

Кристаллические включения в Ва-Fe-титанатах и цирконе сидеритовых пород массива Томтор, Республика Саха (Якутия): ключ к пониманию их генезиса

Лазарева Е. В.^{id}, Шарыгин В. В.^{id}, Рашенко С. В.^{id}, Толстов А. В.^{id}, Жмодик С. М.^{id}

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск, lazareva@igm.nsc.ru

Аннотация. Брэдлиит, фторапатит, ханнешит и флогопит были выявлены в качестве главных минеральных включений в Ва-Fe-титанатах (минералы групп кричтонита и прайдерита) и цирконе в сидерит-гидрослюдистых породах массива Томтор. Помимо этого, в этих минералах были обнаружены сидерит, горсейксит, рутил, бадделиит, кальцит, магнезит и неидентифицированный К-фосфат. Циркон и Ва-Fe-титанаты совместно с хромитом являются реликтовыми минералами в сидеритовых породах Томтора. Высокощелочной состав включений в этих минералах указывает на их вероятный источник – щелочные породы массива Томтор. Идентификация включений и их минерала-хозяина производилась методами сканирующей микроскопии, микрозондового анализа и Рамановской спектроскопии.

Ключевые слова: брэдлиит, фторапатит, ханнешит, флогопит, группа кричтонита, группа прайдерита, циркон, массив Томтор.

Crystal inclusions in Ba-Fe titanates and zircon from siderite rocks of Tomtor massif, Sakha Republic (Yakutia): a key to understanding of their genesis

Lazareva E. V.^{id}, Sharygin V. V.^{id}, Rashchenko S. V.^{id}, Tolstov A. V.^{id}, Zhmodik S. M.^{id}

V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, lazareva@igm.nsc.ru

Abstract. Bradleyite, fluorapatite, hanneshite and phlogopite have been found as the main mineral inclusions in Ba-Fe-titanates (crichtonite- and priderite-group minerals) and zircon from siderite-hydromica rocks of the Tomtor massif. Additionally siderite, gorceixite, rutile, baddeleyite, calcite, magnesite and unidentified K-phosphate were observed in these host minerals. Zircon and Ba-Fe-titanates plus chromite are to be relic minerals for the Tomtor siderite rocks. High-alkali composition of inclusions in the minerals indicates on their probable source, namely on initial magmatic alkaline rocks of the Tomtor massif. The identification of inclusions and their host minerals was performed by using of scanning microscopy, microprobe and Raman spectroscopy.

Keywords: bradleyite, fluorapatite, hanneshite, phlogopite, crichtonite group, priderite group, zircon, Tomtor massif.

Введение

Натровые и натрий-содержащие карбонаты и карбонат-фосфаты («ньеререит», шортит, нортупит, эйтелит, бонштедтит, брэдлиит и др.) иногда присутствуют в виде включений в оливине, магнетите, ильмените, бадделиите, цирконе, перовските, флюорите и пирите в породах щелочно-карбонатитовых комплексов (Михайлова и др., 2002; Андреева и др., 2006; Соколов и др., 2006; Шарыгин и др., 2011; Андреева, 2014; Шарыгин, 2024; Kogarko et al., 1991; Nielsen et al., 1997; Veksler et al., 1998; Zaitsev, Chakhmouradian, 2002; Zaitsev et al., 2004, 2015; Panina, 2005; Chen et al., 2013; Sharygin, Doroshkevich, 2017; Potter et al., 2020; Chayka et al., 2021, 2023; Doroshkevich et al., 2021; Kamenetsky et al., 2021; Kozlov et al., 2021; Prokopyev et al., 2021). В ходе исследования состава пород «сидеритового горизонта», подстилающего богатые Nb-REE руды месторождения Томтор, впервые в истории изучения массива выявлены Ва-Fe-титанаты, изобилующие включениями разнообразных минералов, основными из которых являются карбонат-фосфаты, карбонаты и фосфаты щелочных, щелочноземельных и редкоземельных элементов. В данной работе приводится первое описание этих включений и содержащих их минералов (Ва-Fe-титанаты и циркон).

Объект исследования

Томторский массив щелочных пород и карбонатитов располагается на севере Сибирской платформы к востоку от Анабарского щита в осевой части Уджинского поднятия (Егоров и др., 1985), на пересечении древнего авлакогена с Молодо-Попигайским вулcano-плутоническим поясом (Тектоника, геодинамика..., 2001). Массив представляет собой кольцевую интрузию центрального типа и является одним из крупнейших в мире карбонатитовых массивов как по общей площади (около 250 км²), так и по размеру карбонатитового ядра (40 км²) (Поршнев, Степанов, 1980, 1981; Толстов, Тянь, 1999; Bagdasarov, 2009 и т. д.). Массив прорывает известняки, доломиты и терригенные метаморфизованные породы неопротерозойского возраста и перекрывается пермскими континентальными, юрскими морскими и четвертичными рыхлыми отложениями.

Внешнее кольцо Томторского массива сложено щелочными и нефелиновыми сиенитами (обладают) и ультрамафитами – фойдолитами (нефелин-пироксеновыми породами ряда якупирангит-мельтейгит, ийолит-мельтейгит) (Багдасаров, 1997; Толстов, Тянь, 1999; Okrugin, Zhuravlev, 2021) (рис. 1).

Ультрамафиты и фойдолиты образуют в средней части неполное кольцо (шириной 1.5–2.0 км), обрамляющее с восточной и западной сторон центральное ядро массива (диаметром 6 км), сложенное породами карбонатитового комплекса с реакционной каймой микроклин-слюдистых ($\pm$ апатит, кальцит) пород. Карбонатитовое ядро представлено породами двух групп, которые на основании содержания Nb и REE подразделяются на безрудные и рудные.

Ещё до обнаружения в пределах массива Nb-REE месторождения на его территории велись поисково-разведочные работы для обнаружения коренных источников алмазов (Охлопков и др., 1987). Была проведена масштабная магнитная съёмка, что позволило на участках выявленных магнитных аномалий обнаружить значительное количество даек и трубок пикритов и альнеитов, прорывающих различные породы массива (рис. 1). На объекте исследования, участке Южный, установлено значительное количество таких аномалий.

На основании определения возраста пород массива Томтор, на сегодняшний день выделено 2 основных события: 1 – около 700 млн лет назад произошло становление щелочного плутона; 2 – около 400 млн лет назад, в пределах массива формировались субвулканические и вулканические структуры со множеством центров (Эрлих, Загрузина, 1981; Энтин и др., 1990; Зайцев и др., 1992; Vladyskin et al., 2014; Skublov et al., 2020). Получены также свидетельства более молодых событий – 323 млн лет и 220 млн лет (Dobretsov et al., 2020). Последние датировки относятся к ультракалийевой породе, вскрытой скважиной при разведочном бурении участка Южный. Рядом с участком проходит крупный разлом, выходящий за пределы массива (рис. 1).

Богатые руды представляют собой три пластовые тела (участки Буранный Северный и Южный, рис. 1), залегающие, как считается, на породах профиля выветривания. Руды уникальны как по составу, так и по гранулометрическим характеристикам вещества – тонкослоистые, криптозернистые, содержат Nb, Y, Sc и REE в высоких концентрациях (Lazareva et al., 2015). Основные минералы руд подразделяются на два типа – терригенные, наследуемые из пород массива, и аутигенные, сформировавшиеся непосредственно в рудах. К первым относятся пироксенолор, оксиды Ti (рутил, Nb-рутил, брукит), циркон, бадделейт, минералы группы хромита; ко вторым – монацит, минералы группы плюмбогуммита, минералы группы каолинита, гётит, сульфиды. Минералы Ti являются одними из основных породообразующих в рудах. Содержание TiO₂ составляет в среднем 6 %, максимальные значения достигают 16 %.

