

## Конвергентные минералогические особенности силикатных магматических и карбонатитовых пород Томторского массива на северо-востоке Сибирской платформы

А.В. Округин, А.И. Журавлев

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия  
okrugin@diamond.ysn.ru; ai.zhuravlevgeo@gmail.com

**Аннотация.** Приводится сравнительный анализ типоморфных особенностей минералов разных типов силикатных пород и карбонатитов Томторского массива с целью установления их конвергентных признаков. Чтобы исключить взаимное воздействие друг на друга пород, сформировавшихся в разное время, для изучения отобраны пробы из разных разрозненных самостоятельных трубочных тел мельтейгитов, пластового тела щелочных пикритов и секущей дайки карбонатита, расположенных южнее Томторского массива, а также из неизменных нефелиновых сиенитов с южной окраины массива. Показано, что среди породобразующих и акцессорных минералов, в том числе и редкометалльных рудных минералов разных силикатных магматических пород и карбонатитовых образований выявляются интересные конвергентные особенности. Такими особенностями обладают как породобразующие минералы – пироксены, слюды, полевые шпаты, фельдшпатоиды, гранаты, так и основные и редкие карбонаты, окисно-рудные минералы, в том числе хромсодержащие шпинелиды, а также сульфидные и другие экзотические фазы. Новые данные по типоморфным особенностям минералов подтверждают полученные нами ранее данные по выделению пяти кластеров по ассоциации петрогенных и ряда рудных компонентов среди пород Томторского массива. Наиболее интересным нюансом в этом плане оказалось подтверждение сближения группы явных высокотемпературных раннемагматических элементов – MgO, Cr и Ni с группой CaO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и Y – компонентов, образующих карбонатитовые дериваты. Например, наличие высокохромистых шпинелидов в щелочных пикритах и в карбонатитах указывает на сквозной характер формирования хромистых фаз в данных породах. Подобные исследования помогут раскрыть минералогические критерии генетического родства между силикатными расплавами и связанными с ними карбонатитовыми дериватами, которые могут формировать богатые редкими элементами оруденения.

**Ключевые слова:** щелочно-ультраосновные породы, мельтейгиты, щелочные пикриты, сиениты, карбонатиты, месторождения редких элементов, Томторский массив.

**Благодарности.** Авторы благодарят коллег, принимавших участие в выполнении полевых, лабораторных, аналитических работ и способствовавших проведению данных исследований. Работа выполнена в рамках НИР ИГАБМ СО РАН (№ 0381-2019-0003).

### Введение

Томторский массив не только является уникально богатым редкометалльным месторождением, представляющим огромный стратегический интерес, но и относится, по своему геологическому и петрографическому строению, к одному из сложных объектов, требующих детальных научных изысканий. Подобные рудно-магматические комплексы могут быть источниками не только месторождений редких элементов, но и благородных металлов, образующих, по наше-

му мнению, широко распространенные в данном районе площадные комплексные золото-платиновые россыпепроявления. В предыдущей нашей статье [1] были даны результаты предварительных исследований петрохимических особенностей силикатных пород Томторского массива, представленных фойдолитами, нефелиновыми сиенитами, мелкими секущими телами щелочно-ультраосновных пород, а также жильными и линзовидными телами силикатно-апатит-магнетитовых пород – камафоритов, а так-

же были сделаны из них некоторые петрогенетические выводы.

Данная статья является продолжением вышеуказанной работы и посвящена сравнительному рассмотрению минералогических особенностей типичных силикатных магматитов и карбонатитовых пород Томторского массива с целью выявления конвергентных признаков среди этих разных петротипных, но генетически взаимосвязанных пород.

### Методика исследований

Классификация щелочных ультраосновных пород, кимберлитов и карбонатитов севера Сибирской платформы, проводившаяся еще первыми их исследователями [2–5], продолжает видоизменяться [6–13; и др.]. Предлагается много вариантов разделения такой ассоциации петрогеохимически и минералогически родственных пород: от традиционного выделения двух автономных формаций – щелочно-ультраосновной с карбонатитами и кимберлитовой до их размежевания на множества по разным фаціальным, вещественным и другим признакам. Не дискутируя по этой сложной проблеме, мы пока придерживаемся точки зрения по [10, 13] о тройственном разделении карбонатит-кимберлитового формационного сообщества на 1 – алмазоносные кимберлиты; 2 – кимберлитоподобные пикрит-альпиевые породы (альпикриты), ассоциирующие с редкометалльными карбонатитами, и 3 – неалмазоносные и убогоалмазоносные кимберлиты, нередко называемые пикритами или пикритовыми порфиритами («кимпикритами») по [3].

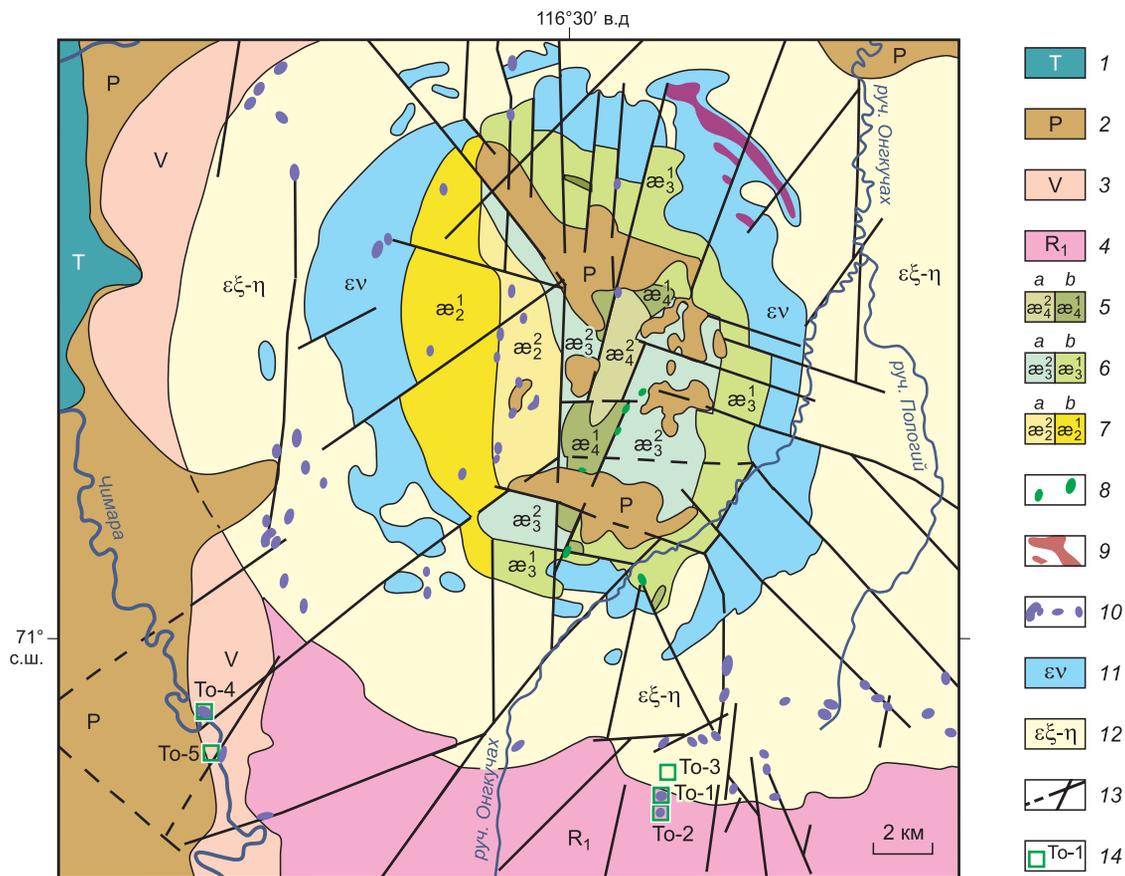
Такой подход импонирует нам тем, что использование понятия «кимберлит» *sensu stricto* (в узком смысле) ограничивает применение этого таксона областью алмазоносных пород, содержащих и минералы-спутники алмаза, что имеет важное прогнозно-минералогическое и генетическое значение. Еще А.Н. Заварицкий в своем знаменитом труде «Изверженные горные породы» [14] отметил, что за основание классификации горных пород должны браться не произвольно выбранные признаки, а важнейшие – характеризующие способ образования и происхождение этих природных объектов. Но в этом уяснении наблюдаемых признаков с их генетическими аспектами заключается, разумеется, и главная сложность естественной классификации. Поэтому совершенствование петрохимических и минералогических критериев размежевания потенциально алмазоносных

магматитов (типичных кимберлитов) от неалмазоносных кимпикритов, альпикритов и других конвергентных кимберлитам пород по [13], которые формируются в иных физико-химических условиях, является одной из актуальных задач в области исследования платформенного щелочно-ультраосновного магматизма, включающего как алмазоносную, так и редкометаллоносную формации. Это позволит найти для Томторского массива определенное место, полностью характеризующее его как единый целостный объект, обладающий редкометаллоносной специализацией. Поиски в составе данного массива признаков проявлений других формаций, например алмазоносных лампроитов, может привести не только к классификационной путанице, но и к ошибкам с практически-прогностической точки зрения.

