

## Роль фоскоритов в минерагии Томторского рудного поля

Л.Н. Баранов<sup>1,\*</sup>, А.В. Толстов<sup>2,\*\*</sup>

<sup>1</sup>НАЦ ВГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия

<sup>2</sup>ИГАБМ СО РАН, Якутск, Россия

\*Baranovln@alrosa.ru

\*\*Tols61@mail.ru

**Аннотация.** Массив ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (УЩК) Томтор, расположенный на северо-востоке Сибирской платформы, является одним из крупнейших в мире, с которым связано одноименное уникальное месторождение Nb и REE с колоссальными ресурсами. В его пределах выявлено месторождение апатит-магнетитовых руд (фоскоритов) Онкучах, с ресурсами суммарного железа – более 1 млрд т и  $P_2O_5$  – около 500 млн т при высоких концентрациях в них REE. Томтор – важный экономический и стратегический объект, один из ключевых при освоении Российской Арктики. В настоящей работе показан вклад фоскоритов в минерагию уникального оруденения, для чего приведена геолого-геохимическая характеристика карбонатитового комплекса и фоскоритов, методами РФА и ИСП АЭС изучен их состав в сравнении с карбонатитовым комплексом и горизонтами латеритной коры выветривания, образующими оруденение. Общепризнанное мнение, что месторождение сформировалось при выветривании рудных карбонатитов дополнено убедительными фактами, доказывающими весомое участие фоскоритов в образовании Nb–REE-оруденения в гипергенном комплексе.

**Ключевые слова:** Сибирская платформа, Томтор, карбонатит, фоскорит, кора выветривания, ниобий, редкие земли

### Введение

Массив ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (УЩК) Томтор площадью 250 км<sup>2</sup>, расположенный на северо-востоке Сибирской платформы, обнаружен в 1958–1959 гг. при геологической съемке масштаба 1:200 000. В 1964 г. появились первые сведения в научной литературе [1]. В 1970-е гг. силами НИИГА на массиве проведены общие поиски, в ходе которых установлено уникальное фосфорно-редкометалльное оруденение в карбонатитах и их корах выветривания. В начале 1980-х гг. сотрудниками НИИГА (г. Ленинград) была выполнена первая экономическая оценка [2]. Позже, в 1990-е гг. при поисково-оценочных работах в пределах массива выявлены три участка эпигенетически измененных ниобий-редкоземельных руд: Южный, Буранный и Северный [3, 4]. В результате разведочных работ в 1999 г. установлено ниобий-редкоземельное Томторское месторождение, которое по ресурсам Nb и REE и их концентрациям превосходит известные аналоги и является уникальным [4]. Основные полезные компоненты руд, связанные с массивом Томтор: REE, нио-

бий, иттрий, скандий. Попутные компоненты: титан, ванадий, алюминий, фосфор, цирконий, стронций, уран, торий. Концентрации Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в богатых рудах месторождения 4,5 % (максимальные – 24 %), что значительно превышает содержания в рудах бразильского месторождения Араша [5, 6]. Содержания REE сопоставимы с мировыми аналогами редкоземельных месторождений (в среднем в рудах 7–10 %, достигая участками 40 %). Руды отличаются высоким содержанием Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (до 2,5 %, в среднем – 0,75 %) и Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (до 0,16 %, в среднем – 0,06 %) [8]. Изучению Томтора посвящено множество работ [3, 4, 8–18; и др.], однако, принимая во внимание высокую стратегическую и экономическую значимость массива, а также в связи с неизбежным освоением Арктики, изучение минерагии массива весьма актуально по настоящее время. Целью работы является определение вклада апатит-магнетитовых пород (фоскоритов) в минерагию массива Томтор.

### Материалы и методы исследования

Фактическим материалом исследований послужил керн скважины № 801 (177 пог. м, место-

рождение Онкучах), пробуренной в 2015 г., а также результаты многолетних исследований карбонатитов и образований гипергенного комплекса, полученные авторами.

Химический состав пород определен методами рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) и атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС). Анализ проводился на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL-9900-XP по методике, используемой в ЦКП, научным оборудованием для многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН, аналитик – Карманова Н.Г. Анализ проб и препаратов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) выполнен авторами на базе лаборатории рентгеновских и спектральных методов НИГП АК (ПАО) «АЛРОСА», г. Мирный. Использовалась методика БГРЭ-МП5мод (III категория точности). Измерения проводились на приборе iCAP 6300Duo, производитель Thermo Scientific (США).

### Результаты исследования

Томторский массив входит в состав Уджинской провинции ультраосновных щелочных пород и карбонатитов, приуроченной к одноименному поднятию на северо-востоке Сибирской платформы, в восточной части Анабарской антеклизы. По генезису это вулканоплутонический комплекс концентрически-зонального строения: внешнее кольцо сложено щелочными и нефелиновыми сиенитами, внутреннее неполное кольцо, обрамляющее карбонатитовое ядро с востока и запада, представлено породами семейства фойдитов. На территории массива, к С-В от карбонатитового ядра (Р-Fe-месторождение Онкучах) в пределах карбонатитового ядра (уч. Южный, уч. Буранный) установлены проявления апатит-магнетитовых пород (фоскоритов, камафоритов, нельсонитов) [2, 9, 19]. По карбонатитам массива развиты коры выветривания, мощность которых, в зависимости от субстрата, может достигать 400 м. Породы массива традиционно разделялись на карбонатитовый и силикатный комплексы, при этом фоскориты были отнесены к карбонатитовому [2].