Почти повсеместно руды подстилают породы сидеритового горизонта (Коноплев и др., 1992), генезис которого на данный момент не определён, и его принято считать частью профиля выветривания (Минерагения кор..., 2011). В породах сидеритового горизонта также распространены пироксенолор, циркон, оксиды Ti, наследуемые, вероятнее всего, из пород массива. Большинство скважин при разведочном бурении руд были остановлены в сидеритовом горизонте, и данных о породах, являющихся материнскими для профиля выветривания мало. Судить о составе исходных пород можно по устойчивым, сохранившимся в гипергенных условиях минералам и по включениям в них. Собственно, таковыми являются описываемые в данной работе циркон, Ba-Fe-титанаты, рутил.

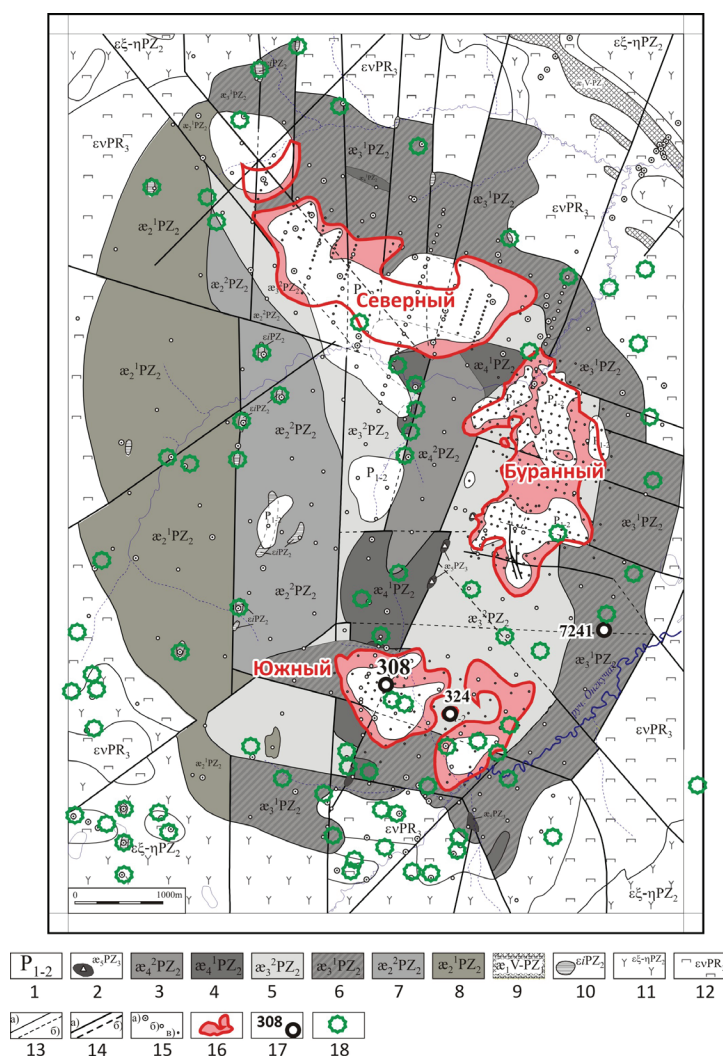


Рис. 1. Схематическая геологическая карта доюрских образований центральной части массива Томтор (составлена по Геологическая карта..., 1998): 1 – континентальные осадочные пермские отложения; 2 – карбонатитовые брекчии; 3 – карбонатиты редкометалльные; 4 – анкерит-шамозитовые породы; 5 – карбонатиты фосфорно-редкометалльные (полиминеральные); 6 – апатит-микроклин-слюдистые породы; 7 – карбонатиты безрудные (кальцитовые и доломит-кальцитовые); 8 – кальцит-микроклин-слюдистые породы; 9 – камафориты; 10 – щелочно-ультраосновные породы альнеит-тингвайтовой серии (альнеиты, щелочные пикриты, тингвайты и др.); 11 – щелочные и нефелиновые сиениты; 12 – фойдолиты (нефелин-пироксенитовые породы ряда якупирангит-уртит); 13 – геологические границы: а – достоверные, б – предполагаемые и погребенные; 14 – тектонические нарушения: а – достоверные, б – предполагаемые и погребенные; 15 – скважины: а – пробуренные до 1985 г., б – пробуренные Эбеляхской ГРП на поисково-оценочной стадии в 1985–1990 гг., в – разведочные, пробуренные по объекту Буранный в 1991–1994 гг.; 16 – контуры участков Северный, Буранный и Южный; 17 – скв. 308, из которого отобрана изучаемая порода; 18 – магнитные аномалии (положение дано по Охлопков и др., 1987)

Fig. 1. Schematic geological map for pre-Jurassic formations in the central part of the Tomtor massif (adopted after Geological map..., 1998): 1 – Permian continental sedimentary deposits; 2 – carbonatite breccias; 3 – rare-metal carbonatites; 4 – ankerite-chamosite rocks; 5 – phosphorus-rare metal carbonatites (polyminerals); 6 – apatite-microcline-mica rocks; 7 – barren carbonatites (calcite and dolomite-calcite); 8 – calcite-microcline-mica rocks; 9 – kamaforites; 10 – alkaline-ultramafic rocks of the alneite-tinguaite series (alneites, alkali picrites, tinguaite, etc.); 11 – alkaline and nepheline syenites; 12 – foidolites (nepheline-pyroxenite rocks of the jacupirangite-urtite series); 13 – geological boundaries: a – certain, b – inferred and buried; 14 – tectonic faults: a – certain, b – inferred and buried; 15 – boreholes: a – drilled before 1985, b – drilled by the Ebeleyakh Exploration Party at the prospecting and evaluation stage in 1985–1990, c – exploration boreholes drilled at the Burannyy site in 1991–1994; 16 – contours of the Severny, Buranny and Yuzhny areas; 17 – borehole 308, from which the studied rock was sampled; 18 – magnetic anomalies (location according to Okhlopov et al., 1987)

Методы исследования

Образец для исследования получен в результате разведочного бурения участка Южный (скв. 308 на глубине 74.5 м) и представлен гидрослюдисто-сидеритовой породой из «сидеритового» горизонта, располагающегося между верхним и нижним рудными горизонтами (Dobretsov et al., 2021).

Фотографии в обратно-рассеянных электронах (BSE), элементные карты, качественный и количественный анализ минералов (по энергодисперсионным спектрам, EDS метод, время набора – 20 с) были выполнены на сканирующем микроскопе TESCAN MIRA3 LMU (ИГМ СО РАН, Новосибирск). Все эти данные были получены с использованием программы INCA Energy 450+ (Oxford Instrument Analytical Ltd.). Условия съемки: $V = 20$ кВ, $I = 1$ нА. В качестве стандартов для большинства элементов были использованы простые оксиды, металлы и силикаты: SiO_2 (Si, O), Al_2O_3 (Al), диопсид (Mg, Ca), альбит (Na), ортоклаз (K), $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ (P), BaF_2 (F), Cr_2O_3 (Cr), пирит (S), хлорapatит (Cl),

Ti, Fe, Mn, Ni, Co и др. Для количественной оптимизации (нормировка на ток зонда, калибровка спектрометра по энергии) применялся Co. Для EDS-анализов подбирались зерна минералов размером более 5 микрон.