Химический состав минералов изученных нами пород Томторского массива определялся на микронзондовом анализаторе Camebax-Micro французской фирмы Cameca, а их микроструктурные взаимоотношения изучались на сканирующем микроскопе JSM-6480LV японской фирмы JEOL в лаборатории рентгеноспектральных методов анализа в ИГАБМ СО РАН, аналитики: Христофорова Н.В., Журавлев А.И. В качестве эталонов применялись стандартизированные минералы, чистые металлы и их сплавы. Химический анализ силикатных пород выполнялся в отделе физико-химических методов анализа ИГАБМ СО РАН под руководством Л.Т. Галенчиковой. Ввиду сильной измененности некоторых силикатных пород и карбонатитов Томторского массива был выполнен их рентгенофазовый анализ на дифрактометре D2 PHASER фирмы Bruker (Германия),  $\text{CuK}_\alpha$ -излучение, 30 Кв, 10 Ма, аналитики Емельянова Н.Н. и Тронина Т.Ф. Идентификация минеральных фаз выполнена Заякиной Н.В. с использованием базы данных PDF 2.

### Минералого-петрографические особенности пород Томторского массива

Данные о геологическом строении и составе пород, в особенности, карбонатитовых образований Томторского массива приводятся в работах многих исследователей [11, 15–20] и хорошо известны широкому кругу геологов. Как было отмечено выше, мы здесь постараемся показать некоторые конвергентные минералогические особенности силикатных магматических пород и карбонатитовых образований, которые могут служить критерием оценки генетического родства



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта фрагмента Томторского массива по [10].

1 – нижнетриасовые туфы, лавы платобазальтов; 2 – пермские конгломераты, гравелиты, песчаники, алевролиты, угли; 3 – песчаники, гравелиты, алевролиты венда; 4 – доломиты, сланцы, алевролиты, песчаники улахан-курунгской свиты рифея; 5–7 – карбонатитовый комплекс: 5а – карбонатиты редкометалльные (анкеритовые), 5б – анкерит-шамозитовые породы, 6а – карбонатиты редкометалльные, 6б – апатит-микроклин-слюдястые породы, 7а – кальцитовые и доломит-кальцитовые карбонатиты, 7б – кальцит-микроклин-слюдястые породы; 8 – карбонатитовые брекчии; 9 – камафориты; 10 – мелкие секущие тела щелочно-ультраосновных пород; 11 – фойдолиты; 12 – щелочные и нефелиновые сиениты; 13 – разломы; 14 – места отбора исследованных образцов.

**Fig. 1.** Schematic geological map of the Tomtor massif [10].

1 – lower Triassic tuffs, lavas of plateau basalt; 2 – Permian conglomerates, gravelites, sandstones, silt-shales, coals; 3 – Vendian sandstones, gravelites, silt-shales; 4 – dolomites, shales, silt-shales, sandstones of Ulakhan-Kurug formation of Vendian; 5–7 – carbonatite complex: 5a – rare-metal carbonatites (ankerite), 5b – ankerite-chamosite rocks, 6a – rare-metal carbonatites, 6b – calcite-microcline-mica rocks, 7b – calcite and dolomite-calcite carbonatite, 7b – calcite-microcline-mica rocks; 8 – carbonatite breccias, 9 – kamaforites; 10 – small cross bodies of alkaline-ultrabasic rocks; 11 – foidolites; 12 – alkaline and nepheline syenites; 13 – fault; 14 – sampling sites.

между типичными силикатными магмами и карбонатным магматическим расплавом. Но к возможности существования последнего, несмотря на непосредственные факты излияния карбонатной лавы из вулканов, некоторые исследователи относятся с недоверием – от полного отрицания до паллиативного (двойственного) варианта образования карбонатитов, например, магмотогенно-метасоматическим или гидротермально-метасоматическим путем.

В связи с этим, для чистоты эксперимента, чтобы исключить следы взаимодействия силикатного и карбонатитового расплавов, проявленного интенсивно в центральной части массива, мы ограничились изучением самостоятельных мелких секущих тел, расположенных в непосредственной близости от самого массива (рис. 1). Изученные трубчатые тела (То-1 и То-2) мельтейгитов прорывают отложения рифея в непосредственной близости (200–500 м) от юж-

Составы изученных проб из пород Томторского массива

Table 1

Compositions of studied samples from rocks of Tomtor massif

Проба	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	CO <sub>2</sub>	п.п.п.	Сумма
To-1-2	33,72	3,23	11,36	7,86	3,37	0,23	7,44	16,75	3,40	2,33	0,89	4,54	3,76	0,69	99,57
To-2-1	31,70	2,73	11,79	5,19	4,83	0,32	5,75	15,65	4,84	2,91	1,26	5,71	5,95	0,46	99,09
To-3-1	49,50	0,76	19,37	4,74	1,41	0,21	1,47	3,07	7,42	3,48	0,06	5,50	2,33	0,18	99,50
To-4-2	31,25	2,87	8,38	10,29	5,82	0,18	15,18	11,12	0,63	2,57	1,22	4,45	5,37	0,65	99,98
To-5-1	14,12	1,86	5,17	6,71	7,18	0,34	4,99	29,23	0,21	0,82	1,25	2,60	24,96	0,50	99,94

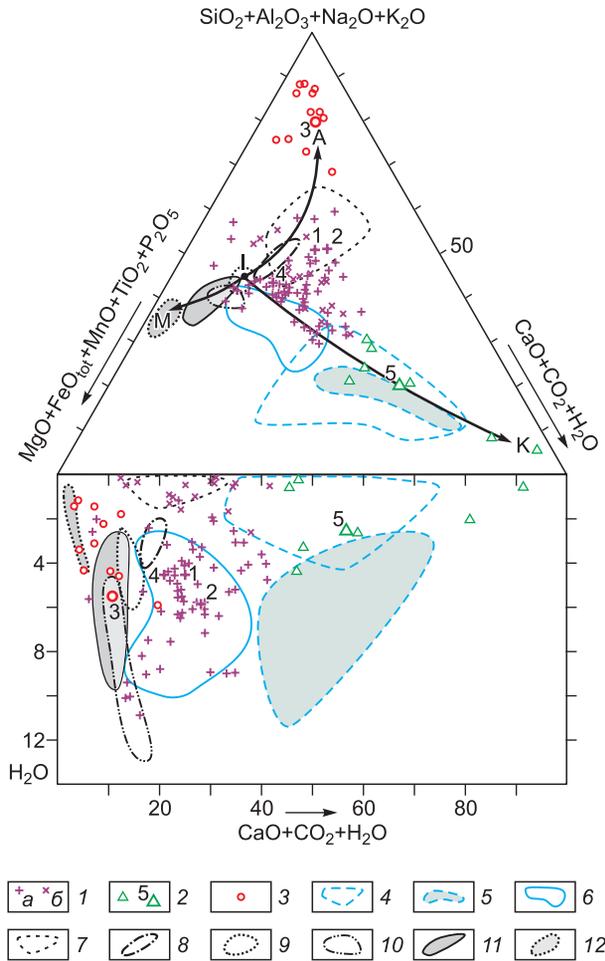
ного контакта массива. Возраст трубки То-2, определенный <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar методом по флогопиту, составляет 379,4±3 млн лет [1], в то время как становление самого Томторского массива и карбонатитов в основном охватывало венд-поздне-рифейское и среднедевонское время [15, 21, 22; и др.]. В 0,5 км севернее от этих тел, с южной окраины массива для изучения был отобран образец свежих нефелиновых сиенитов (То-3-1). Пластовое тело щелочных пикритов (То-4) изучено в обрыве правого берега р. Чимара в 2 км юго-западнее от массива, а недалеко от этого тела на левом берегу частично обнажается вертикальное дайкообразное (?) секущее тело (То-5) карбонатитов (см. рис. 1). Присутствие по р. Чимара жильных карбонатитов мощностью 1–4,5 м и сопровождающих их даек карбонитизированных альнеитов более древнего возраста было установлено в 60-е годы в 5–30 км к югу от Томторского массива, они маркируют глубинный разлом субмеридионального простирания, контролирующей массивы Томтор и Богдо, и соответственно расширяют возможность прогнозирования сателлитовых тел [9].

Составы изученных образцов показаны в табл. 1. В описанных телах не наблюдается следов вторичных наложенных процессов, что позволяет установить некоторые интересные конвергентные минералогические особенности между силикатными магматическими и карбонатитовыми породами, свидетельствующие об их глубинном генетическом родстве. Рассмотрев многие варианты диаграмм компонентного состава щелочных ультраосновных пород, кимберлитов и карбонатитов, мы для сравнительно анализа этих пород предлагаем следующую M–S–C–H<sub>2</sub>O диаграмму (рис. 2). Ее тройная система построена в координатах: M – фемических (мафических) компонен-

тов (MgO + FeO<sub>tot</sub> + MnO + TiO<sub>2</sub> + P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>); S – щелочно-сиалических составляющих (SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) и C – летучих компонентов (CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O) и CaO. Она напоминает диаграмму А. Холмса [23], но мы переместили CaO из фемической вершины к летучим компонентам, чтобы более контрастно оттенить роль карбонатитовой составляющей от фемических. Это позволяет более наглядно демонстрировать три основных тренда изменения состава пород – магнезиальную (M), щелочно-сиалическую (A) и карбонатитовую (K).

