научно-практической конференции*. Якутск, 2014. С. 341–345.
13. Опарин Н.А., Олейников О.Б., Заякина Н.В. Особенности минерального состава кимберлитовых пород Хомпу-Майского поля // *Арктика XXI век. Технические науки*. 2015. Т. 3, № 1. С. 12–20.
14. Опарин Н.А., Мишин В.М., Андреев А.П., Олейников О.Б., Бабушкина С.А., Заякина Н.В. Особенности состава кимберлитовых пород трубок Дабан и Апрельская // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы Всероссийской научно-практической конференции*. Якутск. 2016. С. 251–254.
15. Опарин Н.А., Олейников О.Б. Хромшпинелиды из трубок Хомпу-Майского кимберлитового поля (Центральная Якутия) // *Отечественная геология*. 2018. № 5. С. 35–41.
16. Опарин Н.А., Олейников О.Б. Макрокристаллы пикроильменита кимберлитовых трубок Хомпу-Майского кимберлитового поля (Центральная Якутия) // *Отечественная геология*. 2019. № 6. С. 43–49.
17. Oparin N., Oleynikov O. Picroilmenite from Kimberlite Pipes of Central Yakutia // 2020 IOP Conf. Ser.: *Earth Environ. Sci.* 2020. 609. 012028.
18. 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.
19. Oparin N., Oleinikov O. Barium phlogopite from kimberlite pipes of Central Yakutia // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. 2018. Vol. 18, Issue 1.1. P. 19–26.
20. 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. 13–24.
21. Номенклатура слюд: заключительный доклад подкомитета по слюдам комиссии по новым минералам и названиям минералов международной минералогической ассоциации (КНМНМ ММА) // *Записки ВМО*. 1998. № 5. С. 55–65.
22. Tappert R., Foden J., Heaman L., Tappert M.C., Zurevinski S.Z., Wills K. The petrology of kimberlites from South Australia: Linking olivine macrocrystic and micaceous kimberlites // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2019. Vol. 373. P. 68–96.
23. Краснова Н.И., Петров Т.Г. Генезис минеральных индивидов и агрегатов. СПб.: Невский курьер, 1995. 228 с.

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

25. Richter K., Carmichael I.S. Phase equilibria of phlogopite lamprophyres from western Mexico: biotite-liquid equilibria and P-T estimates for biotite-bearing igneous rocks // Contrib. Mineral. Petrol. 1996. Vol. 123. P. 1–21.

26. 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.

27. Соловова И.П., Гирнис А.В., Рябчиков И.Д., Сумакин С.Г. Высокотемпературный карбонатитовый расплав и его взаимоотношения с щелочными магма-

ми Дункельдыкского комплекса, юго-восточный Памир // Докл. РАН. 2006. Т. 409. С. 1–4.

28. Agashev A.M., Pokhilenko N.P., Takazawa E., McDonald J.A., Vavilov M.A., Watanabe T., Sobolev N.V. Primary melting sequence of a deep (> 250 km) lithospheric mantle as recorded in the geochemistry of kimberlite-carbonatite assemblages, Snap Lake dyke system, Canada // Chemical Geology. 2008. Vol. 255. P. 317–328.

29. Castillo-Oliver M., Giuliani A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Drysdale R.N., Abersteiner A., Thomasot E., Li X. New constraints on the source, composition, and post-emplacement modification of kimberlites from in situ C–O–Sr-isotope analyses of carbonates from the Benfontein sills (South Africa) // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2020. Vol. 175 (33).

Поступила в редакцию 28.09.2021

Принята к публикации 22.10.2021

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>, e-mail: 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>, e-mail: olei-oleg@yandex.ru.

Информация для цитирования

Опарин Н.А., Олейников О.Б. Минералы ряда флогопит–киношталит основной массы кимберлитовых пород трубок Хомпу-Майского поля (Центральная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 4. С. 29–42. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-29-42>

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-4-29-42

Minerals of the phlogopite-kinoshitalite series from the groundmass of kimberlite rocks in pipes from the Khompu-May field (Central Yakutia)