Если состав включений карбонатных фаз определялся только на сканирующем микроскопе, то наиболее крупные зерна Ba-Fe-титанатов, циркона и рутила повторно были проанализированы на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-8100 (Jeol Ltd) в ИГМ СО РАН. Параметры съемки: ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток электронного пучка – 10 нА, диаметр электронного пучка – 1–2 мкм, время набора на пике (фоне) для каждого элемента составляло 10 (5 + 5) с. В качестве стандартов использовались: спессартин (Mn), гематит (Fe), диопсид (Mg), альбит (Na, Si, Al), TiO_2 (Ti), хлорапатит (Cl, Ca, P), хромит (Cr), ортоклаз (K), V_2O_5 (V), циркон (Zr), Ba- и Sr- силикатные стекла (Ba, Sr) и ZnFe_2O_4 (Zn). Коррекция на матричные эффекты выполнялась по методу PAP. Ошибка определения главных элементов составляла менее 2 отн. %.

Карбонатные минералы и минерал-хозяин были исследованы рамановским методом с помощью спектрометра LabRAM HR 800 мм (Horiba Scientific), соединенного с ССД детектором и конфокальным микроскопом Olympus BX40 (объектив $\times 100$). Линия 514.5 нм от Nd:YAG лазера и мощность 50 мВт использовались для возбуждения образца. Параметры съемки: 10 накоплений по 10–15 с, фокальная диафрагма 200 мкм. Спектры были зарегистрированы в интервалах 100–1500 и 3000–4000 см^{-1} . Монохроматор был откалиброван по рамановской линии рассеяния для кремния (520.7 см^{-1}).

Результаты

Главными минералами исследуемой породы являются сидерит, гидрослюда (Al-глауконит – иллит ?), каолинит и горсейксит, второстепенными – Ba-Fe-титанаты, рутил (подтвержден Рамановской спектроскопией), циркон, монацит-(Ce), пирит, сфалерит/вюртцит, галенит, иногда тайниолит и калишпат. Ba-Fe-титанаты и циркон содержат большое количество субмикронных минеральных включений (рис. 2).

Доминирующий Ba-Fe-титанат («tomtorite», IMA 2025-020) относится к группе кричтонита (Расцветаева, 2020), а второй Ti-минерал – к группе прайдерита (МГП), надгруппа голландита (Biagioni et al., 2013). Оба минерала образуют ограненные зерна (до 50–100 μm), часто – сростания между собой, при этом МГП более ранний, чем «томторит» (рис. 2 а, б). МГП не очень хорошо сохранился, видны следы растворения, местами остались небольшие реликты в сидерите (рис. 2 г), по которым порой можно угадать очертания когда-то существовавшего кристалла (рис. 2 б). Кристаллы «томторита» сохранились значительно лучше, но в некоторых случаях разбиты трещинами и даже разломаны, а трещины заполнены сидеритом (рис. 2 в). Взаимоотношения циркона с «томторитом» и МГП наблюдались очень редко (рис. 2 е), при этом циркон кристаллизовался раньше «томторита», но позже МГП. Ещё один минерал Ti – рутил представлен сростками кристаллов (рис. 2 г, д), и включений, как правило, не содержит. В единственном случае внутри минерала наблюдались тонкие реликты МГП (рис. 2 г). Сидерит формирует обособленные стяжения, внутри которых помимо перечисленных минералов наблюдаются выделения и зональные кристаллы горсейксита (рис. 2). Стяжения сидерита располагаются в тонкозернистой массе гидрослюды, частично замещённой минералом группы каолинита. Ba-Fe-титанаты и циркон установлены также и в гидрослюдистой матрице. В целом, взаимоотношения минералов в сидеритовой породе указывают на следующий порядок кристаллизации для циркона и оксидов Ti (рис. 2): МГП → циркон → «томторит» → рутил.

Идеальная формула «томторита» – $\text{BaMnFe}^{2+}_2(\text{Fe}^{3+}_4\text{Ti}_2)\text{Ti}_{12}\text{O}_{38}$ (пространственная группа R-3, параметры ячейки: $a = 10.447(2) \text{ \AA}$, $c = 20.882(4) \text{ \AA}$; $V = 1973.8(7) \text{ \AA}^3$; $Z = 3$; данные С. В. Рашенко, ИГМ СО РАН). Минерал является Ba-аналогом кричтонита $\text{SrMnFe}^{2+}_2(\text{Fe}^{3+}_4\text{Ti}_2)\text{Ti}_{12}\text{O}_{38}$. Состав существенно варьирует (в мас. %, $n = 562$): BaO – 3.7–4.4; TiO_2 – 58.3–62.4; FeO_{tot} – 20.5–24.6; ZrO_2 – 0.4–2.4; Nb_2O_5 – 1.5–4.5; Cr_2O_3 и V_2O_5 – 0.2–1.5; ZnO – 0.1–0.9; SrO и PbO – 0.1–0.7; Na_2O – 0.3–0.6; K_2O – 0.2–1.0. Иногда в кристаллах фиксируется зональность с чередованием зон, обогащенных Nb, Nb+K, K, K-Fe-Nb и Cr (рис. 3). В целом, концентрации гипотетических

