



ТИПОМОРФНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МАГНЕТИТА КАМАФОРИТОВ МАССИВА ТОМТОР

Л.Н. БАРАНОВ^{1,2,*}, А.В. ТОЛСТОВ¹

¹ Научно-исследовательское геологическое предприятие Акционерная компания «АЛРОСА»
(публичное акционерное общество)

39, ул. Ленина, г. Мирный, Республика Саха (Якутия) 678174, Россия

² ФГБУН «Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук»

3, проспект Академика Коптюга, г. Новосибирск 677007, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Получены новые данные о вещественном составе и условиях формирования апатит-магнетитовых пород (фоскоритов, камафоритов) месторождения Онкучах массива Томтор на основании исследования типоморфных особенностей магнетита.

Цель. Изучение морфологии, химического состава и взаимоотношений магнетита с ассоциирующими минералами в апатит-магнетитовых породах месторождения Онкучах массива Томтор.

Материалы и методы. В качестве материала использовался керн скважины № 801 (месторождения Онкучах массива Томтор). Общая длина составляет 177 погонных метров. Для определения состава минералов использовались: JXA-8230 (Jeol X-ray Analyzer) (НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный), электронный сканирующий микроскоп с полевой эмиссией TESCAN MIRA 3 LMU, оборудованный энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 450+ с детектором XMax-80 (Oxford Instruments Ltd) (НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный; ИГМ СО РАН им. В.С. Соболева). Измерения проводились по стандартной методике, ускоряющее напряжение 20 kV, ток 1 nA, время счета от 60 с, размер зонда — 2 мкм. Калибровка прибора осуществляется по набору охарактеризованных искусственных соединений и природных минералов. Проверка стабильности прибора осуществляется измерением интенсивности линии Co.

Результаты. Установлены текстурно-структурные особенности магнетитовых руд и их взаимоотношения с участками фоскоритов отличного вещественного состава и с вмещающими породами. Определено влияние наложенных гидротермальных процессов. Дана подробная морфологическая характеристика магнетита, для которого установлено наличие двух генераций: первично-магматический магнетит и преобразованный при воздействии наложенных процессов. Получена представительная информация о химическом составе магнетита.

Заключение. Предполагается образование магнетита при магматическом процессе с участием кристаллизационной дифференциации. Показана связь находок благородных металлов с наложенными на магнетитовые руды гидротермальными процессами. Подтверждено участие апатит-магнетитовых руд при формировании гипергенного комплекса — железисто-фосфатных латеритных кор выветривания массива Томтор. Рекомендовано рассматривать камафориты массива Томтор как природнолегированные железные руды с возможным попутным извлечением ряда полезных компонентов.

Ключевые слова: Сибирская платформа, Якутия, Томтор, камафорит, карбонатит, фоскорит, магнетит, ильменит

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проекты № 19-17-00013 и 18-17-00120).

Благодарности: авторы благодарят А.С. Иванова (НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО)), Н.С. Карманова (ИГМ СО РАН), Е.В. Лазареву (ИГМ СО РАН).

Для цитирования: Баранов Л.Н., Толстов А.В. Типоморфные особенности магнетита камафоритов массива Томтор. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2020;63(6):66—76. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-6-66-76>

Статья поступила в редакцию 23.11.2020

Принята к публикации 20.03.2021

Опубликована 21.02.2022

* Автор, ответственный за переписку

TYPOMORPHIC FEATURES OF MAGNETITE FROM TOMTOR MASSIF CAMAPHORITES

LEONID N. BARANOV^{1,2,*}, ALEXANDER V. TOLSTOV¹

¹ Geo-Scientific Research Enterprise Public Joint Stock Company "ALROSA"
39, str. Lenin, Mirny 678174, Russia

² The V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy
3, Acad. Koptyuga ave., Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT

Background. The paper presents new data on the material composition and formation conditions of apatite-magnetite rocks (phoscorite and camaphorites) from the Onkuchakh deposit within the Tomtor massif drawing on the study into the typomorphic features of magnetite.

Aim. To study the morphology, chemical composition, and relations of magnetite with associated minerals in apatite-magnetite rocks from the Onkuchakh deposit (Tomtor massif).

Materials and methods. The study employed core samples measuring 177 m in total length (bore-hole No. 801, Onkuchakh field, Tomtor massif). In order to determine the composition of recovered minerals, the following instruments were used: JEOL JXA-8230 Electron Probe Microanalyzer (ALROSA, Mirny, Russia); TESCAN MIRA 3 LMU field emission scanning electron microscope equipped with an Oxford Instruments INCA Energy 450+ energy dispersive spectrometer with an XMax-80 detector (ALROSA, Mirny; V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS). The measurements were performed according to a standard procedure: accelerating voltage — 20 kV; current — 1 nA; counting time — from 60 s; probe size — 2 µm. Instrument calibration was carried out using a set of characterized artificial compounds and natural minerals; instrument stability was confirmed by measuring Co line intensity.

Results. The authors identified the textural and structural features of magnetite ores, as well as ascertaining their relations with the areas of camaphorites characterized by different material composition and host rocks. The impact of superimposed hydrothermal processes was determined. In addition, a detailed morphological characterization was provided for magnetite found to comprise two generations: primary magmatic magnetite and that transformed under the influence of superimposed processes. Finally, representative data on the chemical composition of magnetite were obtained.

Conclusion. It is concluded that magnetite is formed through a magmatic process involving crystallization differentiation. The occurrence of noble metal is shown to be related to hydrothermal processes superimposed on magnetite ores. The role of apatite-magnetite ores in the formation of the supergene complex — ferrous phosphate lateritic weathering crusts of the Tomtor massif — is confirmed. It is recommended to consider camaphorites from the Tomtor massif as naturally alloyed iron ores potentially extracted along with a number of valuable components.

Keywords: Siberian Platform, Yakutia, Tomtor, camaphorite, carbonatite, phoscorite, magnetite, ilmenite

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: research was carried out on the subject of the State Assignment of the GIN RAS No. 0135-2019-0073.

Acknowledgements: the authors would like to thank A.S. Ivanov (NIGP PJSC "ALROSA"), N.S. Karmanov (IGM SB RAS) and E.V. Lazareva (IGM SB RAS).

For citation: Baranov L.N., Tolstov A.V. Typomorphic features of magnetite from tomtor massif camaphorites. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2020;63(6):66—76. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-6-66-76>

Manuscript received 23 November 2020

Accepted 20 March 2021

Published 21 February 2022

* Corresponding author

Апатит-магнетитовые руды известны как фоскориты, камафориты или нельсониты, таким образом, эти термины равнозначны [2], однако в соответствии с номенклатурой в мире наиболее распространен «фоскорит».