N.A. Oparin*, O.B. Oleinikov

Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

*nik3256-1989@yandex.ru

Abstract. The present paper discusses the results of a systematic study of mica microcrystals of the phlogopite-kinoshitalite group found in the main body of the Yakut kimberlite province, by the example of mid-Palaeozoic pipes of the Khompu-May kimberlite field in Central Yakutia. Chemical composition and zone distribution of minerals are reported, a comparison is provided with mica, peridotite mantle xenoliths from the kimberlite pipes of Africa, single kimberlite bodies of Canada, Africa, USA, China, and Yakutian kimberlite province, carbonatite massifs of Brazil, and melilitites of Russia. The following mica types were

identified: phlogopite, barium-bearing phlogopite, barian phlogopite, and potassium kinoshitalite. All these types can be found within one grain, defining its zone distribution. The late-stage magmatic character of the mica under investigation was specified, with its composition being caused by barium-rich fluids. Investigation of zoning in flakes allowed us to describe the behavior of BaO in kimberlite formation of the pipes. Similarities and differences in the composition of mica from the Khompu-May kimberlite pipes and kimberlite bodies studied earlier; carbonatites, mantle xenoliths, and melilitites indicate that the mineral is specific for different magmatic systems with barium-rich fluids. Thus, mica composition can be used for comparative studies of kimberlites and other alkaline ultrabasic rocks.

Keywords: phlogopite, barian phlogopite, barium-bearing phlogopite, potassium kinoshitalite, kimberlite pipe, the Khompu-May kimberlite field, Yakutian kimberlite province.

Acknowledgements. The research was carried out as part of the scientific work of the Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS (No. 0381-2019-0003).

References

1. Dawson J. Kimberlity i ksenolity v nih. M.: Mir, 1983. 300 p.
2. Kopylova M.G., Mogg T., Smith B.S. Mineralogy of the Snap Lake kimberlite, Northwest territories, Canada, and compositions of phlogopite as records of its crystallization // The Canadian Mineralogist. 2010. Vol. 48 (3). P. 549–570.
3. Mitchell R.H. Kimberlites, orangeites, and related rocks. New York: Plenum Press, 1995.
4. Kostrovickij S.I., Specius Z.V., Yakovlev D.A., Fonder Flaas G.S., Suvorova L.F., Bogush I.N. Atlas korenyh mestorozhdenij almazov Yakutskoj kimberlitovoj provincii. Mirnyj: OOO «MGT», 2015. 480 p.
5. Velde D. Trioctahedral micas in melilite-bearing eruptive rocks // Carnegie Institution of Washington Year Book. 1979. Vol. 78. P. 468–475.
6. Tappe S., Foley S.F., Stracke A., Romer R.L., Kjarsgaard B.A., Heaman L.M., Joyce N. Craton reactivation on the Labrador Sea margins: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age and Sr–Nd–Hf–Pb isotope constraints from alkaline and carbonatite intrusives // Earth and Planetary Science Letters. 2007. Vol. 256(3–4). P. 433–454.
7. Birch W.D. Mineralogy and geochemistry of the leucite at Cosgrave, Victoria // J. Geol. Soc. Australia. 1978. Vol. 25. P. 369–385.
8. Gaspar J.C., Wyllie P.J. Barium phlogopite from the Jacupiranga carbonatite, Brazil // American Mineralogist. 1982. Vol. 67. P. 997–1000.
9. Kogarko L.N., Kurat G., Ntaflos T. Carbonate metasomatism of the oceanic mantle beneath Fernando de Noronha Island, Brasil // Contrib. Miner. Petrol. 2001. Vol. 140. P. 577–587.
10. Kogarko L.N., Uvarova Y.A., Sokolova E. et al. Ox-kinoshitalite, a new species of mica from Fernando de Noronha Island, Pernambuco, Brasil: occurrence and crystal structure // Can. Miner. 2005. Vol. 43. P. 1501–1510.
11. Smelov A.P., Andreev A.P., Altuhova Z.A., Babushkina S.A., Bekrenev K.A., Zajcev A.I., Izbekov E.D., Koroleva O.V., Mishnin V.M., Okrugin A.V., Olejnikov O.B., Surnin A.A. Kimberlity trubki Manchary: novoe kimberlitovoe pole Central'noj Yakutii // Geologiya i geofizika. 2010. Vol. 51. No. 1. P. 153–159.
12. Oparin N.A., Olejnikov O.B., Zayakina N.V. Osobennosti sostava kimberlitov Hompu-Majskogo polya po rezul'tatam polukolichestvennogo rentgenofazovogo analiza // Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Yakutsk, 2014. P. 341–345.
13. Oparin N.A., Olejnikov O.B., Zayakina N.V. Osobennosti mineral'nogo sostava kimberlitovyh porod Hompu-Majskogo polya // Arktika XXI vek. Tekhnicheskie nauki. 2015. No. 1. Vol. 3. P. 12–20.
14. Oparin N.A., Mishnin V.M., Andreev A.P., Olejnikov O.B., Babushkina S.A., Zayakina N.V. Osobennosti sostava kimberlitovyh porod trubok Daban i Aprel'skaya // Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Yakutsk, 2016. P. 251–254.
15. Oparin N.A., Olejnikov O.B. Hromshpinelidy iz trubok Hompu-Majskogo kimberlitovogo polya (Central'naya Yakutiya) // Otechestvennaya geologiya. No. 5. 2018. P. 35–41.
16. Oparin N.A., Olejnikov O.B. Makrokristally pikroil'menita kimberlitovyh trubok Hompu-Majskogo kimberlitovogo polya (Central'naya Yakutiya) // Otechestvennaya geologiya. 2019. No. 6. P. 43–49.
17. Oparin N., Olejnikov O. Picroilmenite from Kimberlite Pipes of Central Yakutia // 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. 609. 012028.
18. Oparin N.A., Olejnikov O.B., Babushkina S.A. Flo-gopit iz trubok Manchary i Aprel'skaya (Hompu-Majskoe kimberlitovoe pole, Central'naya Yakutiya) // Otechestvennaya geologiya. 2017. No. 5. P. 37–44.
19. Oparin N., Olejnikov O. Barium phlogopite from kimberlite pipes of Central Yakutia // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. 2018. Vol. 18, Issue 1.1. P. 19–26.
20. Oparin N.A., Olejnikov O.B., Baranov L.N. Apatit iz kimberlitovoj trubki Manchary (Central'naya Yakutiya) // Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики. 2020. Vol. 25, No 3. P. 13–24.