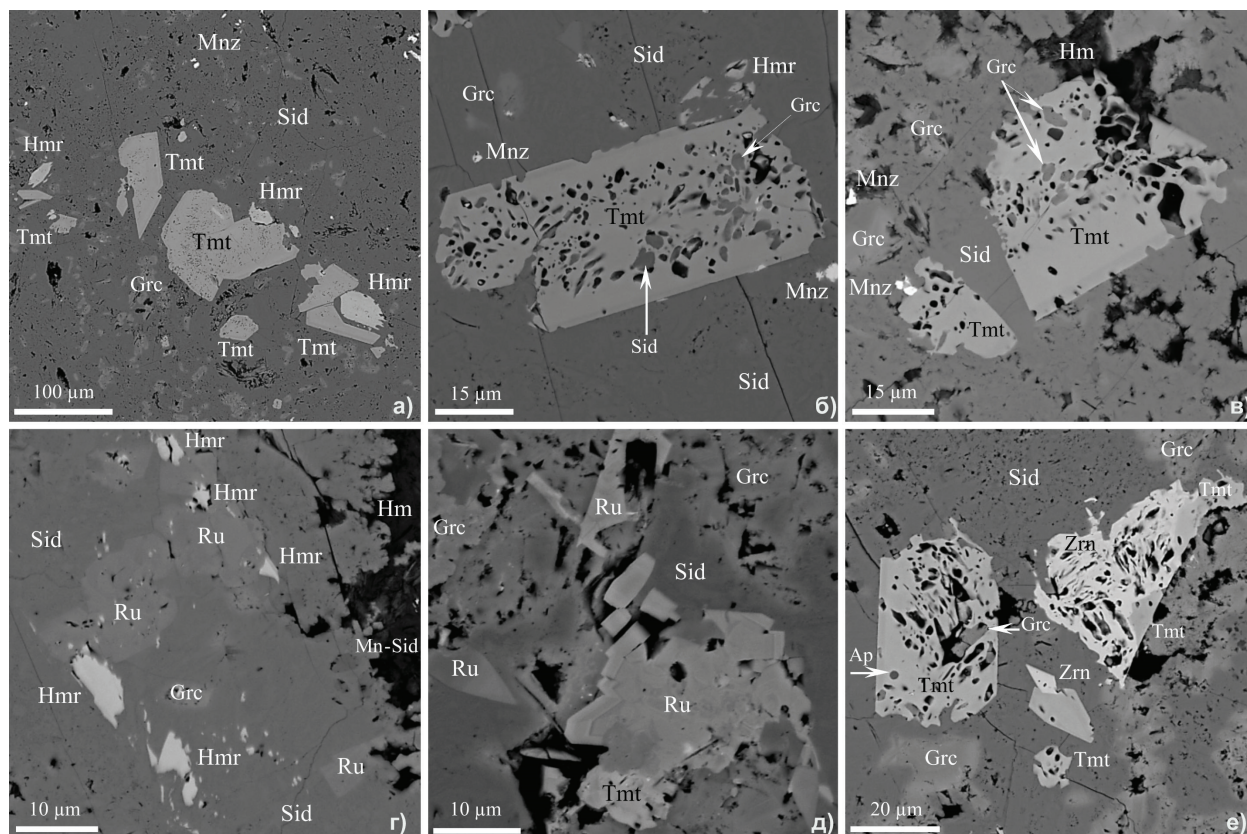


Рис. 2. Взаимоотношения рудных оксидных минералов в гидрослюдисто-сидеритовой породе массива Томтор (BSE фотографии): Sid – сидерит; Mnz – монацит-(Ce); Tmt – «томторит», группа кричтонита; Hmr – неидентифицированный Ba-Fe³⁺ – титанат, группа прайдерита; Grc – горсейксит, группа плюмбогуммита; Hm – гидрослюда; Ru – рутил; Zrn – циркон; Ap – фторапатит

Fig. 2. Relationships of ore oxide minerals in the hydromica-siderite rock, Tomtor massif (BSE images): Sid – siderite; Mnz – monazite-(Ce); Tmt – «tomtorite», crichtonite group; Hmr – unidentified Ba-Fe³⁺ – titanate, priderite group; Grc – gorceixite, plumbogummite group; Hm – hydromica; Ru – rutile; Zrn – zircon; Ap – fluorapatite

К- и Na-миналов могут достигать 25–30 мол. % (каждый), а усредненный состав «томторита» близок к $(\text{Ba}_{0.5}\text{Na}_{0.25}\text{K}_{0.25})\text{Mn}(\text{Fe}^{2+}_{1.5}\text{Fe}^{3+}_{0.5})(\text{Fe}^{3+}_4\text{Ti}_2)\text{Ti}_{12}\text{O}_{38}$.

Второй Ba-Fe-титанат (МГП) имеет идеальную формулу $\text{Ba}(\text{Fe}^{3+}_2\text{Ti}_6)\text{O}_{19}$ (пространственная группа *I4/m*, параметры ячейки: $a = 10.174(2) \text{ \AA}$, $c = 2.967(2) \text{ \AA}$, $V = 307.1(2) \text{ \AA}^3$, $Z = 2$; данные С. В. Рашенко, ИГМ СО РАН) и является Fe³⁺-аналогом генримейерита $\text{Ba}(\text{Fe}^{2+}\text{Ti}_7)\text{O}_{16}$ (Mitchell et al., 2000) и Ba-аналогом прайдерита $\text{K}(\text{Fe}^{3+}\text{Ti}_7)\text{O}_{16}$. Иногда проявляется зональность: центр обогащен Cr, а край – K. Вариации состава (в мас. %, $n = 112$): TiO_2 – 61.9–67.9; Nb_2O_5 и PbO – 0.0–0.6; Cr_2O_3 – 0.4–4.5; V_2O_3 – 0.4–2.2; FeO_t – 11.6–14.6; BaO – 12.0–17.5; K_2O – 0.6–2.5. В миналах (в мол. %): $\text{Ba}(\text{Fe}^{3+}_2\text{Ti}_6)\text{O}_{19}$ – 51.8–70.0; прайдерит $\text{K}(\text{Fe}^{3+}\text{Ti}_7)\text{O}_{16}$ – 10.3–39.8; генримейерит $\text{Ba}(\text{Fe}^{2+}\text{Ti}_7)\text{O}_{16}$ – 0.0–9.9; реддледжит $\text{Ba}(\text{Cr}^{3+}_2\text{Ti}_6)\text{O}_{19}$ – 1.2–20.7; маннардит $\text{Ba}(\text{V}^{3+}_2\text{Ti}_6)\text{O}_{19}$ – 1.4–9.9.

Составы циркона и рутила на данном этапе исследований изучались менее подробно. Зёрна циркона метамиктные, имеют неоднородности состава и содержат постоянные примеси Sc_2O_3 (0.2–0.5 мас. %); Ce_2O_3 (до 0.4 мас. %); ThO_2 (до 1.1 мас. %). Концентрации HfO_2 минимальны (< 0.01 мас. %). Кристаллы рутила зональные по составу (рис. 2 д), что обеспечивается колебанием содержаний FeO_t от 1.5 до 5 мас. % и Nb_2O_5 от 1 до 11 мас. %, а в отдельных зонах – до 16–17 мас. %. Краевые части кристаллов обогащены примесными элементами больше, чем центральные.

Включения в Ba-Fe-титанатах распределены закономерно и декорируют зоны роста минерала-хозяина (рис. 3). Они характерны для срединных частей кристалла, краевые зоны, как правило, не содержат включений (рис. 3). Большая часть включений имеет размеры 1–3 мкм. На дан-