Массив Томтор, известный по крупнейшему одноименному месторождению ниобия и редкоземельных элементов [4—9, 12, 18], включает также камафориты, образующие месторождение апатит-магнетитовых руд Онкучах с ресурсами железа свыше 1,0 млрд т [10]. Камафориты массива Томтор, помимо существенных запасов железа и фосфора, содержат Ti, V, REE, Nb, Y в достаточном количестве для их попутного извлечения [2, 10]. В последние годы в апатит-магнетитовых рудах и сиенитах установлены единичные находки благородных металлов [1, 2, 25]. Это диктует необходимость установления типоморфных особенностей, природы и минерализации апатит-магнетитовых руд с переоценкой массива Томтор на комплекс полезных компонентов, включая золото и платиноиды. Исследование типоморфных особенностей магнетита вносит существенный вклад в решение вопросов образования камафоритов, их полезной минерализации и установления их поисковых признаков.

Материалы и методы исследований

Предметом исследования является керн месторождения Онкучах (скважина № 801, длина интервала 177 пог. м, рис. 2-1). Исследования проводились при помощи оптического метода (поляризационный микроскоп Olympus BX51 XRF), методами электронной сканирующей микроскопии (Tescan MIRA 3 LMU) и микрозондового анализа (JXA-8230) по стандартной методике.

Геологическая характеристика

Массив Томтор — ультраосновной щелочной карбонатитовый комплекс (УЩК) с концентрически-зональным строением (рис. 1). Расположен в Уджинской провинции УЩК, приуроченной к одноименному сводовому поднятию на восточном склоне Анабарской антеклизы [11, 12].

Апатит-магнетитовые руды месторождения Онкучах расположены к северо-востоку от карбонатитового ядра в пределах распространения фойдитов в непосредственной близости их границы с щелочными сиенитами. Помимо месторождения Онкучах, интенсивно гипергенно-измененные апатит-магнетитовые (мартит-лимонит-франколитовые) руды обнаружены на участке Южный при оценочных работах [10, 11].

Возраст камафоритов месторождения Онкучах соответствует второму этапу становления массива (~414—385 млн лет) [3, 24].

Результаты

Формы выделения и взаимоотношения. Магнетитовые руды представлены преимущественно массивным, реже пятнистым магнетитом в горизонтальном чередовании с массивным апатитом (рис. 2-1). На границе с вмещающими фойдитами и щелочными сиенитами массивные агрегаты магнетита ассоциируют с крупно- и гигантозернистыми, зачастую идиоморфными агрегатами биотита.

Магнетит четко разделяется на две генерации: массивный (Mag-I) со структурами распада ильменита и без структур распада (Mag-II), на контакте с гидротермальными прожилками либо в обломках внутри прожилков (рис. 2), что согласуется с нашими предыдущими публикациями [2, 10].

Химический состав. Представительные химические составы магнетита отражены в таблице и на диаграммах (рис. 3—5).

Составы магнетитов месторождения Онкучах в координатах Fe^{3+} -Ti соответствуют полям составов магнетитов фоскоритов Ковдора, Соколи, Вуориярви, Каталао, Салитра и бебедуритов (биотитовые эгирин-авгитовые пироксениты) комплекса Тапира, образующим ульвешпинель-магнетитовый тренд (рис. 3a). В координатах Mn-Mg (рис. 3b) магнетиты камафоритов Томтора образуют собственный субвертикальный тренд, не характерный для магнетита фоскоритов других карбонатитовых комплексов.