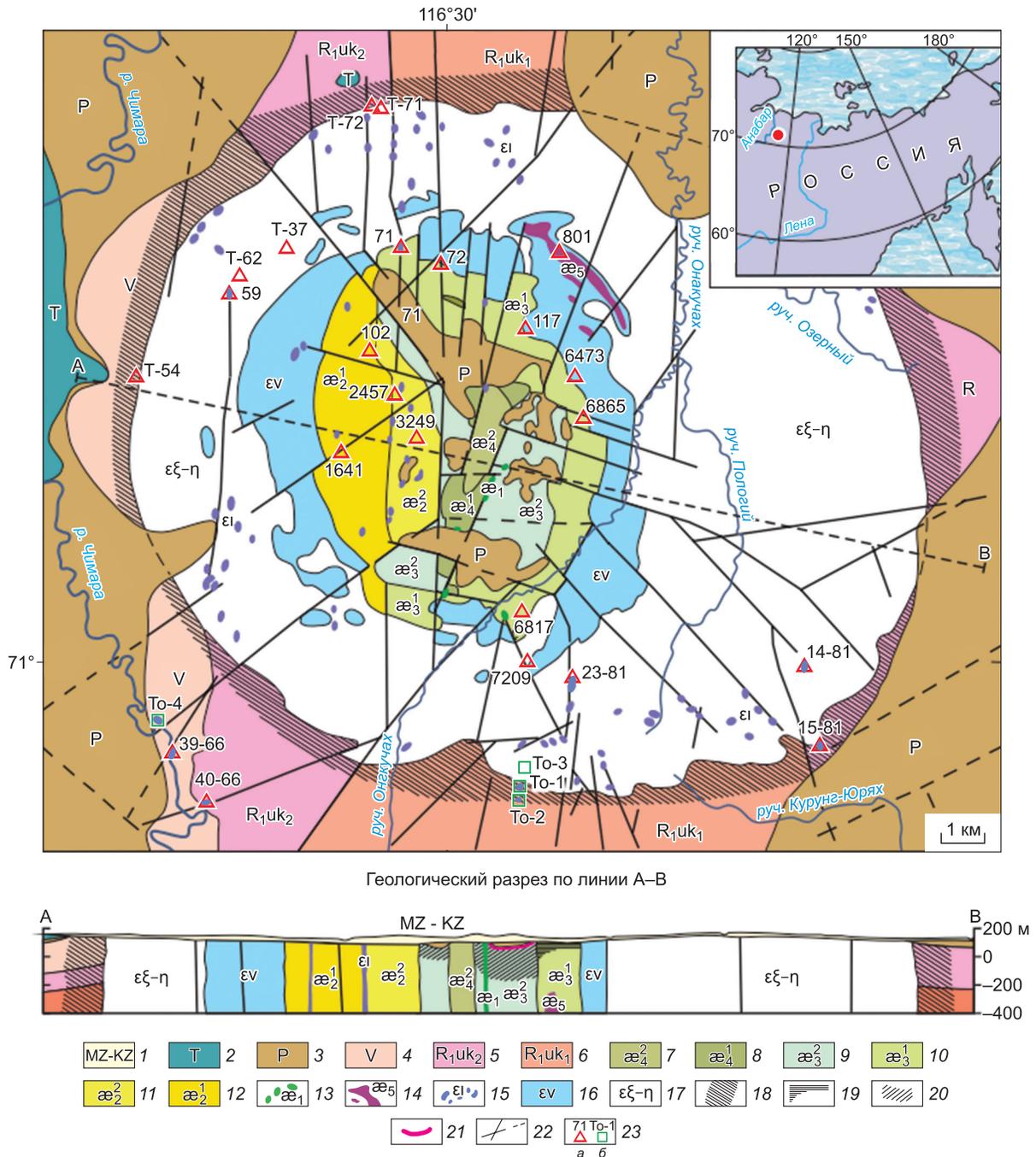
Собственно, месторождение Nb и REE, включающее участки Южный, Буранный и Северный, представлено переотложенными эпигенетически измененными корами выветривания, выполняющими мульдообразные впадины в пределах кар-

бонатитового ядра. В гипергенном комплексе, связанном с карбонатитами, выделяются четыре горизонта (сверху вниз): каолинит-крандаллитовый, сидеритовый, гетитовый и франколитовый [7]. Образование впадин вызвано неравномерной усадкой коры при формировании [3], соответственно, субстратом богатых руд является латеритная кора выветривания. Рудоносные коры, согласно последним представлениям, сформированы исключительно по карбонатитам, однако, по нашим данным, карбонатиты были не единственным источником их формирования.

Карбонатитовое ядро массива представлено совокупностью полиминеральных рудных и безрудных карбонатитов (рис. 1). Породы безрудной группы, занимающие более 20 км<sup>2</sup>, слагают западную часть ядра массива. В пределах их распространения, на границе силикатного комплекса и карбонатитового ядра широко распространены кальцит-микроклин-слюдистые породы, преобразованные карбонатитовым расплавом (флогопит, биотит – 5–55 и серицит – 2–30 %), хлорит (2–45), микроклин (5–35), эгирин (5–20), кальцит (5–30), доломит (или реже анкерит – 1–15), рутил или анатаз (2–5), магнетит (1–5), гематит (1–4), апатит (1–5 %). По нашему мнению, наиболее вероятно, данные образования являются щелочными апосиенитами. Карбонатиты безрудной группы (кальцитовые и доломит-кальцитовые) слагают субмеридиональную полосу шириной до 1 км к востоку от кальцит-микроклин-слюдистых пород. С востока, северо-востока и юга эти породы граничат с карбонатитами рудной стадии.

Образования рудной группы подразделяются на фосфорно-редкометалльную и редкометалльную подгруппы. Основой разделения является содержание минералов группы апатита, анкерита и рудных минералов в исходных породах, что, в конечном счете, обуславливает их различное поведение в последующем гипергенном процессе. На границе рудных карбонатитов с силикатным комплексом распространены апатит-микроклин-слюдистые породы, окаймляющие карбонатитовое ядро полукольцевой полосой шириной до 2 км в северной, восточной и южной частях. По минеральному составу и внешнему облику среди них выделяются три подтипа: собственно апатит-микроклин-слюдистые породы, собственно микроклиновые породы и слюдиты. В их состав входят биотит (20–50 %), хлорит (5–30), серицит (5–30), микроклин (20–30), апатит (5–

РОЛЬ ФОСКОРИТОВ В МИНЕРАЦИИ ТОМТОРСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта Томторского массива. Построена на основе геологической карты доюрских образований массива Томтор по [3, 20]: 1–6 – вмещающие породы; 7–13 – карбонатитовый комплекс: 7–10, 13 – рудная группа, 11, 12 – безрудная группа; 14 – фоскориты; 15 – альнеиты, щелочные пикриты; 16 – фойдолиты; 17 – щелочные и нефелиновые сиениты; 18 – зоны мраморизации и скарнирования; 19–21 – гипергенный комплекс; 22 – тектонические нарушения; 23 – места отбора образцов.