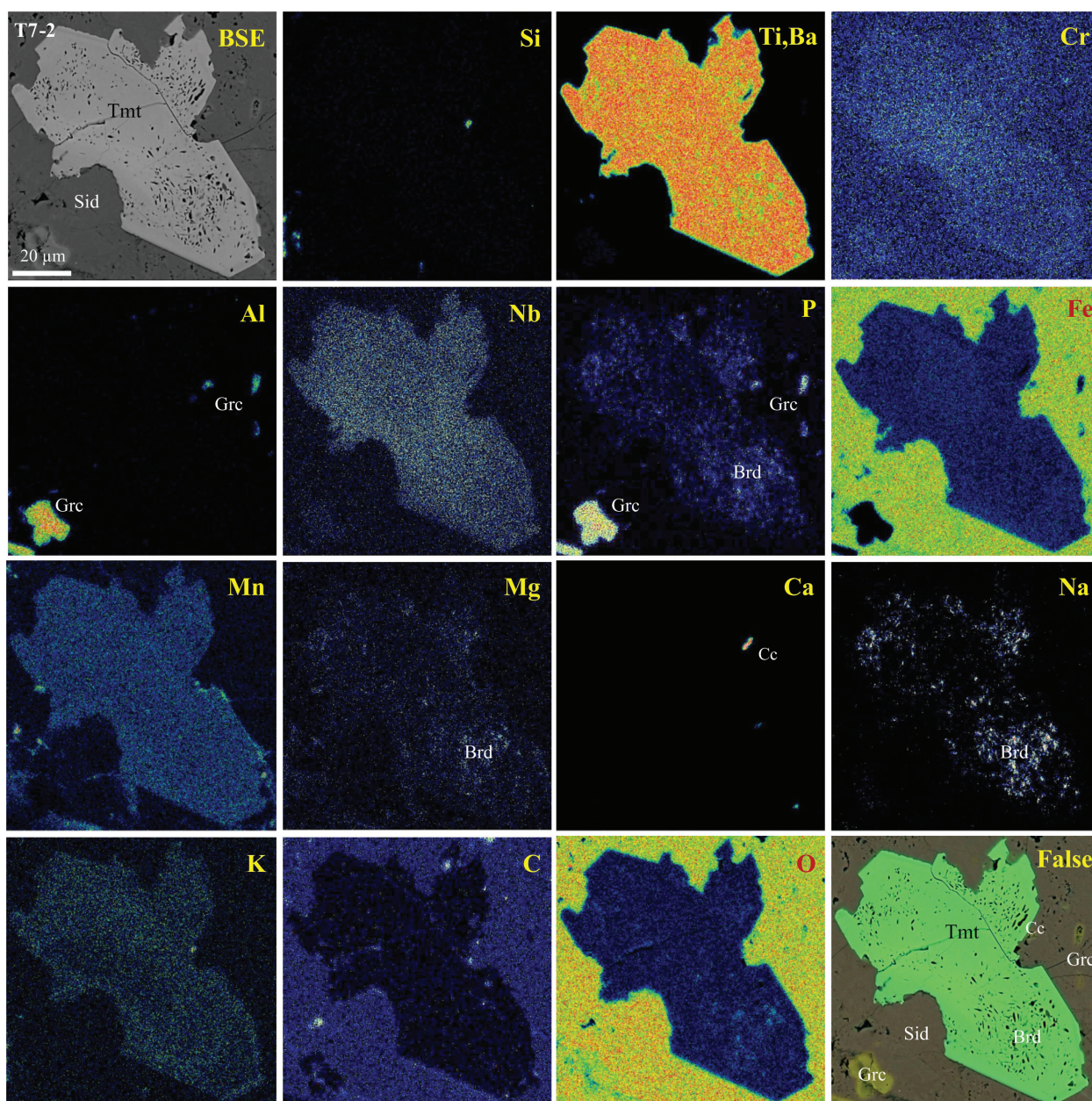


Рис. 3. BSE фотография и элементные карты для зерна «томторита» с обильными включениями брэдлиита, гидрослюдисто-сидеритовая порода, массив Томтор: Cc – кальцит; остальные символы на рис. 2. False – цветовой аналог BSE фотографии (цветовая гамма по общей массе соединения)

Fig. 3. BSE image and elemental maps for a «tomtorite» grain with abundant bradleyite, hydromica-siderite rock, Tomtor massif: Cc – calcite; other symbols see Fig. 2

ный момент установлено 14 минералов среди включений в Ва-Fe-титанатах и цирконе: брэдлиит $\text{Na}_3\text{Mg}(\text{CO}_3)(\text{PO}_4)$ (рис. 3, 4), фторапатит $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH})$, минерал группы бурбанкита – ханнешит $(\text{Na}, \text{Ca})_3(\text{Ba}, \text{Sr}, \text{Ce}, \text{Ca})_3(\text{CO}_3)_5$ (рис. 4 а, б), магнезит MgCO_3 , фосфат калия (?) (рис. 5), горсейскит $\text{BaAl}_3(\text{PO}_4)(\text{PO}_3\text{OH})(\text{OH})_6$ (рис. 2 в), флогопит (рис. 4 г), хромит (?), сидерит (рис. 2 б), рутил (рис. 5), сфалерит/вюртцит (рис. 4 е), пирит, монацит-(Ce), бадделейит (рис. 4 д). Из-за малых размеров идентификация этих фаз проводилась по EDS спектрам и элементным картам, и не удалось получить корректные составы из-за захвата минерала-хозяина. Максимально распространены брэдлиит, фторапатит и флогопит, которые диагностированы достоверно методом КР-спектроскопии. Из-за малого размера включений в спектре брэдлиита присутствуют пики минерала-хозяина (рис. 6). Тем не менее, три характеристических пика для брэдлиита (968 , 1076 , и 589 см^{-1}) были выявлены, что совпадает с Рамановскими данными, полученными ранее для этого минерала (Kozlov et al., 2021;

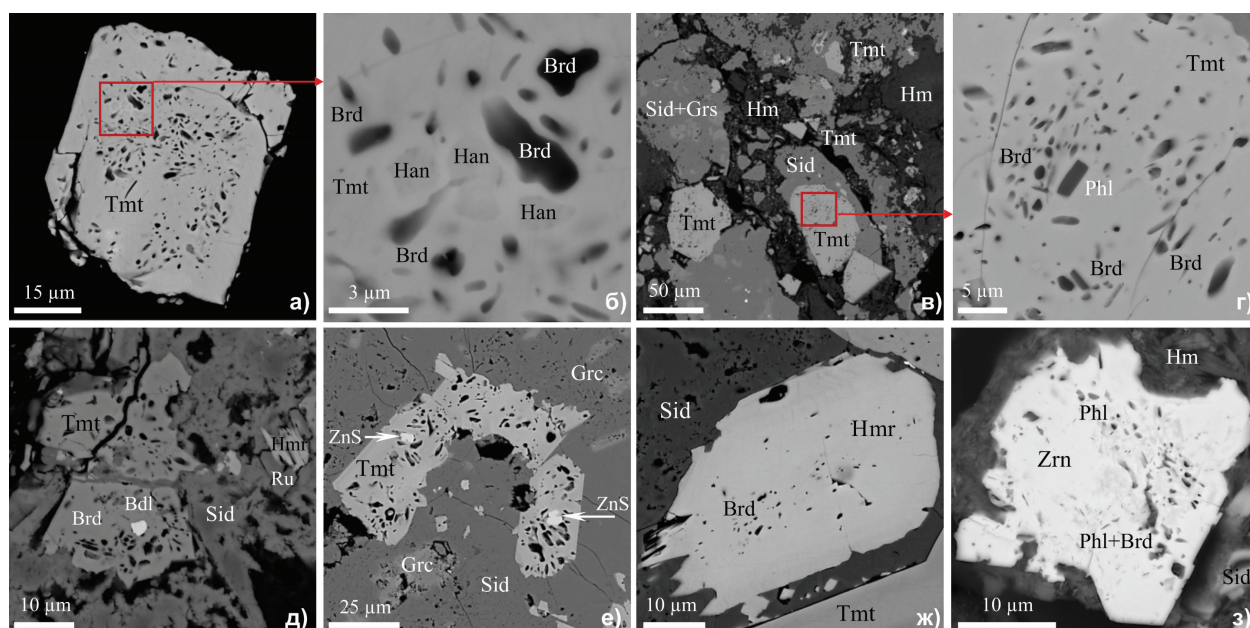


Рис. 4. Минеральные включения в Ba-Fe-титанатах и цирконе, гидрослюдисто-сидеритовая порода, массив Томтор (BSE фотографии): Brd – брэдлиит; Han – ханнешит; Phl – флогопит; Bdl – бадделеит; ZnS – сфалерит-вюртцит; остальные символы на рис. 2

Fig. 4. Mineral inclusions in Ba-Fe-titanates and zircon, hydromica-siderite rock, Tomtor massif (BSE images): Brd – bradleyite; Han – hanneshite; Phl – phlogopite; Bdl – baddeleyite; ZnS – sphalerite-wurtzite; other symbols see Fig. 2

Шарыгин, 2024). На фоне спектра минерала-хозяина остальные характеристические пики брэдлиита оказались неразличимы. (ОН)-группа в минерале отсутствует. Хромит (?), рутил и бадделеит были встречены в единичных случаях. В некоторых зёрнах включения представлены преимущественно брэдлиитом (рис. 3), в других зернах состав включений более разнообразен (рис. 4, 5). В одном зерне могут одновременно присутствовать одиночные кристаллические включения 7 минералов, например: брэдлиит, фторапатит, магнезит, флогопит, горсейксит, сидерит и пирит. Встречаются также и биминеральные включения: брэдлиит + магнезит, сидерит + фторапатит, магнезит + фосфат калия (рис. 5).