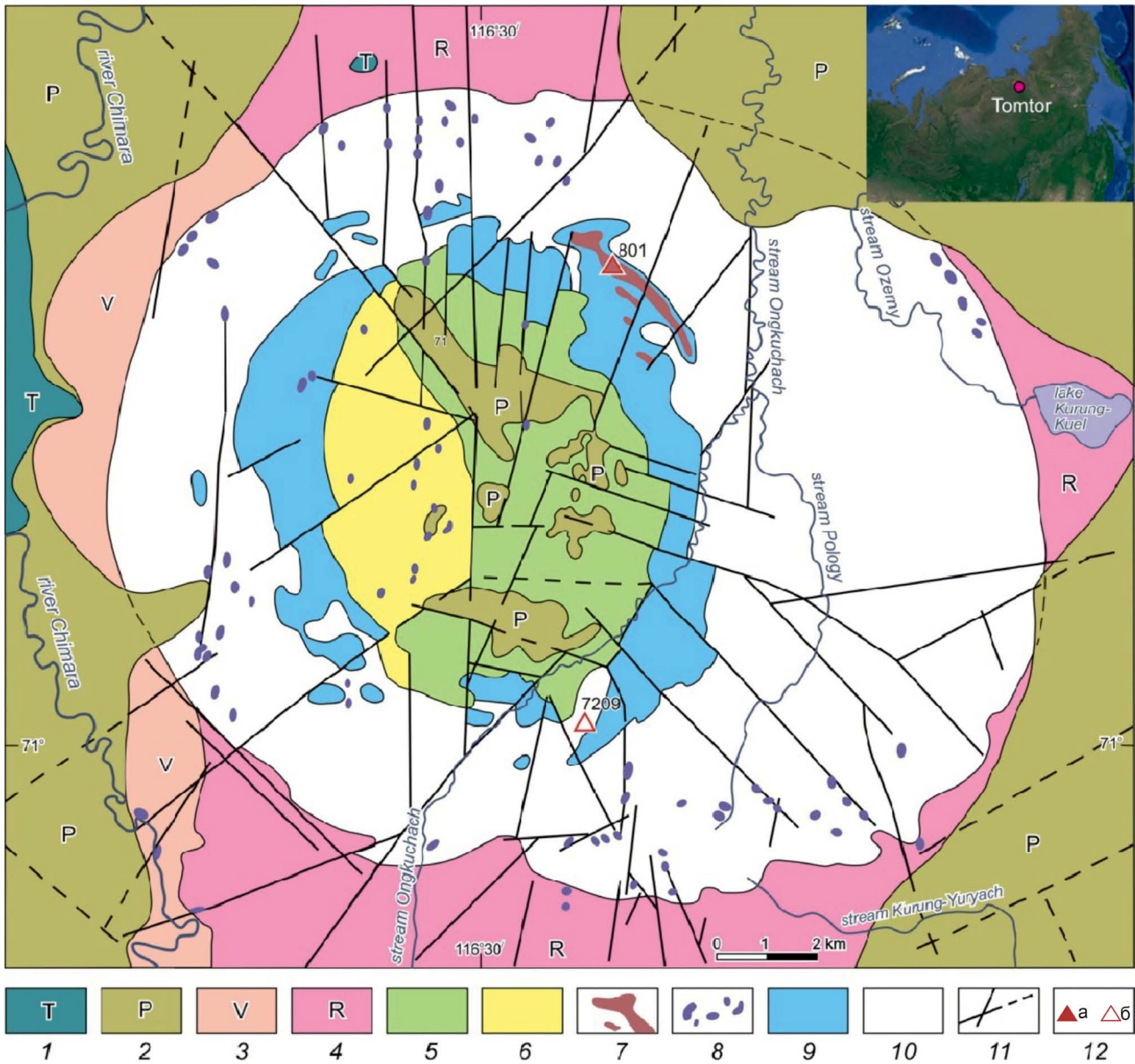


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Томторского массива на основе геологической карты доюрских образований массива Томтор по [11] с учетом материалов геологической съемки (1974—1983) и результатов работ Эбеляхской ГРП: 1 — нижнетриасовые туфы, лавы базальтов, Т; 2 — пермские конгломераты, гравелиты, песчаники, алевролиты, угли, Р₁₋₂; 3 — песчаники, гравелиты, алевролиты венда, V; 4 — доломиты, сланцы, алевролиты, песчаники рифея, R; 5—7 — карбонатитовый комплекс: 5 — редкометалльные, 6 — безрудные карбонатиты и 7 — камафориты; 8—10 — комплекс силикатных пород: 8 — мелкие секущие тела щелочно-ультраосновных пород, 9 — фойдолиты, 10 — щелочные и нефелиновые сиениты; 11 — тектонические нарушения; 12 — точки отбора образцов, их №; а — щелочные сиениты, б — камафориты

Fig. 1. Schematic geological map of the Tomtor massif based on the geological map of the pre-Jurassic formations of the Tomtor massif according to [11], taking into account the materials of the geological survey (1974—1983) and the results of the work of the Ebelyakhskaya GEP unit: 1 — Lower Triassic tuffs, basalt lavas, T; 2 — Permian conglomerates, gravelstones, sandstones, siltstones, coals, P₁₋₂; 3 — sandstones, gravelstones, siltstones of Vendian, V; 4 — dolomites, shales, siltstones, Riphean sandstones, R; 5—7 — carbonate complex: 5 — rare metal, 6 — barren carbonatites and 7 — camaphorites; 8—10 — complex of silicate rocks: 8 — small cutting bodies of alkaline-ultrabasic rocks, 9 — foidolites, 10 — alkaline and nepheline syenites; 11 — tectonic faults; 12 — sampling points, their No; a — alkaline syenites; b — camaphorites