**Fig. 1.** Schematic geological map of the Tomtor massif on the basis of the geological map of pre-Jurassic formations of the Tomtor massif according to [3, 20]: 1–6 – host rocks; 7–13 – carbonatite complex: 7–10, 13 – ore group; 11, 12 – oreless group; 14 – phoscorites; 15 – alneites, alkaline picrites; 16 – foidolites; 17 – alkaline and nepheline syenites; 18 – zones of marbling and skarning; 19–21 – supergene complex; 22 – tectonic disturbances; 23 – sampling sites.

20), кальцит (5–20), анкерит (5–20). Подтипы тесно и закономерно перемежаются с постепен-

ными взаимопереходами. Аналогично кальцит-микроклин-слюдистым породам апатит-микро-

клин-слюдистые образования являются результатом преобразования щелочных пород силикатного комплекса (вероятно, фойдолитов) карбонатитовым расплавом.

Карбонатиты фосфорно-редкометалльные (кальцитовые и поликарбонатные) занимают центральный и восточный секторы внутренней карбонатитовой части ядра, образуя серповидную в плане полосу. На востоке, юге и севере они граничат с апатит-микроклин-слюдистыми породами, на западе – с карбонатитами безрудной группы. Общая площадь их составляет около 10 км<sup>2</sup>. От безрудных карбонатитов отличаются главным образом повышенными содержаниями P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (см. таблицу).

Апатит-магнетитовые породы (фоскориты) (рис. 2, 1) массива Томтор представлены двумя разновидностями. Первая – апатит-магнетит-пироксен-оливинового состава с вкрапленным и прожилково-вкрапленным оруденением. Они слагают преимущественно небольшие крутопадающие штоки, штокообразные тела, маломощные дайки, жилы или брекчированные зоны, обломки которых имеют различный петрографический состав, в зависимости от преобладания одного из главных минералов. Мощность образующих ими тел не превышает 1–2 м [2]. Вторая разновидность фоскоритов представлена апатит-магнетитовыми рудами, слагающими рудные тела месторождения Онкучах в северо-восточной части массива [2]. Площадь распространения оценивается как блок длиной 3,5 км и шириной 75–100 м. Руды представлены серией жильно-линзовидных тел, падающих под углом 75–80° к центру массива. Мощность их достигает 10–30 м при протяженности до 3 км. Блоки массивных магнетитовых руд чередуются с блоками прожилково-вкрапленных руд, породами якупирангит-ийолитовой серии и карбонатитами. Окисленные апатит-магнетитовые руды данной разновидности встречены на участке Южный при оценочных работах [2, 7].

Среди изученных интервалов фоскоритов выделяются отдельные участки с преобладанием одного из главных петрогенных минералов (до практически полной мономинеральности участка породы) – магнетита, апатита, биотита или кальцита [19].

Гипергенный комплекс массива Томтор включает линейную, площадную, плащевую и латеритную коры выветривания. Месторождение Томтор приурочено к латеритной коре выветри-

вания, которая в пределах массива Томтор сложена специфическими образованиями, в значительной мере сходными с большинством типичных латеритных кор выветривания карбонатитовых массивов, достаточно полно охарактеризованных в отечественной литературе [21, 22]. Важным отличием томторской коры выветривания является наличие признаков перемиыва и переотложения гипергенного материала. В латеритной коре в пределах карбонатитового комплекса выделяются четыре горизонта (сверху вниз): каолинит-крандаллитовый, сидеритовый, гетитовый и франколитовый.

Каолинит-крандаллитовый горизонт залегает на разнообразных отложениях латеритной коры выветривания в пределах впадин и сложен слоистыми, горизонтально-слоистыми, косослоистыми, волнисто-слоистыми пелитовыми, алевроитовыми, редко песчаными породами различной окраски. Мощность отдельных слойков от долей миллиметра до 1 см, редко более. Изредка текстура пород массивная, еще реже они имеют дресвяно-щебнистую структуру. Уникальный набор рудных минералов: монацит, пироксор, рутил, группа крандаллита (флоренсит, гоацит и горсейксит), выступающих, как правило, в ранге «породообразующих», обуславливающих чрезвычайно богатые содержания REE, выделяет этот горизонт как «рудный пласт».

Сидеритовый горизонт развит повсеместно, за редким исключением, где он, вероятно, эродирован. Породы сидеритового горизонта преимущественно представляют собой светло-серые, пепельно-серые, буровато-серые, рыхлые, комковатые, зернистые массы однородной нечетко полосчатой, пятнистой текстуры. Наличие в составе пород лимонита окрашивает их в бурый тон. В переходных разностях к гидрослюдыстым разностям они приобретают зеленоватую окраску за счет хлоритов и гидрослюд, унаследованных, очевидно, от исходных пород.

Гетитовый и франколитовый горизонты сложены рыжими, красновато-бурыми, кирпично-красными, табачно-желтыми и желтоватыми окристыми образованиями, от рыхлых до весьма крепких, от слоистых до массивных и брекчиевидных, встречающихся совместно (рис. 2, 5).

Гетитовый горизонт отличается наиболее простым строением, при котором гетит и франколит слагают свыше 70 % объема горизонта при явном преобладании первого. Франколитовый горизонт сложен более чем наполовину породами

РОЛЬ ФОСКОРИТОВ В МИНЕРАГЕНИИ ТОМТОРСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