Среди включений наблюдаются основные породообразующие минералы – сидерит и горсейксит, но полной уверенности в первичности всех таких включений пока нет, на поверхности кристаллов наблюдаются каверны, которые вполне могли быть заполнены позже.

Заключение

Ba-Fe-титанаты и циркон установлены в гидрослюдисто-сидеритовой породе «сидеритового горизонта» участка Южный месторождения Томтор. Эти минералы являются, вероятнее всего, реликтовыми для этой породы, а их источником могут быть щелочные и ультраосновные породы массива. Если циркон является вездесущим минералом для пород массива, то Ba-Fe-титанаты ранее не обнаруживались в породах массива Томтор. В целом, Ba-Fe-титанаты распространенные акцессории в породах щелочно-карбонатитовых комплексов Мира (Mitchell et al., 2000). Расположение участка вблизи крупного регионального разлома предполагает активную проработку пород при различных региональных событиях, на что указывает не только трубки ультраосновных пород, но и присутствие ультракалиевой породы самого молодого из выявленных в пределах массива возраста. Следовательно, эти минералы могли также сформироваться в результате метасоматической переработки щелочных или ультраосновных пород массива.

Присутствие и состав включений (брэдлиит, ханнешит, флогопит и др.) в Ba-Fe-титанатах и цирконе свидетельствуют о том, что эти минералы кристаллизовались в высокощелочной (высоконатровой) среде.

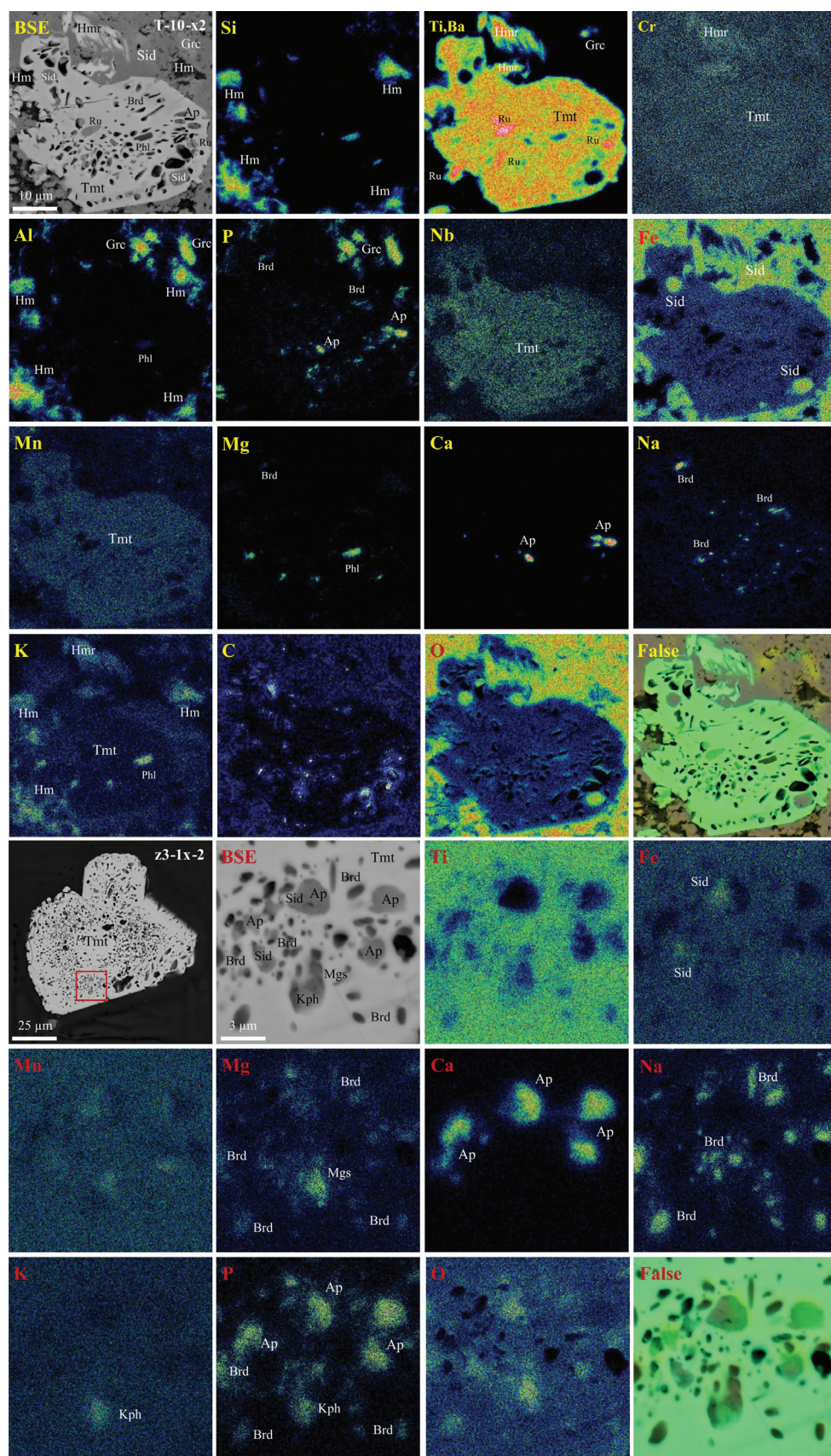


Рис. 5. BSE фотографии и элементные карты для включений в «томторите», гидрослюдисто-сидеритовая порода, массив Томтор: Mgs – магнезит; Kph – неопределенный К-фосфат; остальные символы на рис. 2–4

Fig. 5. BSE images and elemental maps for inclusions in «tomtorite», hydromica-siderite rock, Tomtor massif: Mgs – magnesite; Kph – unidentified K-phosphate; other symbols see Figs. 2–4

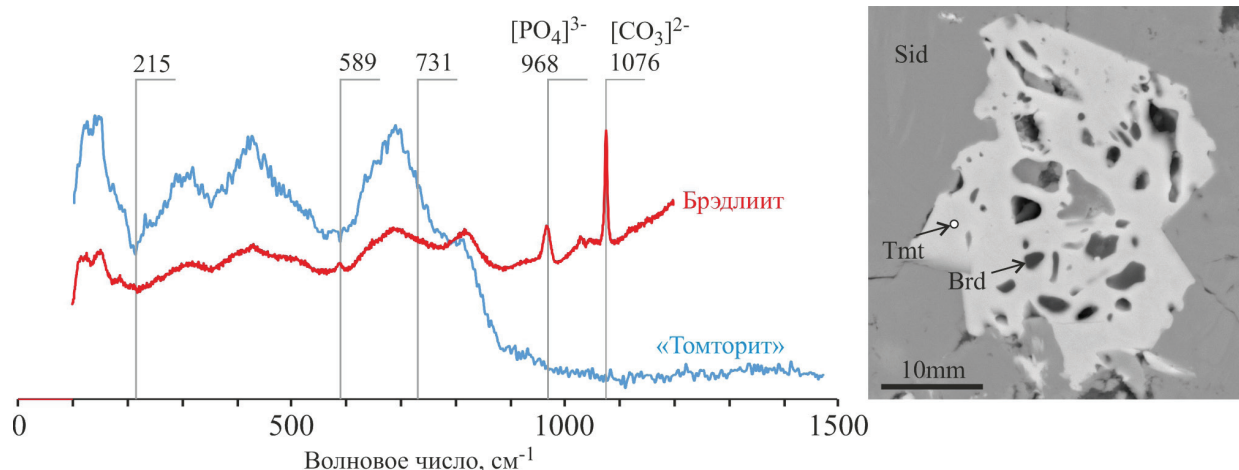


Рис. 6. Рамановские спектры брэдлиита и «томторита» с указанием точек. Обработка спектров проведена с помощью программы ArDI (Шендрик и др., 2024)