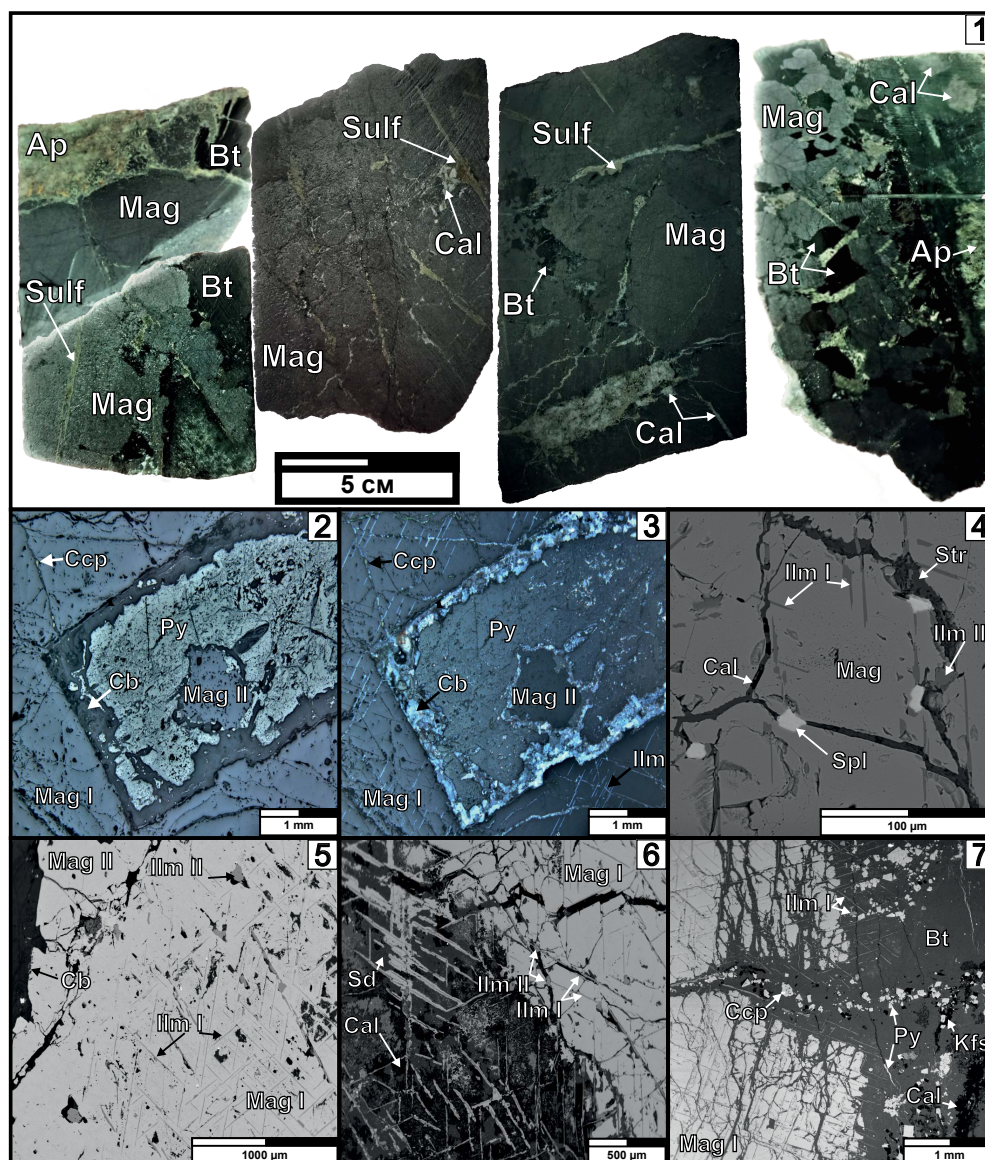


Рис. 2. Магнетитовые руды, скв. 801. 1 — магнетитовые руды месторождения Онкучах массива Томтор (кern скв. 801); 2, 3 — магнетит двух генераций в отраженном свете (2 — нескрещенные, 3 — скрещенные николи); 4—7 — сканирующий электронный микроскоп, съемка в режиме обратно рассеянных электронов (BSE): 4 — карбонатные прожилки с сульфидными вкраплениями в массивном магнетите, 5 — переход от магнетита первой разновидности со структурами распада ильменита к магнетиту второй разновидности вблизи карбонатного прожилка, 6 — растворение массивного магнетита в карбонатном прожилке, 7 — прожилок биотитового состава с сульфидной минерализацией по оси движения гидротермального раствора и массивный магнетит со следами растворения. Условные обозначения: **Ap** — апатит; **Bt** — биотит; **Cal** — кальцит; **Ccp** — халькопирит; **Cb** — карбонат; **Ilm** — ильменит; **Kfs** — калиевый полевой шпат; **Mag** — магнетит; **Py** — пирит; **Sd** — сидерит; **Str** — стронцианит; **Spl** — сфалерит; **Sulf** — сульфиды

Fig. 2. Magnetite ores, borehole 801. 1. Magnetite ores of the Onkuchakh deposit of the Tomtor massif (core well 801); 2,3. Magnetite of two generations in reflected light (2 — uncrossed, 3 — crossed nicols); 4—7 — scanning electron microscope, backscattered electron (BSE) photography: 4 — carbonate veinlets with sulfide phenocrysts in massive magnetite, 5 — transition from type I magnetite with ilmenite decay structures to type II magnetite near the carbonate vein, 6 — dissolution of massive magnetite into carbonate vein, 7 — vein of biotite composition with sulfide mineralization along the axis of motion of the hydrothermal solution and massive magnetite with traces of dissolution. Legend: **Ap** — apatite; **Bt** — biotite; **Cal** — calcite; **Ccp** — chalcopyrite; **Cb** — carbonate; **Ilm** — ilmenite; **Kfs** — potassium feldspar; **Mag** — magnetite; **Py** — pyrite; **Sd** — siderite; **Str** — strontianite; **Spl** — sphalerite; **Sulf** — sulfides

Таблица. Составы и формульные коэффициенты для магнетита месторождения Онкучах (массив Томтор)
Table. Compositions and formula coefficients for magnetite from the Onkuchakh deposit (Tomtor massif)

Представительные составы магнетита (в масс. %) / Representative compositions of magnetite (wt %)															
№	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	CoO	NiO	CuO	ZnO	Nb ₂ O ₅	V ₂ O ₅	Total
1	0	1,73	0,25	0,06	98,62	0,35	0,05	0	0,51	0,04	0	0,06	0	0,55	102,3
2	0,04	2,02	0,23	0	95,74	0,92	0,13	0	0,5	0,04	0,09	0,12	0,1	0,7	100,72
3	0,02	3,47	0,21	0,04	92,98	0,77	0,07	0	0,65	0,06	0	0,1	0,01	0,66	99,23
4	0,04	0,8	0,25	0,1	92,29	0,36	0,07	0,18	0,6	0,03	0,03	0,15	0,13	0,48	95,65
5	0,04	1,93	0,08	0,03	90,22	0,08	0,02	0,24	0,71	0	0	0,15	0,01	0,55	94,2
6	0,02	1,55	0,02	0	89,4	0,71	0,02	0	0,92	0,11	0	0,04	0,07	0,57	93,53
7	0,06	2,69	0,13	0,01	87,64	0,93	0,1	0,01	0,56	0,01	0	0,3	0,04	0,57	93,06
8	0	2,14	0,15	0	89,04	0,35	0,07	0,03	0,58	0,11	0,06	0,06	0	0,59	93,18
9	0	1,87	0,25	0,07	87,89	0,84	0,1	0,03	0,66	0,08	0	0	0	0,52	92,42
10	0,11	1,57	0,08	0,07	88,72	0,48	0,05	0,01	0,64	0,01	0,13	0	0,06	0,54	92,47
11	0,04	1,32	0,25	0,19	88,38	0,39	0,07	0,03	0,61	0,03	0	0	0	0,57	92,18
12	0,06	0,65	0,19	0,04	89,73	0,23	0,07	0	0,65	0,05	0,03	0,02	0	0,55	92,37
13	0,04	2,32	0,13	0	86,92	0,8	0,1	0,01	0,69	0	0	0,1	0,1	0,57	91,98
14	0	2,62	0,11	0,04	87,01	0,28	0,03	0,04	0,6	0	0,03	0	0,06	0,68	91,76
15	0,11	1,53	0,25	0,01	87,96	0,37	0,1	0,1	0,52	0,04	0	0,22	0	0,54	91,77
Формульные коэффициенты, рассчитанные на 4 аниона / Formula coefficients calculated for 4 anions															
№	Si	Ti	Al	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Zn	Ni	Mn	Mg	Ca	Co	Cu	V	O
1	0	0,046	0,01	0,002	1,847	1,056	0,002	0,001	0,01	0,003	0	0,009	0	0,021	4
2	0,001	0,054	0,01	0	1,815	1,05	0,004	0,001	0,028	0,007	0	0,009	0,002	0,027	4
3	0,001	0,095	0,009	0,001	1,737	1,095	0,003	0,002	0,024	0,004	0	0,012	0	0,026	4
4	0,002	0,023	0,011	0,003	1,892	1,018	0,005	0,001	0,011	0,004	0,007	0,012	0,001	0,02	4
5	0,002	0,056	0,004	0,001	1,828	1,064	0,006	0	0,003	0,001	0,01	0,014	0	0,023	4
6	0,001	0,045	0,001	0	1,851	1,04	0,001	0,004	0,023	0,001	0	0,018	0	0,024	4
7	0,002	0,078	0,006	0	1,776	1,064	0,011	0	0,031	0,006	0	0,011	0	0,024	4
8	0	0,062	0,007	0	1,811	1,069	0,002	0,004	0,011	0,004	0,001	0,011	0,002	0,025	4
9	0	0,055	0,011	0,002	1,825	1,042	0	0,003	0,028	0,006	0,001	0,013	0	0,022	4
10	0,004	0,046	0,004	0,002	1,84	1,054	0	0	0,016	0,003	0	0,013	0,004	0,023	4
11	0,002	0,039	0,012	0,006	1,845	1,05	0	0,001	0,013	0,004	0,001	0,012	0	0,025	4
12	0,002	0,019	0,009	0,001	1,893	1,033	0,001	0,002	0,008	0,004	0	0,013	0,001	0,024	4
13	0,002	0,019	0,009	0,001	1,893	1,033	0,001	0,002	0,008	0,004	0	0,013	0,001	0,024	4
14	0	0,078	0,005	0,001	1,77	1,1	0	0	0,009	0,002	0,002	0,012	0,001	0,029	4
15	0,004	0,045	0,012	0	1,836	1,047	0,008	0,002	0,012	0,006	0,004	0,01	0	0,023	4

На генетической диаграмме Аронссона [13] в координатах V-Cr (ppm) точки составов располагаются в поле магнетита магматического происхождения (рис. 4а), в то же время, согласно распределению составов магнетита на генетической диаграмме Дейра [17], магнетит имеет как магматическое, так и гидротермальное происхождение.