Химические составы пород массива Томтор (мас.%)\*

Chemical compositions of the rocks from the Tomtor massif (wt.%)\*

Породы, количество анализов Rocks, number of analyses	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>tot</sup>	MnO	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Σ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Кальцит-микроклин-слюдистая порода (n = 87) Calcite-microcline-micaceous rock	29,39	3,04	8,20	12,68	0,76	6,24	13,28	6,46	0,28	2,59	0,05	13,95	96,92
Апатит-микроклин-слюдистая порода (n = 143) Apatite-microcline-micaceous rock	28,24	3,43	9,58	19,43	1,41	5,44	9,30	5,08	0,21	5,58	0,18	5,71	93,59
Карбонатиты безрудные (n = 55) Oreless carbonatites	7,89	0,77	2,08	7,57	1,32	6,17	35,08	1,06	0,16	1,62	0,09	33,62	97,43
Карбонатиты фосфорно-редкометалльные (n = 194) Phosphorus-rare metal carbonatites	6,10	0,47	1,17	7,00	1,26	4,17	39,22	0,90	0,17	3,87	0,21	32,43	96,97
Карбонатиты редкометалльные (n = 37) Rare metal carbonatites	9,90	1,54	2,00	11,94	3,20	8,75	24,22	2,08	0,17	1,13	0,19	27,71	92,83
Фоскориты (n = 36) Phoscorites	23,59	2,63	9,22	19,52	0,56	5,10	16,36	3,90	1,14	4,08	0,03	He опр.	86,12
Магнетитовые руды фоскоритов (n = 6) Magnetite ores of phoscorites	14,92	4,48	6,11	51,23	0,92	4,99	2,98	2,81	0,28	0,65	0,08	He опр.	89,45
Апатитовые руды фоскоритов (n = 4) Apatite ores of phoscorites	5,19	0,25	1,53	3,01	0,43	1,50	47,03	1,04	0,26	25,03	0,01	He опр.	85,27
Сидеритовый горизонт (n = 260) Siderite horizon	9,89	2,75	6,06	38,36	2,76	1,19	3,69	0,51	0,11	4,90	0,70	17,83	88,75
Гетитовый горизонт (n = 125) Goethite horizon	6,73	1,85	2,89	51,43	5,37	0,97	4,74	0,25	0,13	4,21	0,84	8,99	88,40

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Франколит-гетитовый горизонт ( $n = 113$ ) Francolite-goethite horizon	10,87	1,26	1,89	28,02	2,99	1,19	23,73	0,49	0,25	16,26	0,73	5,52	93,20

\* Химические анализы выполнены в ГУП ЦГАЛ, г. Якутск, аналитики Л. Холодова, Т. Забуга и в НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, аналитик Т.В. Степанова. Низкие суммы объясняются недоопределением летучих компонентов, а также высоким содержанием рассеянных элементов, не представленных в таблице.

\* Chemical analyses were performed at the State Unitary Enterprise TsGAL, Yakutsk by assayer L. Kholodova, T. Zabuga, and Research and Production Institute of PJSC ALROSA (PJSC), Mirny by assayer T. Stepanova. The low amounts are explained by the underdetermination of volatile components, and high content of trace elements not presented in the table.

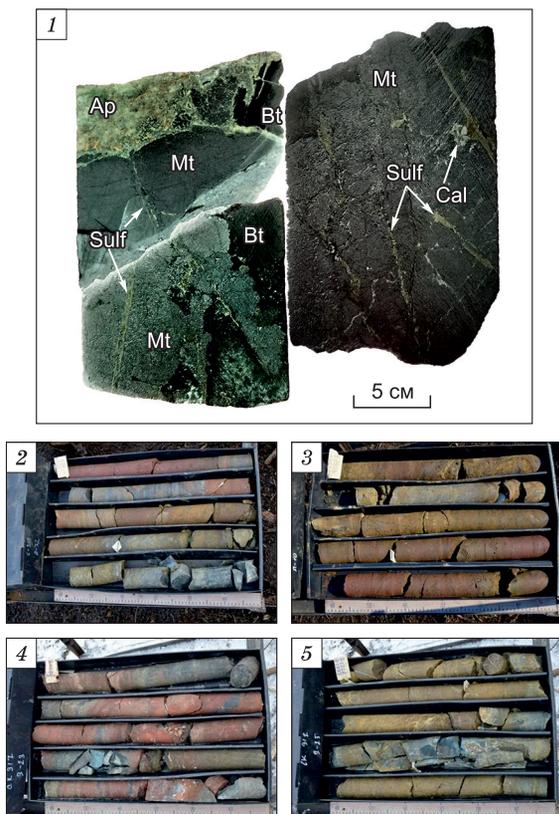
смешанного (силикатно-фосфатного) состава, доля собственно франколитовых пород составляет, как правило, более 40–80 %, иногда дости-

гая 90 % объема горизонта [7]. Визуально выделение франколитового и гетитового горизонтов весьма затруднительно и возможно лишь по результатам геофизических исследований скважин, а более уверенно – по химическому анализу, поэтому здесь они рассматриваются нами в едином гетит-франколитовом горизонте.

Образования гетит-франколитового горизонта распространены локально на восточном фланге Северного участка на глубинах от 100 м и ниже (скв. 603, 414, 242). На Южном участке они распространены более широко: глубины их залегания варьируют от 30 до 200 м и более. При этом немаловажно отметить, что породы данного горизонта залегают локально на различных уровнях коры выветривания и в пределах изученных участков не имеют площадного развития, как, например, образования гидрослюдистого и сидеритового горизонтов. Более того, на участках распространения пород франколитового горизонта зачастую наблюдаются брекчирование, катаклаз и милонитизация, крутопадающий кливаж, что свидетельствует о значительных тектонических и усадочных процессах при их формировании.

При выполнении исследований проведен анализ распределения REE в фоскоритах и в карбонатитовом комплексе (по данным авторов) и в гипергенных образованиях (по [7, 12]).

Сравнение редкоземельных спектров перетолженных (эпигенетически измененных) кор выветривания, на примере руд участка Буранный, с фоскоритами и рудными карбонатитами массива Томтор не позволяет считать, что коры сформированы исключительно по единственному субстрату (рис. 3, а). Содержания редкозе-



**Рис. 2.** Образцы апатит-магнетитовых пород (1) и гетит-франколитового горизонта уч. Южный (2–5): 2 – скв. 308 (инт. 98–101 м), 3 – скв. 338 (инт. 32–35 м), 4 – скв. 317 (инт. 68–71 м), 5 – скв. 317 (инт. 74–77 м).

**Fig. 2.** Samples of apatite-magnetite rocks (1) and goethite-francolite horizon at the Yuzhny site (2–5): 2 – well 308 (int. 98–101 m), 3 – well 338 (int. 32–35 m), 4 – well 317 (int. 68–71 m), 5 – well 317 (int. 74–77 m).