Fig. 6. Raman spectra of bradleyite and «tomtorite» with points indicated. The spectra were processed using the ArDI program (Шендрик и др., 2024)

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 23-63-10017, полевые исследования, сканирующая микроскопия, микрозонд) и гос. задания ИГМ СО РАН (FWZN-2022-0035; -0033; № 122041400312, № 122041400193-7, Рамановская микроскопия, XRD). Аналитические работы проведены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

Литература

1. Андреева И. А. Карбонатитовые расплавы в оливине и магнетите из редкометалльных карбонатитов щелочного карбонатитового комплекса Белая Зима (Восточный Саян, Россия) // Доклады АН. 2014. Т. 455, № 3. С. 562–566. <https://doi.org/0.1134/S1028334X14050018>.
2. Андреева И. А., Коваленко В. И., Кононкова Н. Н. Натрокарбонатитовые расплавы массива Большая Тагна, Восточный Саян // Доклады АН. 2006. V. 408. С. 78–82. <https://doi.org/10.1134/S1028334X06040088>.
3. Егоров Л. С., Сурина Л. П., Поршнев Г. И. Уджинский рудно-магматический комплекс ультраосновных щелочных пород и карбонатитов // Рудно-магматические комплексы северо-запада Сибирской платформы и Таймыра. Л. Изд-во: ПГО «Севморгеология», 1985. С. 138–154.
4. Зайцев А. И., Энтин А. Р., Ненашев Н. И., Лазебник К. А., Тянь О. А. Геохронология и изотопная геология Якутии. Якутск. Изд-во: ЯНЦ СО РАН, 1992. 248 с.
5. Коноплев А. Д., Кузьмин В. И., Эпштейн Е. М. Геолого-минералогические особенности делювиально-озерной россыпи на коре выветривания редкометалльных карбонатитов // Минералогия и геохимия россыпей. М. Изд-во: Наука, 1992. С. 111–124.
6. Минералогия кор выветривания карбонатитов. Методическое руководство / Ред. Н. В. Межеловский. М. Изд-во: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2011. 308 с.
7. Михайлова Ю. А., Краснова Н. И., Крецер Ю. Л., Уолл Ф., Пахомовский Я. А. Включения в минералах Ковдорского массива ультраосновных, щелочных пород и карбонатитов как индикаторы эндогенных эволюционных процессов // Глубинный магматизм, его источники и плюмы. Иркутск. 2002. С. 312–338.
8. Охлопков В. И., Коваль С. Г., Бурцев Н. Н., Непопышев В. А., Коптиль В. Н. Отчёт о групповой геологической съёмке масштаба 1:50000 на территории листов R-50-27-Б; 28-А, Б; 29-А.Б.Г.; 31; 40-В, Г; 41-Б, В, Г; 42;3, по работам Верхне-Уджинского объекта Анабарской партии в 1980–1987 гг. (в 2-х томах). ПГО «Якутскгеология», Амакинская ГРП, пос. Нюрба, 1987 г. 1180 с.
9. Поршнев Г. И., Степанов Л. Л. Геологическое строение и фосфатность массива Томтор // Щелочной магматизм и апатитность севера Сибири. Л. Изд-во: НИИГА, 1980. С. 84–100.
10. Поршнев Г. И., Степанов Л. Л. Геология и минералогия Уджинской провинции (С-З ЯАССР) // Советская геология. 1981. № 12. С. 103–106.
11. Расцветаева Р. К. Кричтонит и его семейство: история открытия двух новых минералов // Природа. 2020. № 8. С. 39–47. <https://doi.org/10.7868/S0032874X20080049>.

12. Соколов С. В., Ярмишко С. А., Чистякова Н. И. Включения в хризолите Ковдорского массива: генетическая и геммологическая значимость // *Геохимия*. 2006. Т. 44, № 6. С. 633–642.
13. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Под ред. Л. М. Парфенова, М. М. Кузьмина. М. Изд-во: Наука, 2001. 571 с.
14. Толстов А. В., Тян О. А. Геология и рудоносность массива Томтор. Якутск. Изд-во: ЯНЦ СО РАН, 1999. 164 с.
15. Толстов А. В., Цыбульская Т. Е., Гунин А. П. и др. Отчет о результатах предварительной разведки богатых руд участка Буранный редкометального месторождения Томтор за 1990–1997 г.г. с подсчетом запасов по состоянию на 0.01 1998 г. п. Айхал, 1998 г. (№ 19329 ГУП «Сахагеоинформ»).
16. Шарыгин В. В. Высоконатровые карбонаты и карбонат-фосфаты в породах щелочно-карбонатитовых массивов Чуктукон и Средняя Зима: по данным изучения включений в пирите // *Геосферные исследования*. 2024. № 3. С. 87–100. <https://doi.org/10.17223/25421379/32/9>.
17. Шарыгин В. В., Житова Л. М., Нигматулина Е. Н. Файрчильдит $K_2Ca(CO_3)_2$ в фоскоритах Палаборы, Южная Африка: первая находка в щелочно-карбонатитовых комплексах // *Геология и геофизика*. 2011. Т. 52, № 2. С. 261–275. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.12.015>.
18. Шендрик Р. Ю., Плечов П. Ю., Смирнов С. З. ArDI – система обработки и анализа колебательных спектров минералов // *Новые данные о минералах*. 2024. Т. 58. С. 26–35. <https://doi.org/10.25993/FM.2024.58.2024.008>
19. Энтин А. Р., Зайцев А. И., Ненашев Н. И. и др. О последовательности геологических событий, связанных с внедрением Томторского массива ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (Северо-Западная Якутия) // *Геология и геофизика*. 1990. Т. 12. С. 42–50.
20. Эрлих Э. Н., Загрузина И. А. Геологические аспекты геохронологии северо-восточной части Сибирской платформы // *Известия АН СССР. Серия: Геология*. 1981. № 9. С. 5–13.
21. Bagdasarov Yu. A. Assignment of igneous rocks to lamproite: major- and trace-element criteria and implications for the history of the Tomtor pluton (Northwestern Yakutia) // *Russian Geology and Geophysics*. 2009. V. 50, № 10. С. 911–916. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.10.008>.
22. Biagioni C., Capalbo C., Pasero M. Nomenclature tunings in the hollandite supergroup // *European Journal of Mineralogy*. 2013. V. 25 (1), P. 85–90. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2013/0025-2255>.
23. Chayka I. F., Kamenetsky V. S., Malitch K. N., Vasil'ev Y. R., Zelenski M. E., Abersteiner A. B., Kuzmin I. A. Behavior of critical metals in cumulates of alkaline ultramafic magmas in the Siberian large igneous province: Insights from melt inclusions in minerals // *Ore Geology Reviews*. 2023. V. 160. Article 105577. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105577>.
24. Chayka I. F., Kamenetsky V. S., Vladykin N. V., Kontonikas Charos A., Prokopyev I. R., Stepanov S. Yu., Krashenninnikov S. P. Origin of alkali rich volcanic and alkali poor intrusive carbonatites from a common parental magma // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. Article 17627. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97014-y>.
25. Chen W., Kamenetsky V. S., Simonetti A. Evidence for the alkaline nature of parental carbonatite melts at Oka complex in Canada // *Nature Communications*. 2013. V. 4. P. 1–6. <https://doi.org/10.1038/ncomms3687>.
26. Dobretsov N. L., Lazareva E. V., Zhmodik S. M., Ponomarchuk V. A., Travin A. V., Myagkaya I. N., Tolstov A. V., Karmanov N. S. Ultrapotassic rock from the Tomtor Complex of ultrabasic alkaline rocks and carbonatites (Arctic Siberia) // *Doklady Earth Sciences*. 2020. V. 495, № 2. P. 884–887. <https://doi.org/10.1134/S1028334X20120053>.
27. Dobretsov N. L., Zhmodik S. M., Lazareva E. V., Bryanskaya A. V., Ponomarchuk V. A., Saryg-ool B. Y., Kirichenko I. S., Tolstov A. V., Karmanov N. S. Structural and morphological features of the participation of microorganisms in the formation of Nb–REE-rich ores of the Tomtor Field (Russia) // *Doklady Earth Sciences*. 2021. V. 496, № 2. P. 135–138. DOI: 10.1134/S1028334X21020057.
28. Doroshkevich A. G., Sharygin V. V., Belousova E. A., Izbrodin I. A., Prokopyev I. R. Zircon from the Chuktukon alkaline ultramafic carbonatite complex (Chadobets uplift, Siberian craton) as evidence of source heterogeneity // *Lithos*. 2021. V. 382–383. Article 105957. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105957>.
29. Kamenetsky V. S., Doroshkevich A. G., Elliott H. A. L., Zaitsev A. N. Carbonatites: Contrasting, Complex, and Controversial // *Elements*. 2021. V. 17. P. 307–314. <https://doi.org/10.2138/gselements.17.5.307>.
30. Kogarko L., Plant D., Henderson C., Kjarsgaard B. Na-rich carbonate inclusions in perovskite and calzirtite from the Guli intrusive Ca-carbonatite, polar Siberia // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1991. V. 109. P. 124–129.
31. Kozlov E. N., Fomina E. N., Bocharov V. N., Sidorov M. Yu., Vlasenko N. S., Shilovskikh V. V. A Raman spectroscopic study of the natural carbonophosphates $Na_3MCO_3PO_4$ (M is Mn, Fe, and Mg) // *European Journal of Mineralogy*. 2021. V. 33. P. 283–297. <https://doi.org/10.5194/ejm-33-283-2021>.