21. *Nomenklatura slyud: zaklyuchitel'nyj doklad podkomiteta po slyudam komissii po novym mineralam i nazvaniyam mineralov mezhdunarodnoj mineralogicheskoy assotsiatsii (KNMNM MMA)* // Zapiski VMO. 1998. No. 5. P. 55–65.
22. *Tappert R., Foden J., Heaman L., Tappert M.C., Zurevinski S.Z., Wills K.* The petrology of kimberlites from South Australia: Linking olivine macrocrystic and micaceous kimberlites // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2019. Vol. 373. P. 68–96.
23. *Krasnova N.I., Petrov T.G.* Genezis mineral'nyh individov i agregatov. Sankt-Peterburg.: Nevskij kur'er, 1995. 228 p.
24. *Solovova I.P., Girnis A.V., Ryabchikov I.D., Kononkova N.N.* Mekhanizmy obrazovaniya vysokobarievogo flogopita i vysokostroicievogo apita na zaklyuchitel'nyh stadiyah evolyucii shchelochnyh magm // Geohimiya. 2009. No. 6. P. 613–627.
25. *Righter K., Carmichael I.S.* Phase equilibria of phlogopite lamprophyres from western Mexico: biotite-liquid equilibria and P-T estimates for biotite-bearing igneous rocks // Contrib. Mineral. Petrol. 1996. Vol. 123. P. 1–21.
26. *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.
27. *Solovova I.P., Girnis A.V., Ryabchikov I.D., Simakin S.G.* Vysokotemperaturnyj karbonatitovyj rasplav i ego vzaimootnosheniya s shchelochnymi magmami Dunkel'dybskogo kompleksa, yugo-vostochnyj Pamir // Dokl. RAN. 2006. Vol. 409. P. 1–4.
28. *Agashev A.M., Pokhilenko N.P., Takazawa E., McDonald J.A., Vavilov M.A., Watanabe T., Sobolev N.V.* Primary melting sequence of a deep (> 250 km) lithospheric mantle as recorded in the geochemistry of kimberlite-carbonatite assemblages, Snap Lake dyke system, Canada // Chemical Geology. 2008. Vol. 255. P. 317–328.
29. *Castillo-Oliver M., Giuliani A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Drysdale R.N., Abersteiner A., Thomasot E., Li X.* New constraints on the source, composition, and post-emplacement modification of kimberlites from in situ C–O–Sr-isotope analyses of carbonates from the Benfontein sills (South Africa) // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2020. Vol. 175 (33).

About the authors

OPARIN, Nikolay Alexandrovich, junior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-3019-1245>, e-mail: nik3256-1989@yandex.ru;
OLEYNIKOV, Oleg Borisovich, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), leading researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-1010-7592>, e-mail: olei-oleg@yandex.ru.

Citation

Oparin N.A., Oleynikov O.B. Minerals of the phlogopite-kinoshitalite series from the groundmass of kimberlite rocks in pipes from the Khompu-May field (Central Yakutia) // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 4. P. 29–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-29-42>