мельных элементов в рудах участка Буранный образуют наклонный спектр с повышенными концентрациями легких лантаноидов относительно тяжелых, без ярко выраженных аномалий. Фоскориты, ввиду наличия участков существенно различного минерального состава, образуют более широкую полосу. Наиболее интересны спектры апатитовых и карбонат-биотитовых участков фоскоритов.

Апатитовые участки имеют субгоризонтальное распределение редкоземельных элементов, с ярко выраженным минимумом по Се. При этом спектры содержаний тяжелых лантаноидов близки к таковым в рудах участка Буранный. Аналогичное распределение с минимумом по Се характерно и для рудных карбонатитов, однако содержание в них тяжелых лантаноидов на порядок ниже.

Карбонат-биотитовые участки фоскоритов характеризуются общими содержаниями REE на два порядка ниже, чем для собственно апатитовых руд, однако такие участки имеют выраженную положительную аномалию по Се. Таким образом, распределение содержаний REE указывает на то, что для получения концентраций, характерных для эпигенетически измененных переотложенных кор выветривания, в качестве субстрата должны были выступать не только рудные карбонатиты, но и фоскориты. Положительные и отрицательные аномалии по Се, в сочетании с низкими и высокими содержаниями La, соответственно, объясняются спецификой REE-минерализации, характерной для разных процессов рудообразования.

В отношении Y и Sc (см. рис. 3, а) каолинит-крандаллитовый горизонт показывает на их прямую зависимость по концентрациям (от 0,42 до 1,18 мас. % для Y и 0,02–0,12 Sc) с достаточно высокой видимой положительной корреляцией. Составы пород карбонатитового и гипергенного комплексов расположены в области содержаний  $Y < 0,1$  % и  $Sc < 0,01$  %. Исключением являются апатитовые руды фоскоритов, содержание итрия в которых может превышать 0,2 %.

### Обсуждение

Предшественниками были выдвинуты различные генетические концепции образования уникально богатого оруденения. Кравченко С.М., Беляков А.Ю. и Покровский Б.Г. [15, 16] предполагали, что латеритные коры выветривания были сформированы по фоскоритам, прежде слагав-

шим центральное ядро массива Томтор, а уникально богатые руды образовались при гидротермальной переработке сформированного гипергенного комплекса с выносом и переотложением рудных элементов в верхнем горизонте, на контакте с перекрывающими осадочными отложениями [3, 8].

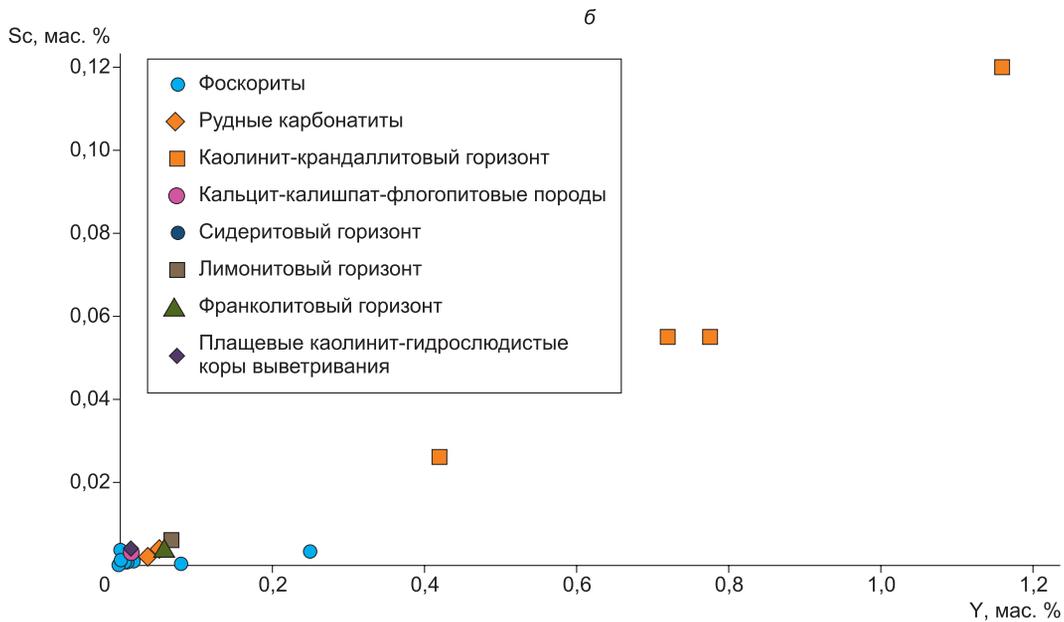
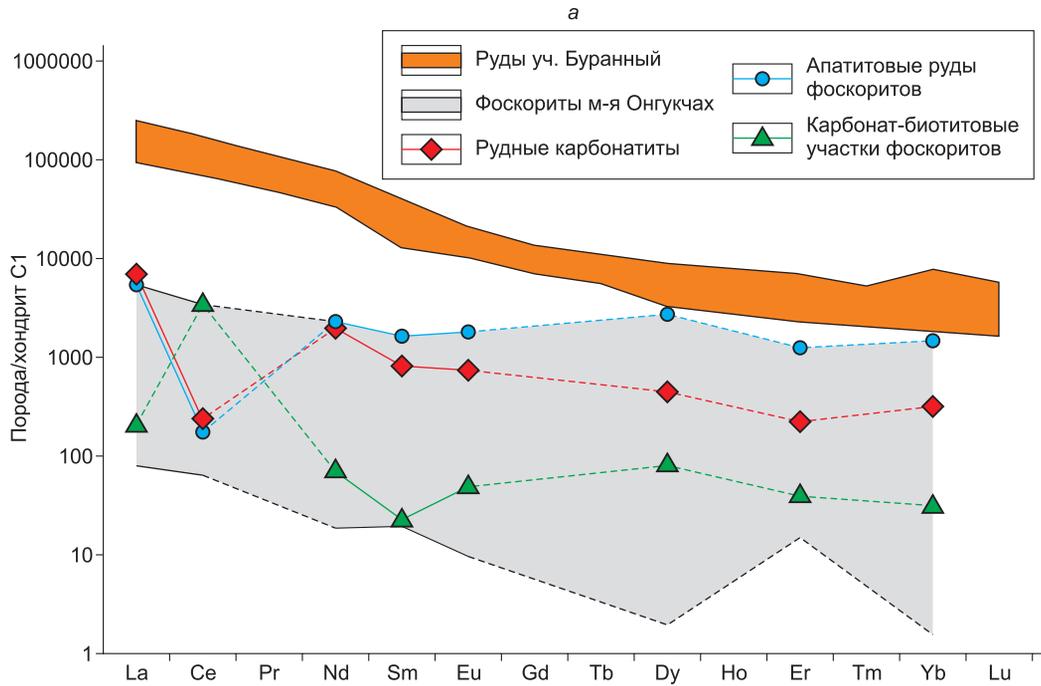
Вторая гипотеза разработана сотрудниками Института геологических наук СО РАН (г. Якутск) А.Р. Энтиным и О.А. Тяном, по мнению которых, уникально богатый верхний рудный горизонт представлен выветрелыми и нацело измененными рудоносными туфами поздних карбонатитов взрывной фации, отложившихся на дно раннепермского водоема [4, 7, 24].