Распределение составов магнетита на дискриминационных диаграммах Дупиуса и Бедуина [19] позволяет выделить собственную область камафоритового магнетита (рис. 5), расположенную преимущественно внутри области, характерной для месторождений Fe-Ti и V (Садбери-Ti, Жирардвиль, Лак Дор).

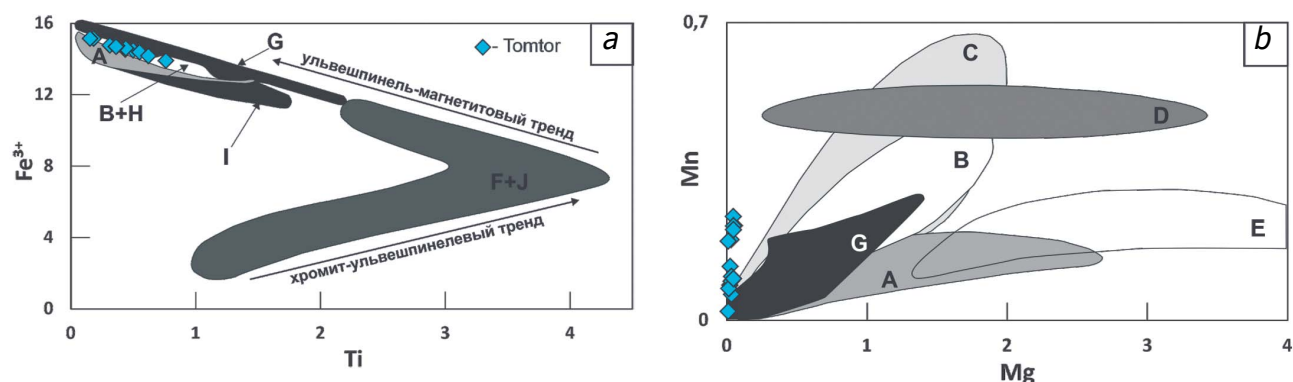


Рис. 3. Вариационные диаграммы для магнетита в катионах, рассчитанных на 32 атома кислорода по [16]. Поля магнетита: А — фоскориты Ковдора [22]; В — Сокли [23]; С — Вуориярви [21]; D — Турий Мыс [21]; E — Якупиранга [20]; G — Каталао [21]; F — флогопитовые пикриты комплекса Тапира [15]; H — фоскориты Салитра; I — бебедуриты комплекса Тапира; J — флогопитовые пикриты Альто-Паранаиба [14]
Fig. 3. Variational diagrams for magnetite in cations, calculated for 32 oxygen atoms according to [16]. Magnetite fields: A — forkorites of Kovdor [22]; B — Sokli [23]; C — Vuorijärvi [21]; D — Турий Мыс [21]; E — Yakupiranga [20]; G — Catalao [21]; F — phlogopite picrites of the Tapira complex [15]; H — forts of Salitra; I — bebedurites of the Tapira complex; J — phlogopite picrites of Alto Paranaíba [14]

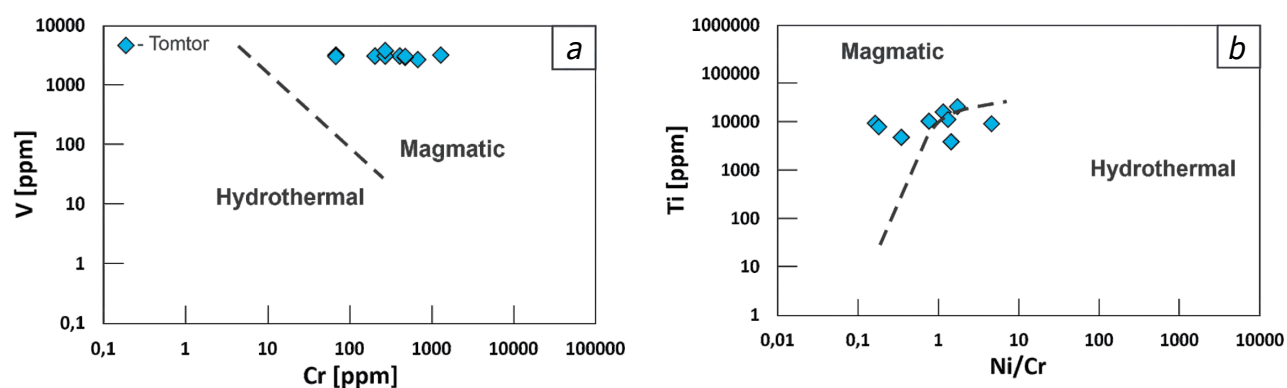


Рис. 4. Вариационные диаграммы для магнетита. а — разделение магнетита на гидротермальный и магматический в координатах V-Cr по [13]; б — разделение магнетита на гидротермальный и магматический в координатах Ti и Ni/Cr отношения по [17]
Fig. 4. Variation diagrams for magnetite. а — separation of magnetite into hydrothermal and magmatic in V-Cr coordinates according to [13]; б — separation of magnetite into hydrothermal and magmatic in the coordinates of Ti and Ni / Cr ratios according to [17]

Обсуждение результатов

Четкое субгоризонтальное разделение массивных магнетитовых и апатитовых руд свидетельствует об участии кристаллизационной дифференциации при образовании камафоритов в ходе магматического процесса.

Химический состав магнетита соответствует составу магнетитов фоскоритов других комплексов УЩК, но имеет отличительные особенности, указывающие на различия в составе и времени эволюции родительской и дочерних магм. Выделяется область составов, отличающих магнетит

камафоритов от магнетита железорудных месторождений других типов.

Положение магнетита на генетических диаграммах (рис. 4) и взаимоотношения с другими минералами указывают на его первично магматическое происхождение с последующей перекристаллизацией высокотемпературными гидротермальными растворами.