Нижняя двойная система (CaO + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O) – H<sub>2</sub>O показывает роль воды в составе летучих. С повышением CaO в карбонатитах содержание воды постепенно снижается и ближе к вершине (C) ее количество практически сводится к нулю, т. е. в существенно кальцитовых карбонатитах роль воды ничтожна. С повышением доли других петрогенных оксидов в интрузивных карбонатитах содержание воды постепенно возрастает и поля составов карбонатитов примыкают к кимберлитам. Повышенное содержание воды характерно для кимберлитов и меймечитов, обычно 4–10 мас. %, реже достигая 13–14 мас. %. Это выражается в широком развитии водных минералов в указанных породах, в особенности, серпентинизации оливинов. В карбонатитовых брекчиях Восточного Прианабарья [6], щелочных базальтоидах [24], мелилитовых породах [5] и оливинитах из кольцевых массивов [25] Маймеча-Котуйской провинции, а также в сиенитах Томторского массива содержание воды редко превышает 4 %.

Мы предполагаем [1], что исходный расплав магматитов Томторского массива был близок пикритовым порфирирам Гулинского массива, фракционная дифференциация которых при осаждении оливина и хромшпинелида по [25] приво-



**Рис. 2.** Составы пород щелочных, ультраосновных, кимберлитовых и карбонатитовых комплексов на севере Сибирской платформы на диаграмме М–S–С–H<sub>2</sub>O (мас. %). 1–3 – Томторский массив: 1 – мелкие секущие тела щелочных пикритов (а – данные авторов; б – по [12]); 2 – карбонатиты, цифры 1–5 на более крупных значках соответствуют номерам изученных проб То-(1, 2, 3, 4, 5); 3 – нефелиновые и щелочные сиениты; 4–6 – поля составов кимберлитов и карбонатитов Восточного Прианабарья: 4 – карбонатитовые брекчии (n = 72); 5 – интрузивные карбонатиты (n = 7) по [6] и 6 – интрузивные кимберлиты (n = 52) по [4]; 7–11 – Маймеча-Котуйская провинция: 7 – мелилитовые породы (n = 16) по [5]; 8 – эффузивы пикритов и щелочных базальтоидов (n = 4) по [24]; 9 – пикритовые порфиры (n = 8); 10 – меймечиты (n = 26); 11 – дуниты-перидотиты (n = 19) Гулинского массива и 12 – оливиниты (n = 14) щелочно-ультраосновных массивов по [25]. Кривые линии со стрелками – тренды изменения исходного состава пикритовой магмы (I) к ультрамафитовым (M), щелочно-сиалическим (A) и карбонатитовым (K) дифференциатам.

**Fig. 2.** Compositions of rocks from alkaline, ultrabasic, kimberlite and carbonatite complexes in the north of the Siberian platform on the M–S–C–H<sub>2</sub>O diagram (wt. %). 1–3 Tomtor massif: 1 – small cross-cutting bodies of alkaline picrites (a – authors data, b – according to [12]); 2 – carbonatites, numerals 1–5 on larger badges correspond to numbers of the studied samples To-(1, 2, 3, 4 and 5); 3 – nepheline and al-

kaline syenites; 4 – carbonatite breccias (n = 72); 5 – intrusive carbonatites (n = 7) according to [6] and 6 – intrusive kimberlites (n = 52) according to [4]; 7–11 – Maymecha-Kotuysskaya province: 7 – melilite rocks (n = 16) according to [5]; 8 – effusives of picrites and alkaline basaltoids (n = 4) according to [24]; 9 – picrite porphyrites (n = 8); 10 – meimechites (n = 26); 11 – dunites-peridotites (n = 19) of Guli massif and 12 – olivin-ites (n = 14) alkaline-ultrabasic massifs according to [25]. Curved lines with arrows - trends of changes of initial composition of picrite magma (I) to ultramafic (M), alkaline-sialic (A) and carbonatite (K) differentiates.

дит к появлению меймечитов, а далее и дунитов (рис. 2, тренд М). Такому исходному составу магматитов Томторского массива соответствуют щелочные пикриты То-4, а мельтейгиты То-(1, 2) и нефелиновые сиениты То-3 являются, по всей видимости, щелочно-сиалическими дифференциатами (тренд А). Как видно на рис. 2, породы Томторского массива образуют второй ярко выраженный карбонатитовый тренд (К) в результате постепенного возрастания в них CaO и CO<sub>2</sub>. Породы То-5 представляют собой переходную разновидность от обычных силикатных магматитов к типичным карбонатитам, содержащим обычно более 50 вес. % карбоната и менее 10–15 % кремнезема [9].

Нами ранее [1] было показано, что даже незначительные изменения содержаний SiO<sub>2</sub> и CaO в щелочных магмах могут кардинально поменять тренды кристаллизации исходной пикритовой магмы. На данной диаграмме мы можем наблюдать следующие тренды, приводящие к появлению разных ассоциаций пород, в процессе длительного эволюционного становления сложных рудно-магматических комплексов. Ранняя высокотемпературная интенсивная кристаллизация и отсадка оливина с хромшпинелидом приводят к появлению дунитов, как в Гулинском массиве. «Сухие» оливиниты из более мелких массивов Маймеча-Котуйской провинции характеризуются очень свежим обликом, оливин в них практически не серпентинизирован и ассоциирует с магнетитом [25]. Магнезиальный тренд уводит составы этих пород от исходного состава пикритов в сторону М-вершины диаграммы. Другой тренд изменения составов, в результате накопления щелочей и CaO, прослеживается в сторону практически безводных мелилитовых пород через промежуточное поле эффузивных щелочных базальтоидов. Далее наблюдается обособленное поле щелочных и нефелиновых сиенитов, которые в Томторском массиве имеют преобладающее распространение.

Если существование указанных двух трендов, в определенной мере, различными исследователями объясняется разными механизмами кристаллизационной дифференциации, то причины возникновения карбонатитовой ветви от пикритов к карбонатитам, по-видимому, имеют более глубокие корни как в прямом, так и переносном смысле и пока остаются не совсем понятными.

Основными минералами мельтейгитов трубчатых тел То-1 и То-2 являются моноклинный пироксен и слюда флогопит-биотитового ряда, образующие порфировые выделения в мелкозернистой кальцит-натролит-мезолитовой основной массе с обильными вкраплениями апатита, титаномагнетита в ассоциации с лейкоксеном, титанитом, перовскитом и гранатом андрадит-шорломитового состава (рис. 3, *a–в*). Реже встречаются мельчайшие включения карбонатов редкоземельных элементов (РЗЭ), находящиеся часто в сростании с апатитом (рис. 3, *г*). Наиболее представительные анализы минералов представлены в таблицах 2 и 3, а их фигуративные точки вынесены на диаграммах составов (рис. 4–6). Натролит-мезолитовые цеолиты являются типичными продуктами изменения нефелина, т. е. по химическому составу и минеральным ассоциациям данные породы относятся к недосыщенным кремнеземом щелочным (бесплагмоклазовым) породам соответствующим мельтейгитам.

Ввиду значительных позднемагматических аутометасоматических изменений пород и мелких размеров включений аксессуарных и рудных фаз, мы в данном сообщении использовали ограниченный круг представительных микрозондовых определений, подтверждаемых рентгенофазовым анализом на дифрактометре. На классификационных диаграммах пироксены из мельтейгитов в основном попадают в поля диопсида и авгита, реже эгирин-авгита или эгирина (см. рис. 4), а слюды располагаются преимущественно в области флогопита, частично переходя в поле аннита (см. рис. 5, *a*). Состав гранатов (рис. 5, *б*) изменяется от практически чистых андрадитов до поля меланитов Ti-андрадитов, охватывая более широкую область, чем гранаты, установленные нами в камафоритах Томторского массива [26].