Согласно третьей гипотезе, детально разработанной А.Д. Коноплевым (ВИМС), богатый рудный горизонт представлен делювиально-озерной россыпью ближнего переноса [8]. При этом породы, слагающие уникально богатый рудный горизонт, являются осадочными образованиями мелких озер и обрамляющих их склонов, сформировавшимися в результате действия терригенных и последующих хемогенных процессов при седиментации и эпигенезе за счет близко расположенной области питания, представленной латеритными корами выветривания карбонатитов.

Впоследствии было показано [7], что данные концепции по отдельности не могут в полной мере объяснить все особенности Nb-REE-оруденения Томторского рудного поля. Установлено, что в геолого-генетическом отношении эти руды связаны с корами выветривания рудоносных карбонатитов и по сути являются переотложенными (эпигенетически измененными) образованиями зоны гипергенеза [3]. Однако в работе по исследованию вещественного состава и генезиса руд месторождения Томтор [12] было доказано, что, с учетом широкой вариативности химических составов, данные образования не могли формироваться из единого источника.

На существенное участие апатит-магнетитовых руд в формировании франколит-гетитового горизонта указывает ряд характерных особенностей:

- 1) локальное распространение геологических тел, сопровождающихся тектоническими нарушениями;
- 2) аналогичный вещественный состав – как химический (см. таблицу), так и минералогический, с учетом гипергенных преобразований;



**Рис. 3.** Редкоземельные спектры комплексных редкометалльных руд участка Буранный, рудных карбонатитов и фоскоритов. Нормирование по [23] (а). Вариационная диаграмма в координатах Sc–Y (мас. %) для фоскоритов, карбонатитового и гипергенного комплексов (б).

**Fig. 3.** Rare earth spectra of complex rare metal ores at the Buranny site, ore carbonatites and phoscorites. Normalization according to [23] (a). Variation diagram in Sc–Y coordinates (wt %) for phoscorites, carbonatite and supergene complexes (b).

3) мономинеральные участки разного состава, ассоциирующие друг с другом в пределах одного рудного тела.

Таким образом, при формировании гипергенного комплекса массива Томтор за счет рудонос-

ных карбонатитов широкое участие принимали фоскориты. Рудные полиминеральные карбонатиты, являющиеся субстратом гипергенного комплекса, существенно отличаются от него по химическому составу и рудным компонентам. Осо-

бенно это касается баланса железа и фосфора, что подтверждает широкое участие фоскоритов, помимо рудоносных карбонатитов, в его формировании. В свою очередь, гипергенный комплекс латеритной коры выветривания послужил исходным материалом и субстратом уникально богатых руд – переотложенной эпигенетически измененной коры выветривания (каолинит-крандаллитового горизонта).

### Заключение

Новые данные по сравнительной минералогическо-геохимической характеристике горизонтов коры выветривания Томторского месторождения и апатит-магнетитовых пород (фоскоритов) свидетельствуют, что рудные коры выветривания сформированы при совместном участии рудных полиминеральных карбонатитов и существенном вкладе фоскоритов, однако его количественная оценка требует дополнительных исследований.

### Литература

1. Эрлих Э.Н. Новая провинция щелочных пород на северо-востоке Сибирской платформы // Зап. ВМО. 1964. Т. 90, вып. 6. С. 682–693.
2. Толстов А.В. Особенности минералогии и геохимии апатит-магнетитовых руд массива Томтор (Северо-Западная Якутия) // Геология и геофизика. 1994. Т. 35, № 9. С. 91–100.
3. 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.
4. Толстов А. В., Гунин А. П. Комплексная оценка Томторского месторождения // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2001. Т. 11. С. 144–160.
5. Cordeiro P.F.D.O., Brod J.A., Palmieri M., De Oliveira C.G., Barbosa E.S.R., Santos R.V., Assis L.C. The Catalão I niobium deposit, central Brazil: resources, geology and pyrochlore chemistry // Ore Geol. Rev. 2011. Vol. 41, No. 1. P. 112–121.
6. 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.
7. Толстов А.В. Главные рудные формации Севера Сибирской платформы. М.: ИМГРЭ, 2006. 212 с.
8. Коноплев А.Д., Толстов А.В., Васильев А.Т., Нечелюстов Г.Н., Кузьмин В.И., Складнева В.М., Дубинчук В.Т., Коноплева Е.В., Сидоренко Г.А. Особенности локализации редкометалльного оруденения на месторождении Томтор // Редкометалльно-урановое рудо-

образование в осадочных породах. Сб. науч. тр. М.: ВИМС, 1995. С. 223–241.

9. Слепцов А.П., Толстов А.В., Баранов Л.Н. Новый взгляд на полезные ископаемые Томторского рудного поля // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. М-лы VI Всерос. науч.-практ. конф. Якутск. 2016. С. 271–275.

10. Delitsyn L.M., Melent'ev 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. Vol. 462, No. 2. P. 165–168.

11. Слепцов А.П., Толстов А.В., Томашев А.В., Самсонов Н.Ю., Баранов Л.Н. Новое в методике подсчета запасов многокомпонентных руд (на примере Томторского рудного поля) // Разведка и охрана недр. 2019. № 6. С. 38–46.