На основании проведенных исследований получены следующие выводы.

1. Магнетитовые руды камафоритов массива Томтор (месторождение Онкучах) образовались

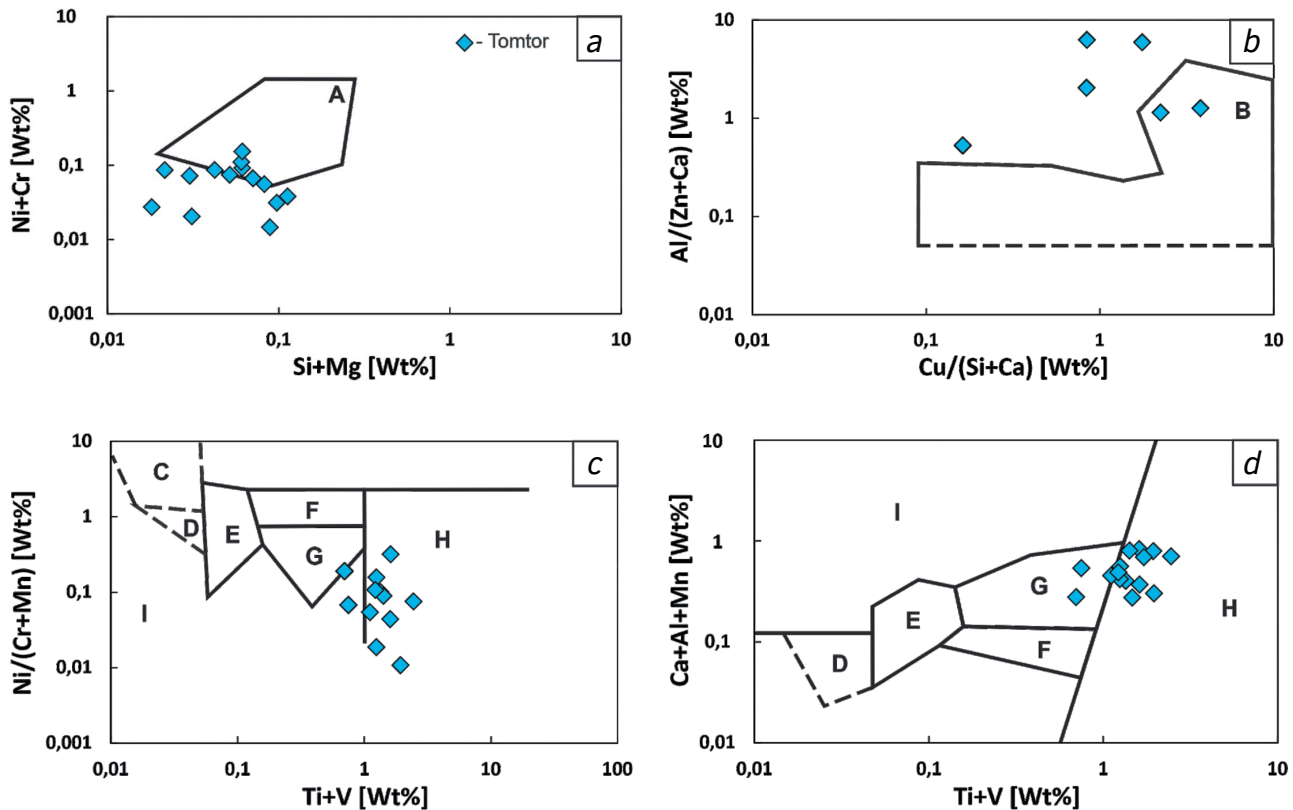


Рис. 5. Дискриминационные диаграммы для магнетита из различных источников по [19]. Условные обозначения: А — месторождения Cu-Ni типа; В — вулканогенные месторождения массивных сульфидных руд; С — медные руды типа Опемиска; D — месторождения джеспилитовой формации; E — месторождения железо-медно-золотой формации; F — апатит-магнетитовые месторождения Кирунского типа; G — месторождения порфировой формации; H — месторождения Fe-Ti, V формации; I — скарновые месторождения

Fig. 5. Discrimination diagrams for magnetite from various sources according to [19]. Legend: A — Cu-Ni type deposits; B — volcanic deposits of massive sulfide ores; C — copper ores of the Opemiska type; D — deposits of the jaspilite formation; E — deposits of the iron-copper-gold formation; F — apatite-magnetite deposits of the Kiruna type; G — deposits of the porphyry formation; H — deposits of Fe-Ti, V formations; I — skarn deposits

в результате кристаллизационной дифференциации при остывании Fe-P расплава.

2. Руды камафоритов характеризуются минералогическими особенностями магнетита и аксессуарных минералов Ti и Fe, которые можно рассматривать в качестве типоморфных для УЩК.

3. Учитывая значительные запасы и ресурсы апатит-магнетитовых руд, высокие концентрации примесных элементов в них и особенно в гипергенно-измененных разностях, авторы рассматривают камафориты как источник попутных редких и, возможно, благородных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов Л.Н., Толстов А.В., Округин А.В. Благородные металлы в щелочных породах и карбонатах // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 8—10 апреля 2020 г. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2020. С. 188—192.
2. Баранов Л.Н., Толстов А.В., Округин А.В., Слепцов А.П. Новое в минералогии и геохимии апатит-магнетитовых руд массива Томтор, северо-восток Сибирской платформы // Руды и металлы. 2018. № 2. С. 42—54.
3. Владыкин Н.В. Модель зарождения и кристаллизации ультраосновных-щелочных-карбонатитовых магм Сибирского региона, проблемы их рудоносности, мантийные источники и связь с плюмовым процессом // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 5. С. 889—905.