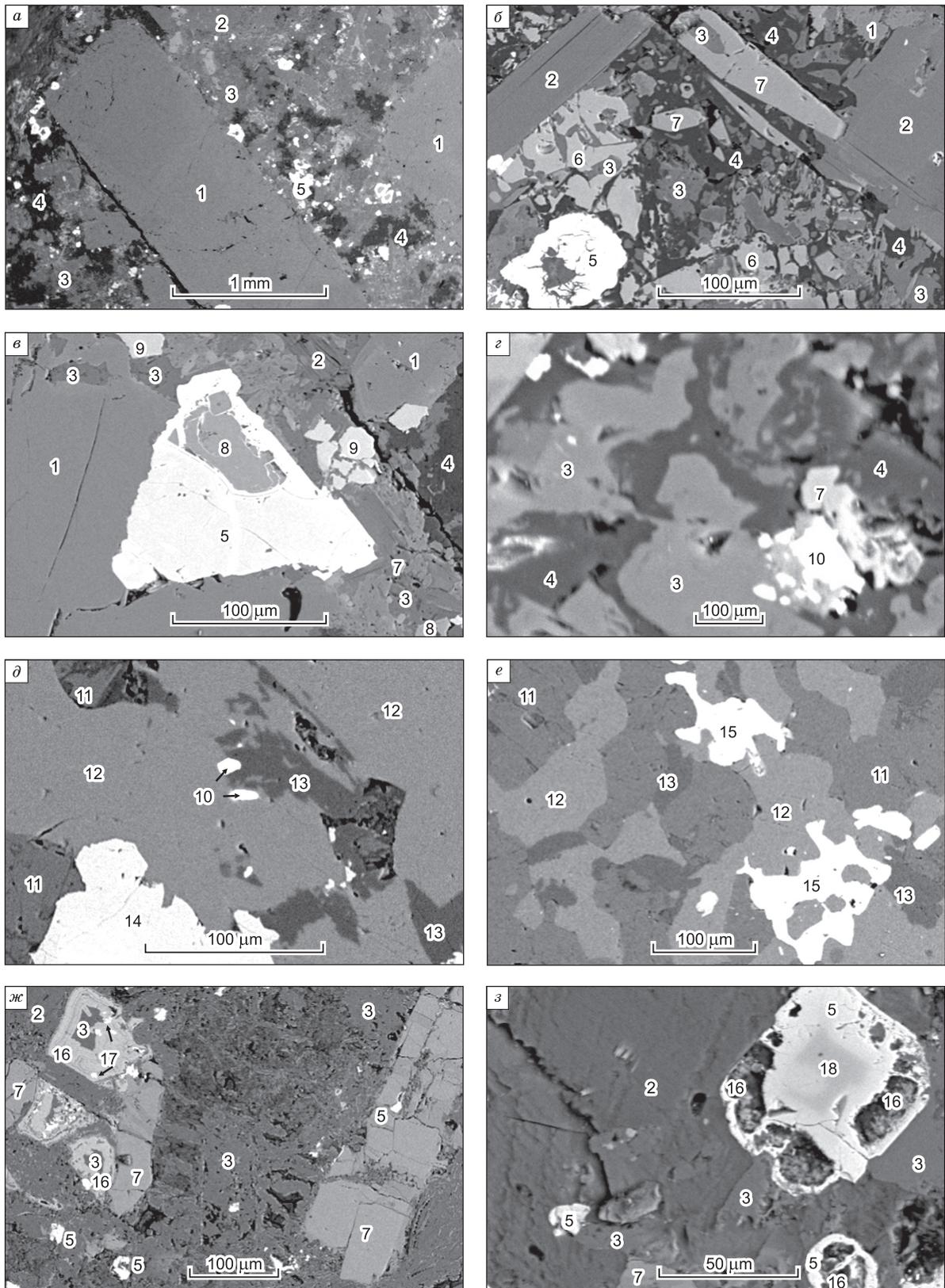
Породы пластового тела То-4 отличаются от выше рассмотренных тел мельтейгитов большей магнезиальностью, но меньшим содержанием алюминия, кальция и натрия (см. табл. 1), что отражается в их минеральном составе. Пироксен характеризуется повышенной долей энстатито-

вого минала (см. рис. 4, *б*), появляется серпентинизированный оливин. Карбонат в них представлен доломитом (рис. 6, *a*), мезолит, характерный для мельтейгитов, уступает место менее кальциевому натролиту. Появляются титанистые высокохромистые шпинелиды, постепенно переходящие в хромистые титаномагнетиты (табл. 4 и рис. 7). Все эти химические и минеральные особенности приближают данные породы к пикритам щелочного уклона.

В сиенитах То-3, наряду с нефелином (рис. 3, *д, е*), широко развит ортоклаз с микропертитовыми вростками альбита и гиалофана, содержащего до 10–20 % BaO (см. табл. 2), что соответствует примерно 20–30 % цельзианового компонента. Пироксен представлен эгирином, а редкие мелкие выделения слюды – мусковитом. Среди свежей нефелин-К-Na-ППШ основной массы сиенитов наблюдаются мелкие (до 10–20 мкм) включения карбоната РЗЭ, близкого по составу калкинситу (см. табл. 3). Также установлены более крупные (до 150 мкм) амёбовидные интерстиционные выделения минерала (см. рис. 3, *е*), состоящего из 30–32 % SiO<sub>2</sub>, 1–3,5 % TiO<sub>2</sub>, 25–27 % CaO, 7–8 % Na<sub>2</sub>O, 14–17 % ZrO<sub>2</sub> и 12–16 % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, что хорошо соответствует составу вельрита, являющегося аксессуарным минералом нефелиновых сиенитов и связанных с ними пегматитов и карбонатитов.

Мелкие включения карбонатов РЗЭ обнаружены также в мельтейгитах (То-1 и То-2), они по составу сходны с минералами из камафоритов Томторского массива [26]. В некоторых зернах карбонатов РЗЭ из пробы То-1-2 фиксируется высокое содержание WO<sub>3</sub> до 20 % (см. табл. 3), по-видимому, в этих фазах присутствует большая доля минала Се-тунгустита – минерала (Ce,Nd,Y)W<sub>2</sub>O<sub>6</sub>(OH)<sub>3</sub>, обнаруженного в касситерит-вольфрамитовых рудах, залегающих на турмалиновых гранитах Малайзии [34].

Апатит в мельтейгитах трубчатых тел То-1 и То-2 встречается в основном в виде идиоморфных удлиненных кристаллов гексагонального сечения в основной массе породы, тесно ассоциируя обычно с рудно-окисными ильменит–Ti-магнетитовыми агрегатами, а также мелкими (1–50 мкм) сульфидными минералами – пиритом и галенитом. По составу минерал соответствует фторсодержащей (F до 2–2,4 %) разновидности апатита. В некоторых зернах, по данным микрозондового анализа, отмечается снижение содержания P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> до 35–38 %, вместо 40–42 %



**Рис. 3.** Порообразующие и рудные минералы пород Томторского массива.  
*а-г* – мельтейгиты (обр. То-1-2): *а* – порфиновые выделения диопсида (1) в основной массе из флогопита (2), кальцита (3), мезолита (4) и магнетита (5); *б* – порфиновые кристаллы флогопита (2) в зернистой основной массе, содержащей диоп-

## КОНВЕРГЕНТНЫЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

сид (1), кальцит (3), мезолит (4), магнетит (5), гранат (6) и апатит (7); *в* – сростание пироксена (1), магнетита (5), сфена (8) и перовскита (9), окруженное флогопит (2)-кальцит (3)-мезолитовой (4) основной массой; *г* – мелкие выделения карбонатов РЗЭ (10) в ассоциации с апатитом (7) в кальцит (3)-мезолитовой (4) симплектитовой массе; *д*, *е* – нефелиновые сиениты (обр. То-3-1): *д* – мелкие включения карбонатов РЗЭ (10) в альбит (13) – ортоклазовом (12) микропертите в сростке с нефелином (11) и эгирином (14); *е* – «амебовидные» вкрапления велерита (15) в нефелин (11)-альбит (12)-ортоклазовой (13) симплектитовой матрице; *ж*, *з* – карбонатиты (обр. То-5-1): *ж* – идиоморфные кристаллы апатита (7) и футляровидных зональных выделений лейкоксена (16) с мелкими включениями Се-монацита (17) в глинисто-сидерит-кальцитовой (3) основной массе; *з* – зональное зерно магнетита (5) с реликтом ядра хромистого шпинелида (18) в сростании с флогопитом (2) и кальцитом (3). Изображения в обратно рассеянных электронах.

**Fig. 3.** Rock-forming and ore minerals from rocks of Tomtor massif.

*a-g* – melteigites (samp. To-1-2): *a* – porphyry of diopside (1) in the groundmass of phlogopite (2), calcite (3), mesolite (4) and magnetite (5); *б* – porphyry crystals of phlogopite (2) in grained groundmass that contained diopside (1), calcite (3), mesolite (4), magnetite (5), garnet (6) and apatite (7); *в* – intergrowth of pyroxene (1), magnetite (5), titanite (8) and perovskite (9), surrounded by phlogopite (2)-calcite (3)-mesolite (4) groundmass; *г* – small particles of REE carbonates (10) in association with apatite (7) in calcite (3)-mesolite (4) symplectite mass; *д*, *е* – nepheline syenites (samp. To-3-1): *д* – small inclusions of REE carbonates (10) in albite (13)-orthoclase (12) microperthite in intergrowth with nepheline (11) and aegirine (14); *е* – «amoeba-shaped» inclusions of wöhlerite (15) in nepheline (11)-albite (12)-orthoclase (13) symplectite matrix; *ж*, *з* – carbonatites (samp. To-5-1): *ж* – euhedral crystals of apatites (7) and «case-shaped» zoned substance of leucoxene (16) with small inclusions Ce-monazite (17) in clay-siderite-calcite (3) groundmass; *з* – zoned grain magnetite (5) with a relict core of chromium spinellid (18) in intergrowth with phlogopite (2) and calcite (3). Image in back-scattered electrons.