12. Лапин А.В., Толстов А.В., Куликова И.М. Особенности распределения лантаноидов, иттрия, скандия и тория в уникальных комплексных редкометалльных рудах месторождения Томтор // Геохимия. 2016. № 12. С. 1104–1121.

13. 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. Vol. 89, No. 3. P. 125505. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.04.001>

14. Кравченко С.М., Беляков А.Ю., Покровский Б.Г. Геохимия и генезис Томторского массива (север Сибирской платформы) // Докл. РАН. 1992. Т. 322, № 5. С. 966–972.

15. Kravchenko S.M., Pokrovsky B.G. The Tomtor alkaline ultrabasic massif and related REE-Nb deposits, northern Siberia // Econ. Geol. 1995. Vol. 71 (7). P. 676–689.

16. Эпштейн Е.М., Данильченко Н.А., Постников С.А. Геология Томторского уникального месторождения редких металлов (север Сибирской платформы) // Геология рудных месторождений. 1994. Т. 36, № 2. С. 83–110.

17. Багдасаров Ю.А. Геохимические особенности карбонатитов и сопровождающих их силикатных пород щелочно-карбонатитового массива Томтор (Восточное Прианабарье, Якутия) // Геохимия. 1997. № 1. С. 10–20.

18. Владыкин Н.В., Котов А.Б., Борисенко А.С. и др. Возрастные рубежи формирования щелочно-ультраосновного массива Томтор: результаты геохронологических U-Pb и <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar исследований // Докл. РАН. 2014. Т. 454, № 2. С. 195–199.

19. Баранов Л.Н., Толстов А.В., Округин А.В., Слепцов А.П., Баранов Л.Н. Новое в минералогии и геохимии апатит-магнетитовых руд массива Томтор, Северо-Восток Сибирской платформы // Руды и металлы. 2018. № 2. С. 42–54.

20. Округин А.В., Толстов А.В., Слепцов А.П., Баранов Л.Н. Петрохимические особенности ассоциации ультраосновных-щелочных пород и карбонати-

тов Томторского массива и интерпретация возможных трендов их эволюции // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019. Т. 24, № 4.

21. Лапин А.В., Толстов А.В. Месторождения кор выветривания карбонатитов. М.: Наука, 1995. 208 с.

22. Толстов А.В., Черенков В.Г., Баранов Л.Н. Генезис и возраст рудной толщи Томторского месторождения ниобия и редких земель, Северо-восток Сибирской платформы // Руды и металлы. 2020. № 4. С. 32–44.

23. McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth // Chemical geology. 1995. Vol. 120, No. 3-4. P. 223–253.

24. Энтин А.Р., Зайцев А.И., Ненашев Н.И., Василенко В.Б., Орлов А.И., Тянь О.А., Ольховик Ю.А., Ольштынский С.И., Толстов А.В. О последовательности геологических событий, связанных с внедрением Томторского массива ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (Северо-западная Якутия) // Геология и геофизика. 1990. Т. 31, № 12. С. 42–51.

Поступила в редакцию 30.03.2022

Поступила после рецензирования 22.04.2022

Принята к публикации 29.04.2022

#### Об авторах

БАРАНОВ Леонид Николаевич, научный сотрудник, Научный аналитический центр, Вилно́йская геологоразведочная экспедиция, Акционерная компания «АЛРОСА» (публичное акционерное общество), 678174, Мирный, ул. Ленина, 39, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-6526-3635>, e-mail: [BaranovLN@alrosa.ru](mailto:BaranovLN@alrosa.ru)

ТОЛСТОВ Александр Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, академик АН РС(Я), главный научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук, 677000, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-6057-5987>, e-mail: [Tols61@mail.ru](mailto:Tols61@mail.ru)

#### Для цитирования

Баранов Л.Н., Толстов А.В. Роль фоскоритов в минерации Томторского рудного поля // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022, Т. 27, № 2. С. 195–206. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-195-206>

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-195-206

## The role of phoscorites in the minerageny of the Tomtor ore field

L.N. Baranov<sup>1,\*</sup>, A.V. Tolstov<sup>2,\*\*</sup>

<sup>1</sup>NAC VGRE PJSC «ALROSA», Mirny, Russia

<sup>2</sup>Diamond and Precious Metal Geology Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia

\*[Baranovln@alrosa.ru](mailto:Baranovln@alrosa.ru)

\*\*[Tols61@mail.ru](mailto:Tols61@mail.ru)

**Abstract.** The Tomtor massif of ultrabasic alkaline rocks and carbonatites (UAC) is located in the north-east of the Siberian Platform. The massif is one of the largest UAC in the world and is associated with the unique deposit Tomtor with colossal resources of Nb and REE. Moreover, the Ongkuchakh deposit with apatite-magnetite ores (phoscorites) is located within the massif. The deposit contains more than 1 billion tons of iron in total and about 500 million tons of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> with high concentrations of REE. The Tomtor massif represents an important economic and strategic facility for the development of the Russian Arctic. In this paper we demonstrate the contribution of phoscorites to the minerageny of the unique mineralization. We have provided geological and geochemical characteristics of the carbonatite complex and phoscorites. XFA and ICP AES methods were used to study their compositions in comparison with the carbonatite com-

*plex and horizons of the lateritic weathering crust that form the mineralization. The generally accepted opinion that the deposit was formed during the weathering of ore carbonatites is supported by the convincing facts proving the significant participation of phoscorites in the formation of Nb-REE mineralization in the supergene complex.*