4. Делицын Л.М., Мелентьев Г.Б., Толстов А.В., Магазина Л.А., Самонов А.Е., Сударева С.В. Технологические проблемы Томтора и их решение // Редкие земли. 2015. № 2(5). С. 164—179.
5. Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Добрецов Н.Л., Толстов А.В., Щербов Б.Л., Карманов Н.С., Герасимов Е.Ю., Брянская А.В. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 6. С. 1080—1115.
6. Лапин А.В., Толстов А.В. Окислительный и восстановительный этапы формирования зоны гипергенеза карбонатитов и их рудоносность // Геология рудных месторождений. 1991. Т. 33. № 4. С. 81—91.
7. Лапин А.В., Толстов А.В. Новые уникальные месторождения редких металлов в корях выветривания карбонатитов // Разведка и охрана недр. 1993. № 3. С. 7—11.
8. Округин А.В., Зайцев А.И., Борисенко А.С., Земнухов А.Л., Иванов П.О. Золотоплатиновые россыпи бассейна р. Анабар и их возможная связь с щелочно-ультраосновными магматитами Севера Сибирской платформы // Отечественная геология. 2012. № 5. С. 11—20.
9. Округин А.В., Толстов А.В. Петрогеохимическая характеристика сиенит-щелочно-ультраосновного силикатного комплекса пород Томторского массива (северо-восток Сибирской платформы) // Отечественная геология. 2017. № 5. С. 56—66.
10. Толстов А.В. Особенности минералогии и геохимии апатит-магнетитовых руд массива Томтор (С-З Якутия) // Геология и геофизика. 1994. № 9. С. 91—100.
11. Толстов А.В. Минералогия и геохимия золота С-З Якутии и перспективы золоторудности Анабарского щита // Вест. ВГУ, сер. геол. 1999. № 8. С. 194—197.
12. Энтин А.Р., Зайцев А.И., Ненашев Н.И., Василенко В.Б., Орлов А.Н., Тянь О.А., Ольховик Ю.А., Ольштынский С.П., Толстов А.В. О последовательности геологических событий, связанных с внедрением Томторского массива ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (Северо-Западная Якутия) // Геология и геофизика. 1990. № 12. С. 42—50.
13. Aronsson J. Compositional variations between hydrothermal and magmatic magnetite and their potential for mineral exploration using till from Laver, Northern Sweden // Degree of Master of Science with a major in Earth Sciences. Department of Earth Sciences, University of Gothenburg. 2016. P. 47.
14. Barbosa E.S.R., Brod J.A., Cordeiro P.F.O., Junqueira-Brod T.C., Santos R.V., Dantas E.L. Phoscorites of the Salitre I complex: Origin and petrogenetic implications // Chemical Geology. 2020. No. 535. P. 1—18.
15. Brod J.A., Gaspar J.C., Diniz-Pinto H.S., Junqueira-Brod T.C. Spinel chemistry and petrogenetic processes in the Tapira alkaline-carbonatite complex, Minas Gerais, Brazil // Bras. Geociências. 2005. No. 35, P. 23—32.
16. Cordeiro P.F.O., Brod J.A., Dantas E.L., Barbosa E.S.R. Mineral chemistry, isotope geochemistry and petrogenesis of niobium-rich rocks from the Catalão I carbonatite-phoscorite complex, Central Brazil // Lithos. 2010. No. 118. P. 223—237.
17. Dare, S.A., Barnes S.J., Beaudoin G., Méric J., Boutroy E., Potvin-Doucet C. Trace elements in magnetite as petrogenetic indicators // Mineralium Deposita. 2014. No. 49. P. 785—796.
18. Delitsyn L.M., Melentev G.B., Batenin V.M., Tolstov A.V. Coexistence of two immiscible liquid phases in a niobium-rareearth element-silicate-salt system // Doklady Chemistry. 2015. T. 462. № 2. C. 165—168.
19. Dupuis C., Beaudoin G. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types // Minera Deposita. 2011. No. 46. P. 319—335.
20. Gaspar J.C., Wyllie P.J. Magnetite in the carbonatites from the Jacupiranga complex, Brazil // American Mineralogist. 1983. No. 68. P. 195—213.
21. Karchevsky P.I., Moutte J. The phoscorite-carbonatite complex of Vuoriyarvi, northern Karelia // Phoscorites and Carbonatites From Mantle to Mine. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland. 2004. P. 163—199.
22. Krasnova N.I., Petrov T.G., Balaganskaya E.G., Garcia D., Moutte J., Zaitsev A.N., Wall F. Introduction to phoscorites: occurrence, composition, nomenclature and petrogenesis // Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland. 2004. P. 45—74.
23. Lee, M.J., Lee, J.I., Moutte, J. Compositional variation of Fe-Ti oxides from the Sokli complex, northeastern Finland // Geosci. 2005. No. 9. P. 1—13.
24. 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 Chemie der Erde. 2019. №6. pp. 1-11.
25. Tolstov A.V. Platinum prospects of alkaline Rocks of Udzha province (NW of Yakutia) // Ore Potential of Alkaline, Kimberlite and Carbonatite Magmatism. UCTEA Chamber of Turkish Geological Engineers-Ankara Abstract book. 2014. P. 196—197.

REFERENCES

1. Aronsson J. Compositional variations between hydrothermal and magmatic magnetite and their potential for mineral exploration using till from Laver, Northern Sweden // Degree of Master of Science with a major in Earth Sciences. Department of Earth Sciences, University of Gothenburg. 2016. P. 47.
2. Baranov L.N., Tolstov A.V., Okrugin A.V. Noble metals in alkaline rocks and carbonatites // Geology and