$P_2O_5$  в фторапатитах, что связано, по-видимому, с повышением количества  $CO_2$  и появлением карбонатапатита или франколита при наличии  $F > 1$  %. В таких случаях, в связи с невозможностью определения содержания  $CO_2$  на микрозонде, сумма анализов карбонатапатитов стабильно снижается до 90–88 %. В них также отмечается частое появление незначительных (не более первых %) примесей других петрогенных элементов, что вызвано, вероятно, захватом микровключений силикатной матрицы. Роль углерода в структуре карбонатапатита пока полностью не решена, но уменьшение доли  $P_2O_5$  в франколитах То-1-2 мы склонны связать с изоморфизмом  $PO_4 \leftrightarrow CO_2$ , а не замещением группой  $CO_3$  группы (ОН F, Cl) или  $C \leftrightarrow 2Ca$ . В пикритах пластового тела То-4 и карбонатите дайки То-5 все апатиты имеют низкое содержание  $P_2O_5$  34–39 % при низкой сумме (менее 90–93 %) анализов, что также указывает на их принадлежность к карбонатапатитам.

Интересной общей характерной особенностью щелочных пикритов То-4 и карбонатитов То-5 является сходство в них трендов изменения хромисто-титанистых шпинелидов (см. рис. 7), аналогичных таковым из щелочно-ультраосновных пород Гулинского массива [27], пикритовых габбро-долеритов Норильского района [28, 29] и убогоалмазонасной кимберлитовой трубки Малокуонамская [30]. В реликтовых ядрах Ti-Cr-шпинелидов в карбонатите То-5 содержание  $Cr_2O_3$  достигает 43 % (рис. 3, *ж*, табл. 4), а к периферии зерен со снижением хромистости шпинели возрастает её титанистость. Ti-магнетиты То-5 содер-

жат постоянную примесь MnO 1–2 % и MgO до 5 %. В мельтейгитах То-1 и То-2 титаномангнетиты имеют подобный состав, но в них в ассоциации с магнетитом появляются мелкие зерна Mn-ильменита, содержащего MnO от 2 до 22 %.

Карбонатит дайки То-5 в основном состоит из кальцита с повышенной примесью FeO и MgO до 4 % каждого окисла. Возможно, этим объясняется широкое развитие сидерита, содержащего до 13 % CaO, 11 % MgO и 4 % MnO, в виде тонких (до 50 мкм) сетчатых прожилков, в матрице кальцита. Кальцит находится также в тесном сростании с хлоритом и монтмориллонитом (см. табл. 2), среди которых часто встречаются футляровидные зональные выделения лейкоксена с ядром кальцита (см. рис. 3, *ж*). В пределах лейкоксеновой оболочки часто наблюдаются мельчайшие ксеноморфные светлые включения, обогащенные  $TiO_2$  до ~40 %,  $Se_2O_3$  до ~20 % и  $P_2O_5$  до ~10 %. Если допустить, что из-за мелких размеров ярко-светлых включений микрозондовым пучком захватывается частично и лейкоксеновая матрица, то истинный состав самих включений может соответствовать Се-монациту. Таким образом, мы считаем, что данные исследования имеют предварительный характер и требуют своего продолжения на более обширном материале.

Генетическое единство комплексов ультраосновных, щелочных пород и карбонатитов подтверждается не только их структурной связью, но и общностью петрохимических и минералогических признаков. Согласно модели фракционирования глобального магматического океана Земли

Представительные анализы силикатных минералов

Table 2

Representative analyzes of silicate minerals

№ проб	№ ан	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма
Диопсид (12-183; 283), авгит (23-2; 20-10; 287), эгирин (11-27; 4-7)												
To-1-2	12-183	44,93	2,74	6,57	1,23	6,09	0,09	13,02	24,43	0,48		99,58
To-1-2	23-2	46,78	2,64	2,66	4,70	13,11	0,10	8,51	20,18	1,82		100,50
To-1-2	11-27	49,91	1,72	1,66	30,08	0,00	0,08	1,76	2,71	12,41		100,32
To-2-1	20-10	49,59	1,76	2,05	0,00	15,83	0,52	9,58	21,09	0,10		100,52
To-4-2	283	51,74	0,89	0,65	2,31	6,01	0,30	12,76	24,09	0,90		99,64
To-4-2	287	50,49	1,62	2,65	2,59	5,43	0,21	13,79	20,62	1,22		98,63
To-3-1	4-7	51,41	0,23	0,40	17,70	8,75	0,12	2,21	12,65	6,86		100,33
Флогопит (11-1; 3-7; 23-10), ангит (11-11; 18-183), мусковит (20-3)												
To-1-2	11-1	39,34		11,40	1,61F**	12,28		20,16			10,44	95,22
To-1-2	11-11	37,73		11,04		28,38		9,95			9,80	96,90
To-4-2	3-7	37,13	6,32	15,12		8,52		19,80			9,18	96,07
To-4-2	18-183	40,80	0,93	11,03		20,25	0,35	12,21	0,54	0,34	8,86	95,30
To-5-1	23-10	37,25	5,08	16,72		9,78		19,59			8,98	97,40
To-3-1	20-3	45,90		36,02						3,89	7,30	93,11
Мезолит (14-1), натролит (23-5; 7-1), хлорит (26-1), монтмориллонит (19-2)												
To-1-2	14-1	41,65		31,19					5,19	11,31		89,33
To-1-2	23-5	46,62		27,78					1,95	14,71		91,06
To-4-2	7-1	47,52		27,34					0,32	16,42		91,60
To-5-1	26-1	33,91		15,61		13,42		22,59			1,63	87,16
To-5-1	19-2	54,69		18,12		9,76		3,62	1,55		0,88	88,62
Нефелин (19-1), ортоклаз (5-5), альбит (5-7), гиалофан (5-12; 16-4)												
To-3-1	19-1	43,29		32,84						15,54	5,97	97,64
To-3-1	5-5	64,25		19,81						1,29	14,75	100,10
To-3-1	5-7	68,51		20,20						11,67	0,28	100,66
To-3-1	5-12	47,31		30,73	10,95BaO				1,18	7,52	1,08	98,77
To-3-1	16-4	43,81		28,27	19,84BaO					4,05	2,20	98,17
Андрадит (14-5; 5-10), шорломит (14-12; 10-8)												
To-1-2	14-5	34,86	3,24	2,23	26,21				34,37			100,91
To-1-2	14-12	33,36	12,56	2,21	18,29				33,17			99,59
To-4-2	5-10	34,16	2,95	14,01	12,17			1,84	35,01			100,14
To-4-2	10-8	34,29	6,20		26,01				33,50			100,00

Примечание: \* – содержание Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> вычислено по стехиометрической формуле минерала, \*\* – указано содержание другого элемента, обнаруженного в данном анализе (F и BaO). Пустые клетки в таблицах 2–4 означают, что элемент не обнаружен в пределах чувствительности микрозондового метода анализа.

Note. \* – the Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content is calculated using the stoichiometric formula of the mineral, \*\* – content of other element (F and BaO). Empty cells in Tables 2–4 indicate that the element was not detected within sensitivity of microprobe analysis.

по В.С. Шкодзинскому [35], щелочно-ультраосновные, кимберлитовые, карбонатитовые и лампроитовые магмы являются остаточными распла-

вами, возникающими при затвердевании нижних пикритового и перидотитового слоев магматического океана. Им было показано, что на глубин-

Составы карбонатов РЗЭ

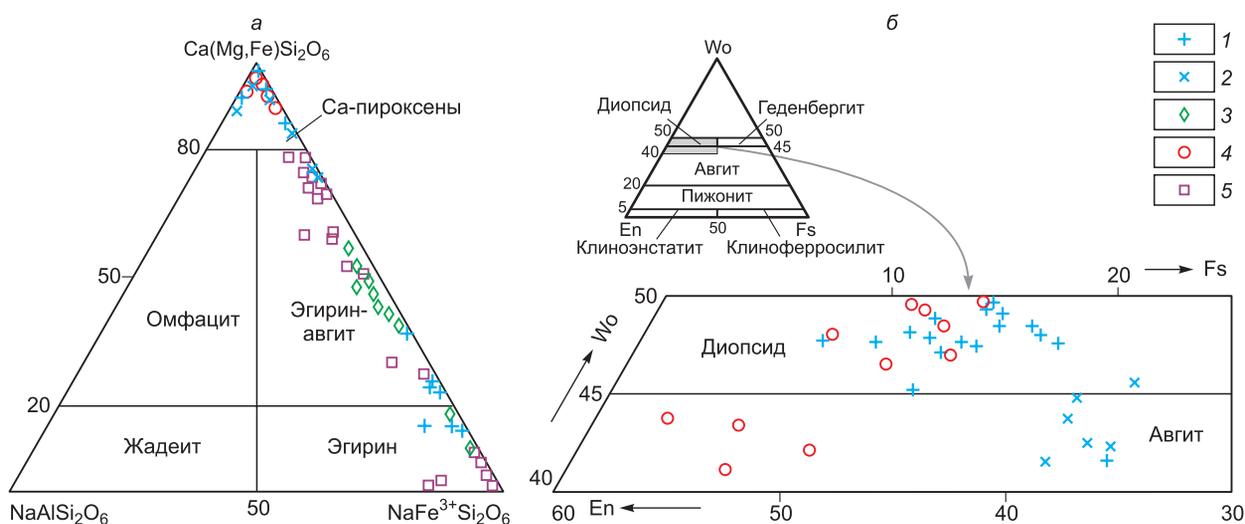
Table 3

Composition of REE carbonate

№ проб	№ ан	CaO	SrO	WO <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Сумма	Минерал
To-1-2	29-2	3,66			29,17	20,25	7,84	60,92	Калкинсит
To-1-2	20-2	6,43	11,75		20,84	12,62	4,70	56,34	Амбатоаринит
To-1-2	27-2	5,62	18,01		21,51	12,36	7,61	65,11	Амбатоаринит
To-1-2	22-6	5,60		20,00	20,90	10,96	5,47	62,93	La-ce-тунгустит
To-1-2	23-8	6,44		18,70	22,31	13,80	5,38	66,63	La-ce-тунгустит
To-2-1	2-2	20,32	9,06		19,25	8,71		57,34	Карбоцернаит
To-2-1	3-4	6,17	16,79		27,84	13,31		64,11	Амбатоаринит
To-2-1	20-7	3,17	19,57		19,01	10,21	8,79	60,75	Амбатоаринит
To-3--1	3-7	1,59			31,22	22,37		55,18	Калкинсит
To-3--1	15-3	1,78			31,33	17,96	6,96	58,03	Калкинсит
To-3--1	15-7	3,26			28,78	13,86	5,69	51,59	Калкинсит