**Keywords:** Siberian Platform, Tomtor, carbonatite, phoscorite, weathering crust, niobium, rare earths

### References

1. *Erllich E.N.* The new province of alkali rocks on the north of Siberian platform and its geological aspects // *Zapisky Vsesoiuznogo Mineralogicheskogo Obshestva*. 1964. Vol. 93. P. 682–693 (in Russian).
2. *Tolstov A.V.* Mineralogy and geochemistry of apatite-magnetite ores of the Tomtor Massif (Northwestern Yakutia) // *Russian Geology and Geophysics*. 1994. Vol. 35, No. 9. P. 76–84.
3. *Lapin A.V., Tolstov A.V.* The oxidation and reduction stages of formation of the supergene zone of carbonatite and its ore-bearing // *Geol. Ore Deposits*, 1991. No. 4. P. 81–91 (in Russian).
4. *Tolstov A.V., Gunin A.P.* Comprehensive assessment of the Tomtorskoye deposit // *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geology*. 2001. No. 11. P. 144–160 (in Russian).
5. *Cordeiro P.F.D.O., Brod J.A., Palmieri M., De Oliveira C.G., Barbosa E.S.R., Santos R.V., Assis L.C.* The Catalão I niobium deposit, central Brazil: resources, geology and pyrochlore chemistry // *Ore Geol. Rev.* 2011. Vol. 41, No. 1. P. 112–121.
6. *Lazareva E.V. et al.* Main minerals of abnormally high-grade ores of the Tomtor deposit (Arctic Siberia) // *Russian geology and geophysics*. 2015. Vol. 56, No. 6. P. 844–873.
7. *Tolstov A.V.* The main ore formations of the North of the Siberian platform. M.: IMGRE, 2006. 212 p.
8. *Konoplev A.D., Tolstov A.V., Vasiliev A.T., Nejablubov G.N., Kuzmin V.I., Sklyadneva V.M., Dubinchuk V.T., Konopleva E.V., Sidorenko G.* BUT. Features of localization of rare-metal mineralization at the Tomtor deposit // *Rare-metal-uranium ore formation in sedimentary rocks*. Sat. scientific tr. M.: VIMS, 1995. P. 223–241.
9. *Sleptsov A.P., Tolstov A.V., Baranov L.N.* A new look at the minerals of the Tomtor ore field // *Geology and mineral resources of the North-East of Russia. M-ly VI Vseros. Scientific-practical. conf. Yakutsk*, 2016. P. 271–275.
10. *Delitsyn L.M., Melent'ev 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. Vol. 462, No. 2. P. 165–168.
11. *Sleptsov A.P., Tolstov A.V., Tomashev A.V., Samsonov N.Y., Baranov L.N.* New in the methodology for calculating the reserves of multicomponent ores (on the example of the Tomtor ore field) // *Exploration and protection of mineral resources*. 2019. No. 6. P. 38–46 (in Russian).
12. *Lapin A.V., Tolstov A.V., Kulikova I.M.* Distribution of REE, Y, Sc, and Th in the unique complex rare-metal ores of the Tomtor deposit // *Geochemistry International*. 2016. Vol. 54, No. 12. P. 1061–1078.
13. *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. Vol. 80, No. 3. P. 125505. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.04.001>
14. *Kravchenko S.M., Belyakov A.Y., Pokrovsky B.G.* Geochemistry and Genesis of the Tomtor Massif (Northern Siberian Platform) // *Dokl. RAN*. 1992. Vol. 32, No. 5. P. 966–972 (in Russian).
15. *Kravchenko S.M., Pokrovsky B.G.* The Tomtor alkaline ultrabasic massif and related REE-Nb deposits, northern Siberia // *Econ. Geol.* 1995. Vol. 71 (7). P. 676–689.
16. *Epstein E.M., Danilchenko N.A., Postnikov S.A.* Geology of the Tomtor Unique Deposit of Rare Metals (North of the Siberian Platform) // *Geology of Ore Deposits*. 1994. Vol. 36, No. 2. P. 83–110 (in Russian).
17. *Bagdasarov Y.A.* Geochemical features of carbonatites and accompanying silicate rocks of the Tomtor alkaline-carbonatite massif (Eastern Anabar region, Yakutia) // *Geochemistry*. 1997. No. 1. P. 10–20 (in Russian).
18. *Vladykin N.V., Kotov A.B., Borisenko A.S. et al.* Age boundaries of the formation of the Tomtor alkaline-ultrabasic massif: results of geochronological U-Pb and  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  studies // *Dokl. RAN*. 2014. Vol. 454, No. 2. P. 195–199.
19. *Baranov L.N., Tolstov A.V., Okrugin A.V., Sleptsov A.P.* New in the 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).
20. *Okrugin A.V., Tolstov A.V., Sleptsov A.P., Baranov L.N.* Petrochemical features of the association of ultrabasic-alkaline rocks and carbonatites of the Tomtor massif and interpretation of possible trends in their evolution // *Natural Resources of the Arctic and Subarctic*. 2019. Vol. 24, No. 4 (in Russian).
21. *Lapin A.V., Tolstov A.V.* Deposits of weathering crusts of carbonatites. M.: Nauka, 1995. 208 p. (in Russian).
22. *Tolstov A.V., Cherenkov V.G., Baranov L.N.* Genesis and the age of the ore strata of the Tomtor deposit of niobium and rare earths, northeast of the Siberian platform // *Ores and metals*. 2020. No. 4. P. 32–44 (in Russian).
23. *McDonough W.F., Sun S.S.* The composition of the Earth // *Chemical geology*. 1995. Vol. 120, No. 3-4. P. 223–253.

24. *Entin A.R., Zaitsev A.I., Nenashev N.I., Vasilenko V.B., Orlov A.I., Tyan O.A., Olkhovik Y.A., Olshtynsky S.I., Tolstov A.V.* On the sequence of geological events associated

with the emplacement of the Tomtor massif of ultramafic alkaline rocks and carbonatites (Northwestern Yakutia) // *Geology and Geophysics*. 1990. Vol. 31, No. 12. P. 42–51.

*Submitted 30.03.2022*

*Revised 22.04.2022*

*Accepted 29.04.2022*

*About the authors*

BARANOV, Leonid Nikolaevich, scientific researcher, Vilyuyskaya Geological Exploration Expedition Public Joint Stock Company «ALROSA», 39 Lenina st., Mirniy 678174, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-6526-3635>, e-mail: BaranovLN@alrosa.ru

TOLSTOV, Alexander Vasilievich, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), chief scientific researcher, Institute of Geology of Diamond and Precious Metals, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39 Lenin pr., Yakutsk 677000, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-6057-5987>, e-mail: Tols61@mail.ru

*For citation*

*Baranov L.N. Tolstov A.V.* The role of phoscorites in the minerageny of the Tomtor ore field // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022, Vol. 27, No. 2. P. 195–206. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-195-206>