32. Lazareva E. V., Zhmodik S. M., Dobretsov N. L., Tolstov A. V., Shcherbov B. L., Karmanov N. S., Gerasimov E. Yu., Bryanskaya A. V. Main minerals of abnormally high-grade ores of the Tomtor deposit (Arctic Siberia) // *Russian Geology and Geophysics*. 2015. V. 56, No. 6. P. 844–873. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.05.003>.
33. Mitchell R. H., Yakovenchuk V. N., Chakhmouradian A. R. et al. Henrymeyerite, a new hollandite-type Ba-Fe titanate from the Kovdor Complex, Russia // *Canadian Mineralogy*. 2000. V. 38. P. 617–626. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.38.3.617>.
34. Nielsen T. F. D., Solovova I. P., Veksler I. V. Parental melts of melilitolite and origin of alkaline carbonatite: Evidence from crystallised melt inclusions, Gardiner complex // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1997. V. 126. P. 331–344. <https://doi.org/10.1007/s004100050254>.
35. Okrugin A., Zhuravlev A. Mineralogical Criteria for Genetic Relationship of Igneous and Carbonatite Rocks of the Tomtor Massif (Siberian Platform) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2021. V. 906, No. 1. P. 012104. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/906/1/012104>.
36. Panina L. I. Multiphase carbonate-salt immiscibility in carbonatite melts: Data on melt inclusions from the Krestovskiy massif minerals (Polar Siberia) // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2005. V. 150. P. 19–36. <https://doi.org/10.1007/s00410-005-0001-3>.
37. Potter N. J., Kamenetsky V. S., Chakhmouradian A. R., Kamenetsky M. B., Goemann K., Rodemann T. Polymineralic inclusions in oxide minerals of the Afrikanda alkaline ultramafic complex: Implications for the evolution of perovskite mineralisation // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2020. V. 175. P. 18. <https://doi.org/10.1007/s00410-020-1654-7>.
38. Prokopyev I. R., Doroshkevich A. G., Zhumadilova D. V., Starikova A. E., Nugumanova Ya. N., Vladyskin N. V. Petrogenesis of Zr–Nb (REE) carbonatites from the Arbarastakh complex (Aldan Shield, Russia): Mineralogy and inclusion data // *Ore Geology Reviews*. 2021. V. 131. Article 104042. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104042>.
39. Sharygin V. V., Doroshkevich A. G. Mineralogy of secondary olivine-hosted inclusions in calcite carbonatites of the Belaya Zima alkaline massif, Eastern Sayan, Russia: Evidence for late-magmatic Na-Ca-rich carbonate composition // *Journal of Geological Society of India*. 2017. V. 90, No. 11. P. 524–530. <https://doi.org/10.1007/s12594-017-0748-y>.
40. Skublov S. G., Tolstov A. V., Baranov L. N., Melnik A. E., Levashova E. V. First data on the geochemistry and U-Pb age of zircons from the kamaphorites of the Tomtor alkaline-ultrabasic massif, Arctic Yakutia // *Geochemistry*. 2020. V. 80, No. 3. P. 125505. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.04.001>.
41. Veksler I., Nielsen T., Sokolov S. Mineralogy of crystallized melt inclusions from Gardiner and Kovdor ultramafic alkaline complexes: Implications for carbonatite genesis // *Journal of Petrology*. 1998. V. 39. P. 2015–2031. <https://doi.org/10.1093/petroj/39.11-12.2015>.
42. Vladyskin N. V., Kotov A. B., Borisenko A. S., Yarmolyuk V. V., Pokhilenko N. P., Sal'nikova E. B., Travin A. V., Yakovleva S. Z. Age boundaries of formation of the Tomtor alkaline-ultramafic pluton: U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological studies // *Doklady Earth Sciences*. 2014. V. 454, No. 1. P. 7–11. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14010140>.
43. Zaitsev A. N., Chakhmouradian A. R. Calcite – amphibole – clinopyroxene rock from the Afrikanda Complex, Kola Peninsula, Russia: mineralogy and a possible link to carbonatites. II. Oxysalt minerals // *Canadian Mineralogy*. 2002. V. 40. P. 103–120. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.40.5.1347>.
44. Zaitsev A. N., Sitnikova M. A., Subbotin V. V., Fernández-Suárez J., Jeffries T. E. Sallanlatvi Complex – a rare example of magnesite and siderite carbonatites // *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: the Key Example of the Kola Alkaline Province* / (Eds.) F. Wall, A. N. Zaitsev. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland. London, UK. 2004. P. 201–245. <https://doi.org/10.1180/MSS.10.07>.