ных и среднеглубинных стадиях всплывания и тектонического выжимания подплавленных пород происходит увеличение количества расплава, а на заключительных малоглубинных этапах подъема содержание расплава в магмах резко уменьшается в результате декомпрессионного затвердевания в связи с падением парциального давления и содержания летучих компонентов в расплаве вследствие их перехода в самостоятельную флюидную фазу. Такие затвердевавшие расплавы из-за повышения вязкости уже не могли перемещаться по дайкообразным магмоводам, и они далее прорывались в виде цилиндрических диапироподобных тел. Но низкотемпературные магмы, к которым могут относиться и карбонатитовые магмы, в близповерхностных условиях затвердевали в результате декомпрессионного выделения в них флюидной фазы. При этом про-

ную флюидную фазу. Такие затвердевавшие расплавы из-за повышения вязкости уже не могли перемещаться по дайкообразным магмоводам, и они далее прорывались в виде цилиндрических диапироподобных тел. Но низкотемпературные магмы, к которым могут относиться и карбонатитовые магмы, в близповерхностных условиях затвердевали в результате декомпрессионного выделения в них флюидной фазы. При этом про-



**Рис. 4.** Состав пироксенов на Ca-Mg-Fe-пироксены-жадеит-эгирин (а) и En-Wo-Fs (б) диаграммах. 1, 2 – мельтейгиты To-1 и To-2 соответственно; 3 – нефелиновые сиениты To-3; 4 – пикриты To-4; 5 – апофидолиты и камафориты по [26].

**Fig. 4.** Composition of pyroxenes on Ca-Mg-Fe-pyroxenes-jadeite-aegirine (a) and En-Wo-Fs (b) diagrams. 1, 2 – melteigite To-1 and To-2 respectively; 3 – nepheline syenites To-3; 4 – picrites To-4; 5 – apofidolites and kamaforites according to [26].

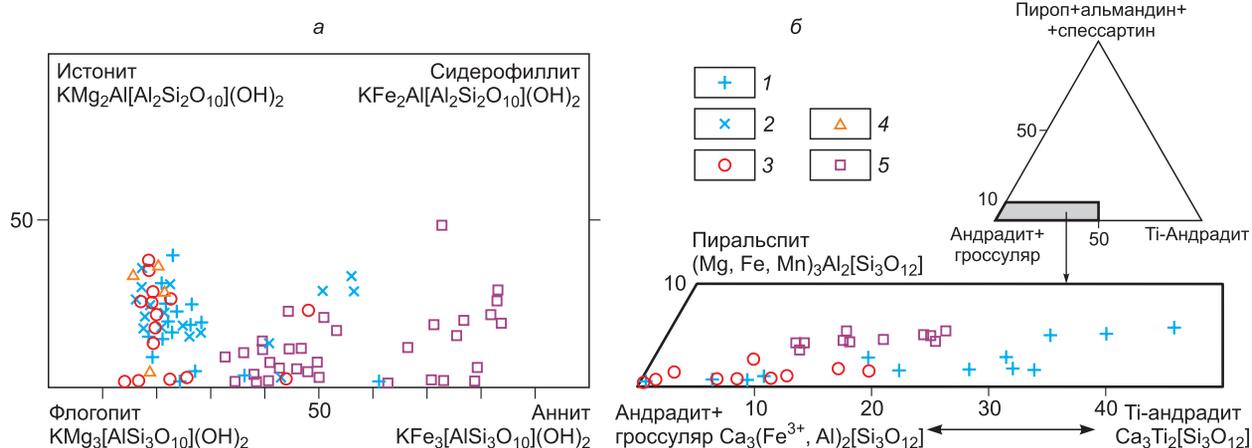


Рис. 5. Диаграммы составов биотитов (а) и гранатов (б).

1, 2 – мельтейгиты То-1 и То-2 соответственно; 3 – пикриты То-4; 4 – карбонатиты То-5-1 и 5 – апофоидолиты и камафориты по [26].

Fig. 5. Composition diagrams of biotites (a) and garnets (b).

1, 2 – melteigites To-1 and To-2 respectively; 3 – picrites To-4; 4 – carbonatites To-5-1 and 5 – apofoidolites and kamaforites according to [26].

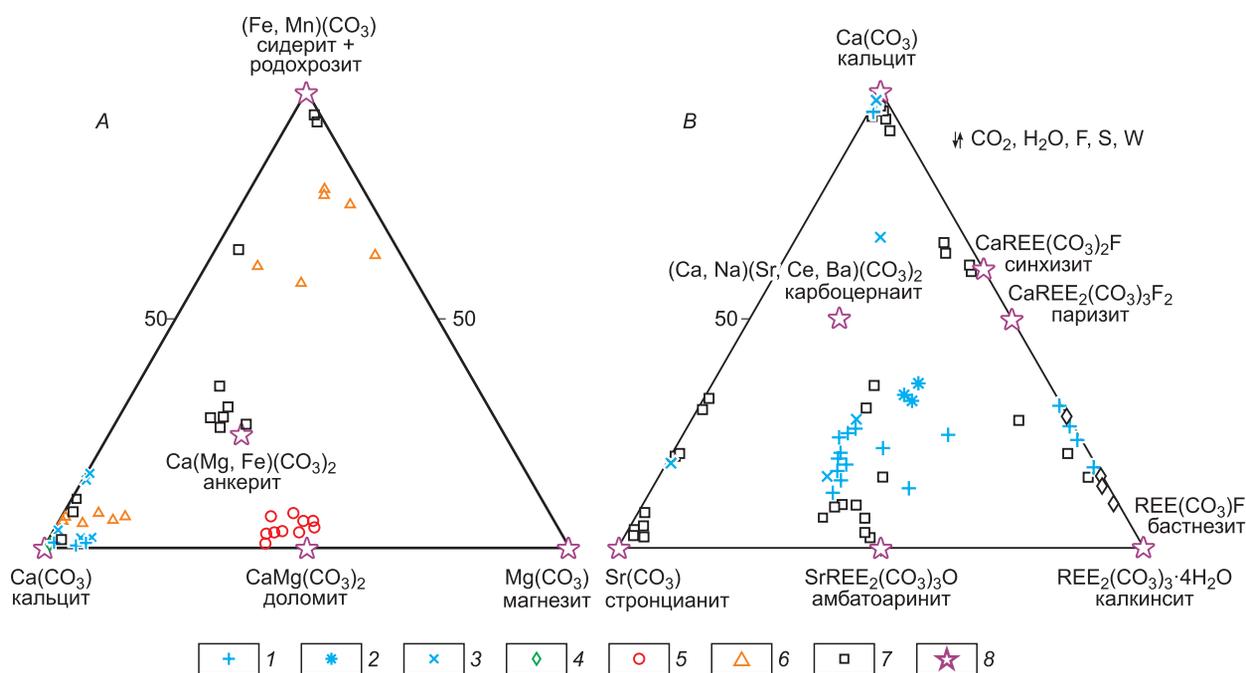
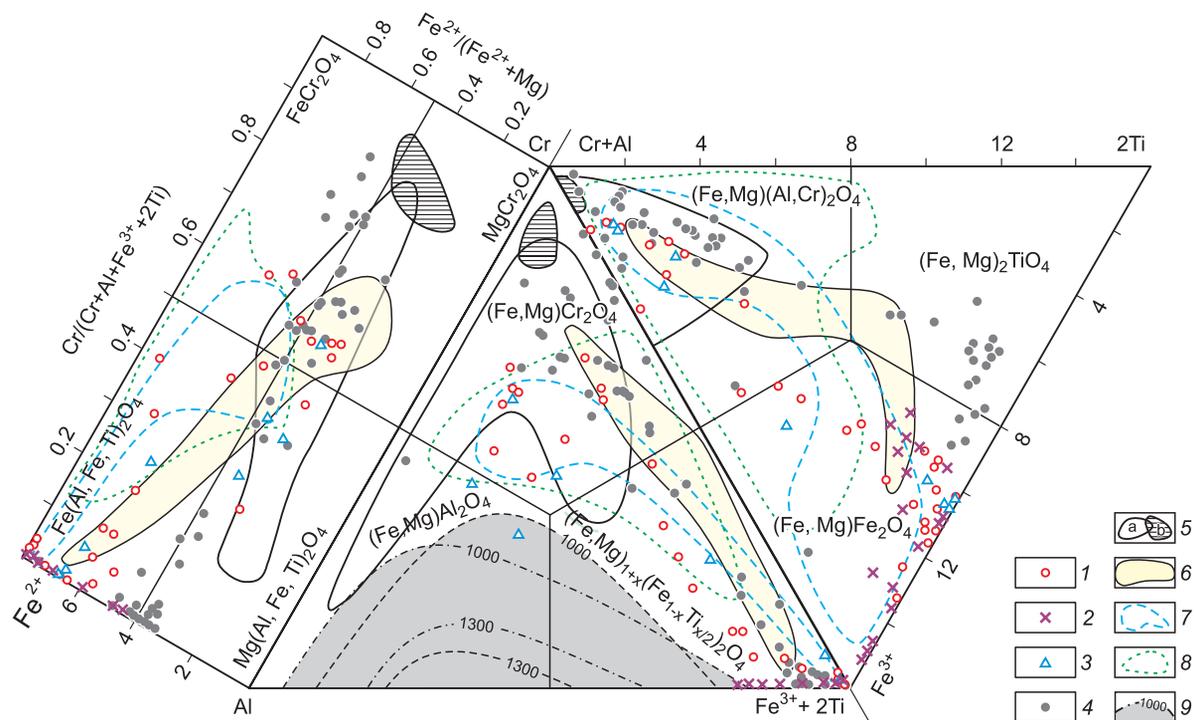