- mineral resources of the North-East of Russia: materials of the X All-Russian scientific-practical conference with international participation, April 8—10, 2020. Yakutsk: NEFU Publishing House, 2020. P. 188—192 (In Russian).
3. Baranov L.N., Tolstov A.V., Okrugin A.V., Sleptsov A.P. New in mineralogy and geochemistry of apatite-magnetite ores of the Tomtor massif, north-east of the Siberian platform // *Ores and metals*. 2018. No. 2. P. 42—54 (In Russian).
 4. Barbosa E.S.R., Brod J.A., Cordeiro P.F.O., Junqueira-Brod T.C., Santos R.V., Dantas E.L. Phoscorites of the Salitre I complex: Origin and petrogenic implications // *Chemical Geology*. 2020. No. 535. P. 1—18.
 5. Brod J.A., Gaspar J.C., Diniz-Pinto H.S., Junqueira-Brod T.C. Spinel chemistry and petrogenetic processes in the Tapira alkaline-carbonatite complex, Minas Gerais, Brazil // *Bras. Geociências*. 2005. No. 35. P. 23—32.
 6. Cordeiro P.F.O., Brod J.A., Dantas E.L., Barbosa E.S.R. Mineral chemistry, isotope geochemistry and petrogenesis of niobium-rich rocks from the Catalão I carbonatite-phoscorite complex, Central Brazil // *Lithos*. 2010. No. 118. P. 223—237.
 7. Dare S.A., Barnes S.J., Beaudoin G., Méric J., Boutroy E., Potvin-Doucet C. Trace elements in magnetite as petrogenetic indicators // *Mineralium Deposita*. 2014. No. 49. P. 785—796.
 8. Delitsyn L.M., Melentev G.B., Batenin V.M., Tolstov A.V. Coexistence of two immiscible liquid phases in a niobium-rareearth element-silicate-salt system // *Doklady Chemistry*. 2015. T. 462. № 2. P. 165—168.
 9. Delitsyn L.M., Melent'ev G.B., Tolstov A.V., Magazina L.A., Samonov A.E., Sudareva S.V. Tomtor's technological problems and their solution // *Rare earths*. 2015. No. 2(5). P. 164—179 (In Russian).
 10. Dupuis C., Beaudoin G. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types // *Mineral Deposita*. 2011. No. 46. P. 319—335.
 11. Entin A.R., Zaytsev A.I., Nenashev N.I., Vasilenko V.B., Orlov A.N., Tyan O.A., Ol'khovik Yu.A., Ol'shtynskiy S.P., Tolstov A.V. On the sequence of geological events associated with the intrusion of the Tomtor massif of ultrabasic alkaline rocks and carbonatites (North-Western Yakutia) // *Geology and Geophysics*. 1990. No. 12. P. 42—50 (In Russian).
 12. Gaspar J.C., Wyllie P.J. Magnetite in the carbonatites from the Jacupiranga complex, Brazil // *American Mineralogist*. 1983. No. 68. P. 195—213.
 13. Karchevsky P.I., Moutte J. The phoscorite-carbonatite complex of Vuorijarvi, northern Karelia // *Phoscorites and Carbonatites From Mantle to Mine*. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland. 2004. P. 163—199.
 14. Krasnova N.I., Petrov T.G., Balaganskaya E.G., Garcia D., Moutte J., Zaitsev, A.N., Wall F. Introduction to phoscorites: occurrence, composition, nomenclature and petrogenesis // *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine*. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland. 2004. P. 45—74.
 15. Lapin A.V., Tolstov A.V. New unique deposits of rare metals in the weathering crusts of carbonatites // *Exploration and conservation of mineral resources*. 1993. No. 3. P. 7—11 (In Russian).
 16. Lapin A.V., Tolstov A.V. Oxidative and reduction stages of formation of the zone of hypergenesis of carbonatites and their ore content // *Geology of ore deposits*. 1991. T. 33. No. 4. P. 81—91 (In Russian).
 17. Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Dobretsov N.L., Tolstov A.V., Shcherbov B.L., Karmanov N.S., Gerasimov E.Yu., Bryanskaya A.V. The main ore-forming minerals of anomalously rich ores of the Tomtor deposit (Arctic Siberia) // *Geology and Geophysics*. 2015. T. 56. No. 6. P. 1080—1115 (In Russian).
 18. Lee M.J., Lee, J.I., Moutte J., Compositional variation of Fe-Ti oxides from the Sokli complex, northeastern Finland // *Geosci*. 2005. No. 9. P. 1—13.
 19. Okrugin A.V., Tolstov A. V. Petrogeochemical characteristics of the syenite-alkaline-ultrabasic silicate complex of rocks of the Tomtor massif (north-east of the Siberian platform) // *Otechestvennaya Geologiya*. 2017. No. 5. P. 56—66 (In Russian).
 20. Okrugin A.V., Zaytsev A.I., Borisenko A.S., Zemnukhov A.L., Ivanov P.O. Gold-platinum placers of the river basin Anabar and their possible connection with alkaline-ultrabasic magmatites of the North of the Siberian platform // *Otechestvennaya geologiya*. 2012. No. 5. P. 11—20 (In Russian).
 21. 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 *Chemie der Erde*. 2019. №6. pp. 1-11.
 22. Tolstov A.V. Mineralogy and geochemistry of gold in NW Yakutia and prospects for gold ore of the Anabar shield // *Vest. VSU, ser. geol.* 1999. No. 8. P. 194—197 (In Russian).
 23. Tolstov A.V. Peculiarities of mineralogy and geochemistry of apatite-magnetite ores of the Tomtor massif (NW Yakutia) // *Geology and geophysics*. 1994. No. 9. P. 91—100 (In Russian).
 24. Tolstov A.V. Platinum prospects of alkaline Rocks of Udzha province (NW of Yakutia) // *Ore Potential of Alkaline, Kimberlite and Carbonatite Magmatism*. UCTEA Chamber of Turkish Geological Engineers-Ankara Abstract book. 2014. P. 196—197.
 25. Vladikin N.V. Model of nucleation and crystallization of ultrabasic-alkaline-carbonatite magmas of the Siberian region, problems of their ore content, mantle sources and connection with the plume process // *Geology and Geophysics*. 2016. Vol. 57. No. 5. P. 889—905 (In Russian).

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Баранов Л.Н. — подготовил образцы для исследования, изучил описанными методами, разработал концепцию статьи, подготовил текст статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Толстов А.В. — предоставил образцы, разработал концепцию статьи, подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Baranov L.N. — prepared samples for research, studied using the described methods, developed the concept of the article, prepared the text of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Tolstov A.V. — provided samples, developed the concept of the article, prepared the text of the article, finally approved the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

Баранов Леонид Николаевич* — научный сотрудник лаборатории прогнозно-методического сопровождения геологоразведочных работ НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО); инженер-исследователь лаборатории рудоносности щелочного магматизма ФГБУН «Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук».

39, ул. Ленина, г. Мирный 678174, Россия

3/1, проспект Академика Коптюга, г. Новосибирск 630090, Россия

тел.: +7 (913) 205-97-13

E-mail: BaranovLN@alrosa.ru

SPIN-код: 2228-3296

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6526-3635>

Leonid N. Baranov* — Research Fellow, Laboratory for Predictive and Methodological Support of Geological Exploration, NIGP PJSC ALROSA; Research Engineer, Laboratory of Ore Content of Alkaline Magmatism, The V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy.

39, str. Lenin, Mirny 678174, Russia

3/1, Akademician Koptuyug ave., Novosibirsk 630090, Russia

tel.: +7 (913) 205-97-13

E-mail: BaranovLN@alrosa.ru

SPIN-code: 2228-3296

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6526-3635>

Толстов Александр Васильевич — доктор геолого-минералогических наук, директор НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО).

39, ул. Ленина, г. Мирный 678174, Россия

тел.: +7 (913) 252-86-12

E-mail: TolstovAV@alrosa.ru

SPIN-код: 7895-6601

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6057-5987>

Alexander V. Tolstov — Dr. of Sci. (Geol.-Min.), Director of NIGP PJSC ALROSA.

39, st. Lenin, Mirny 678174, Russia

tel.: +7 (913) 252-86-12

E-mail: TolstovAV@alrosa.ru

SPIN-code: 7895-6601

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6057-5987>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author