Рис. 6. Составы основных карбонатных минералов (а) и редких карбонатов Sr и PЗЭ (б).

1 – из мельтейгитов То-1-2; 2 – то же с заметной примесью минала Се-иттротунгусита  $Ce, Nd, YW_2O_6(OH)_3$ ; 3 – мельтейгиты То-2-1; 4 – нефелиновые сиениты То-3-1; 5 – пикриты То-4-2; 6 – карбонатиты То-5-1; 7 – апофоидолиты и камафориты по [26]; 8 – стехиометрические составы карбонатных минералов.

Fig. 6. Compositions of main carbonate minerals (a) and rare carbonates of Sr and PЗЭ (b).

1 – from melteigites To-1-2; 2 – same with significant admixture Ce-иттротунгусита  $Ce, Nd, YW_2O_6(OH)_3$ ; 3 – melteigites To-2-1; 4 – nepheline syenites To-3-1; 5 – picrites To-4-2; 6 – carbonatites To-5-1; 7 – apofoidolites and kamaforites according to [26]; 8 – stoichiometric compositions of carbonate minerals.



**Рис. 7.** Состав шпинелидов из пород севера Сибирской платформы

1–3 – Томторский массив (данные авторов): 1 – щелочные пикриты То-4; 2 – мельтейгиты трубки То-1; 3 – дайка карбонатитов То-5; 4 – микрокристаллы шпинелидов убогоалмазонасной тр. Малокуонамская [30]; 5–8 – поля составов ( $n$  – количество анализов): 5 – алмазонасные кимберлиты (а) Якутии ( $n = 118$ ) [31, 32], в том числе хромиты алмазной ассоциации (б); 6 – дуниты, перидотиты, меймечиты и пикриты ( $n = 36$ ) Гулинского массива [27]; 7 – пикритовые габбро-долериты ( $n = 61$ ) Норильского и Талнахского интрузивов [28]; 8 – ( $n = 4077$ ) [29]; 9 – изотермы ( $T, ^\circ\text{C}$ ) сольвусов систем  $\text{MgCr}_2\text{O}_4\text{--MgAl}_2\text{O}_4\text{--Mg}_2\text{TiO}_4$  (пунктирные линии) и  $\text{FeCr}_2\text{O}_4\text{--FeAl}_2\text{O}_4\text{--Fe}_2\text{TiO}_4$  (штрихпунктирные линии) по [33].

**Fig. 7.** Composition of spinellids from rocks of north of Siberian platform

1–3 – Tomtor massif (author data): 1 – alkaline picrite To-4; 2 – melteigite of the pipe To-1; 3 – carbonatite dyke To-5; 4 – micro crystals of spinellids of Malokuonamskaya pipe [30]; 5–8 – composition fields ( $n$  – number of analyzes): 5 – diamondiferous kimberlites (a) of Yakutia ( $n = 118$ ) [31, 32], including chromite of diamond association (b); 6 – dunites, peridotites, meimechites and picrites ( $n = 36$ ) of Guli massif [27]; 7 – picrite gabbro-dolerites ( $n = 61$ ) of Norilsk and Talnakh intrusions [28]; 8 – ( $n = 4077$ ) [29]; 9 – isotherms ( $T, ^\circ\text{C}$ ) of solvus of systems  $\text{MgCr}_2\text{O}_4\text{--MgAl}_2\text{O}_4\text{--Mg}_2\text{TiO}_4$  (dotted lines) and  $\text{FeCr}_2\text{O}_4\text{--FeAl}_2\text{O}_4\text{--Fe}_2\text{TiO}_4$  (dash-dotted lines) according to [33].

исходит консервация флюидной фазы, но увеличение давления в них со временем приводит к дезинтеграции верхних частей магматических колонн, обуславливая вулканические взрывы. Следы таких процессов на Томторском массиве фиксируются в виде многочисленных трубчатых тел брекчированных щелочных пикритов и карбонатитов.

Наиболее острым в этой проблеме является выяснение происхождения карбонатитов и характера взаимосвязи с пространственно ассоциирующими с ними силикатными магмами. В результате изучения силикатно-солевых включений в минералах Л.И. Паниной и И.В. Моториной [36] доказывается, что именно силикатно-карбонатная несмесимость является причиной появления исходных карбонатитовых расплавов, ассоции-

рующих с глубинными магмами. Также интересно отметить, что факт расслоения расплава на две несмешивающиеся жидкие фазы с резкой границей установлено в результате непосредственной экспериментально-технологической плавки пироклор-монацитовый и пироклор-монацит-крандаллитовой проб из самого Томторского массива [37].

### Заключение

В результате проведенных исследований нами получены новые данные о типоморфных особенностях породообразующих, второстепенных, акцессорных и рудных минералов силикатных магматических пород Томторского массива, и ассоциирующих с ними карбонатитовых образований. Многофазность становления разных петрогео-

## Представительные анализы Cr-Ti шпинелидов и магнетитов

Table 4

## Representative analyzes of Cr-Ti-spinels and magnetites

№ пробы	№ анализа	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	Сумма
To-4-1	9-116	3,54	6,03	45,76	11,58	24,86	0,40	6,86	99,03
To-4-1	3-116	3,58	6,20	42,14	16,17	21,18	0,48	9,18	98,93
To-4-1	16-116	0,55	11,71	35,46	21,47	20,00	0,36	8,60	98,15
To-4-1	18-116	7,45	5,36	30,58	19,67	28,31	0,49	6,58	98,44
To 4-1	22-116	6,89	7,79	18,64	33,13	18,86	0,48	12,51	98,30
To-4-1	285-183	9,19	6,36	7,56	36,86	31,97	0,94	4,66	97,54
To-4-1	283-183	7,35	0,22	1,31	54,10	28,61	0,80	5,03	97,42
To-5-1	9-179	2,12	14,68	43,26	9,00	16,97	0,44	11,94	98,41
To-5-1	20-1	2,28	23,67	31,91	10,71	16,25	0,32	13,74	98,88
To-5-1	23-4	5,31	21,72	23,84	14,68	21,62	0,55	11,88	99,60
To-5-1	4-5	5,38	5,01	17,12	36,14	29,85	1,12	4,35	98,97
To-5-1	20-9	12,03	0,37	1,11	45,80	35,92	1,55	2,99	99,77

химических типов магматитов и карбонатитов с разной степенью оруденения усложняет разработку петрогенетических прогнозно-поисковых критериев оценки разных типов минерализаций. В то же время установлено наличие сквозных минеральных серий в разных породах и рудах, например, Cr-Ti-шпинелидов, редкометалльных и других рудных фаз с аналогичными трендами изменения составов. Отсутствие минералов гроссуляр-альмандин-пиропового состава, хромитов алмазной ассоциации, пикроильменитов и других высокобарических индикаторных фаз, характерных для алмазоносных кимберлитов и лампроитов, свидетельствует о более низких P-T-параметрах глубинной эволюции Томторской материнской магмы. Выявление минералогических критериев генетического родства между силикатными расплавами и связанными с ними карбонатитовыми дериватами в последующем позволит адекватно оценить масштабы разнотипного оруденения сложного Томторского комплекса.

## Литература

1. Округин А.В., Толстов А.В., Слепцов А.П., Баранов Л.Н. Петрохимические особенности ассоциации ультраосновных щелочных пород и карбонатитов Томторского массива и интерпретация возможных трендов их эволюции // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019. № 4. С. 7–24.

2. Шейнманн Ю.М. Формация ультраосновных-щелочных пород // Щелочные интрузии, их размещение и связанная с ними минерализация. М.: Госгеолтехиздат, 1961. Вып. 12–13. С. 15–54.

3. Милашев В.А., Крутойарский М.А., Рабкин М.И., Эрлих Э.Н. Кимберлитовые породы и пикритовые порфиры северо-восточной части Сибирской платформы. М.: Госгеолтехиздат, 1963. 216 с.

4. Ковальский В.В., Никишов К.Н., Егоров О.С. Кимберлитовые и карбонатитовые образования Анабарской антеклизы. М.: Наука, 1969. 288 с.

5. Егоров Л.С. Мелилитовые породы Маймеча-Котуйской провинции. Л.: Недра, 1969. 248 с.

6. Маршинцев В.К. Карбонатитовые образования восточного склона Анабарского сводового поднятия. Якутск: Кн. изд-во, 1974. 120 с.

7. Корнилова В.П., Никишов К.Н., Ковальский В.В., Зольников Г.В. Атлас текстур и структур кимберлитовых пород. М.: Наука, 1983. 158 с.

8. Егоров Л.С. Ийолит-карбонатитовый плутонизм (на примере Маймеча-Котуйского комплекса Полярной Сибири). Л.: Недра, 1991. 260 с.

9. Багдасаров Ю.А., Гусев Г.С., Гуцин А.В., Межеловский Н.В., Морозов А.Ф. Металлогения магматических комплексов внутриплитовых геодинамических обстановок. М.: ГЕОС, 2001. 640 с.

10. Фролов А.А., Лапин А.В., Толстов А.В., Зинчук Н.Н., Белов С.В., Бургомистров А.А. Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минерогения, прогноз). М.: НИИ-Природа, 2005. 540 с.

11. Эпштейн Е.М., Аникеева Л.И. Некоторые вопросы геологии и петрологии комплекса ультраос-

новых щелочных интрузивных пород // Физико-химические проблемы формирования горных пород и руд. Т. 2. М.: Изд-во АН СССР. 1963. С. 182–195.

12. Владыкин Н.В., Торбеева Т.С. Лампроиты Томторского массива (Восточное Прианабарье) // Геология и геофизика. 2005. Т. 46, № 10. С. 1038–1049.

13. Белов С.В., Латын А.В., Толстов А.В., Фролов А.А. Минерагения платформенного магматизма (трапшы, карбонатиты, кимберлиты). Новосибирск. Изд-во СО РАН, 2008. 537 с.

14. Заварицкий А.Н. Изверженные горные породы. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 479 с.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. Толстов А.В. Особенности минералогии и геохимии апатит-магнетитовых руд массива Томтор (С-3 Якутия) // Геология и геофизика. 1994. Т. 35, № 9. С. 91–100.

19. 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.

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

21. Владыкин Н.В., Котов А.Б., Борисенко А.С. и др. Возрастные рубежи формирования щелочно-ультраосновного массива Томтор: результаты геохронологических U-Pb и  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  исследований // Докл. РАН. 2014. Т. 454, № 2. С. 195–199.

22. 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 // В: Chemie der Erde, 2019.

23. Holmes A. A contribution to the petrology of the kimberlite and its inclusions // Trans. Geol. Soc. S. Africa. 1936. Vol. 39. P. 379–428.

24. Жук-Почекутов К.А., Гладких В.С., Леонтьев Л.Н. Ассоциация щелочных базальтоидов–базальтов Маймеча-Котуйской вулcano-плутонической формации // Петрология и геохимические особенности комплекса ультрабазитов и карбонатитов. М.: Наука, 1965. С. 5–90.

25. Васильев Ю.Р., Золотухин В.В. Петрология ультрабазитов севера Сибирской платформы и некоторые проблемы их генезиса. Новосибирск: Наука, 1975. 272 с.

26. 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. DOI: 10.24411/0869-5997-2018-00011.

27. Васильев Ю.Р., Коненко В.Ф., Королюк В.Н. Акцессорные хромшпинелиды из ультраосновных пород Маймеча-Котуйского района // Материалы по генетической и экспериментальной минералогии. Новосибирск: Наука, 1976. С. 7–16.

28. Генкин А.Д., Дистлер В.В., Лапутина И.П. Хромитовая минерализация дифференцированных трап-поров интрузий и условия ее образования // Условия образования магматических рудных месторождений. М.: Наука, 1979. С. 105 – 126.

29. Chayka I.F., Zhitova L.M., Antsiferova T.N., Abersteiner A., Shevko A.Ya., Izokh A.E., Tolstykh N.D., Gora M.P., Chubarov V.M., Kamenetsky V.S. In-Situ Crystallization and Continuous Modification of Chromian Spinel in the «Sulfide-Poor Platinum-Group Metal Ores» of the Norilsk-1 Intrusion (Northern Siberia, Russia) // Minerals. 2020. Vol. 10. P. 498.

30. Бабушкина С.А. Состав микрокристаллов шпинелидов трубки Малокуонапская // Отечественная геология. 2008. № 5. С. 85–95.

31. Соболев Н.В., Похиленко Н.П., Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В. Особенности состава хромшпинелидов из алмазов и кимберлитов Якутии // Геология и геофизика. 1975. № 11. С. 7–24.

32. Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похиленко Н.П. Морфология и морфогенез индикаторных минералов кимберлитов. Новосибирск: Филиал «Гео» Изд-ва СО РАН, 2001. 276 с.

33. Muan A., Huack J., Loffal T. Equilibrium studies with a bearing on lunar rocks // Proceedings of the Third Lunar Science Conference. 1972. Vol. 1. P. 185–196.

34. Davis R.J., Smith G.W. Yttrotungstite // Mineral. Mag. 1971. Vol. 38. P. 261–285.

35. Шкодзинский В.С. Глобальная петрология по современным данным о горячей гетерогенной аккреции Земли. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2018. 244 с.

36. Панина Л.И., Моторина И.В. Жидкостная несмесимость глубинных магм и зарождение карбонатитовых расплавов // Геохимия. 2008. № 5. С. 487–504.

37. Делицын Л.М., Мелентьев Г.Б., Батенин В.М., Толстов А.В. Сосуществование двух несмешивающихся жидких фаз в силикатно-солевой ниобий-редкоземельной системе // Докл. РАН. 2014. Т. 462, № 4. С. 440–443.

Поступила в редакцию 25.09.2020

Принята к публикации 12.11.2020

#### Об авторах

ОКРУГИН Александр Витальевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677000, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия,

<https://orcid.org/0000-0002-1248-8993>, [okrugin@diamond.ysn.ru](mailto:okrugin@diamond.ysn.ru);

ЖУРАВЛЕВ Анатолий Иванович, младший научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677000, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия,

<https://orcid.org/0000-0003-0115-5146>, [ai.zhuravlevgeo@gmail.com](mailto:ai.zhuravlevgeo@gmail.com).

#### Информация для цитирования

Округин А.В., Журавлев А.И. Конвергентные минералогические особенности силикатных магматических и карбонатитовых пород Томторского массива на северо-востоке Сибирской платформы // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020, Т. 25, № 4. С. 42–58. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-3>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-4-3

## Convergent mineralogical features of silicate igneous and carbonatite rocks of the Tomtor massif in the northeast of the Siberian platform

A.V. Okrugin, A.I. Zhuravlev

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

*[okrugin@diamond.ysn.ru](mailto:okrugin@diamond.ysn.ru); [ai.zhuravlevgeo@gmail.com](mailto:ai.zhuravlevgeo@gmail.com)*

**Abstract.** *A comparative analysis of typomorphic features of the minerals of different types of silicate rocks and carbonatites of the Tomtor massif is provided to establish their convergent features. To exclude the mutual influence of the rocks formed at different times, samples for investigation were taken from different scattered independent pipe bodies consisting of the rocks of melteigite-malignite composition, a sheet body of alkaline picrites, a transverse carbonatite dike located to the south from the Tomtor massif, and also unaltered nepheline syenites from the southern margin of the massif. It is demonstrated that interesting convergent features are revealed for the rock-forming and accessory minerals, including rare-metal ore minerals of various silicate igneous rocks and carbonatite formations. These features are exhibited by rock-forming minerals – pyroxenes, micas, feldspars, garnets, as well as by basic and rare carbonates, oxide ore minerals, including chromium-containing spinellids, sulfide and other exotic phases. New data related to the typomorphic features of minerals confirm our earlier information about the identification of five clusters by the association of petrogenic and a number of ore components among the rocks of the Tomtor massif. The most interesting nuance in this regard was the confirmation of the convergence of a group of definitely high-temperature early magmatic elements – MgO, Cr and Ni with a group of CaO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Y – components that formed carbonatite derivatives. For example, the detection of significant amounts of high-chromium spinellids (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> up to 46%, NiO up to 0.3% in alkaline picrites To-4-1 and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> up to 32% in carbonatites To-5-1) indicates the through character of their presence in these rocks. Such studies will help*

revealing the mineralogical criteria of the genetic relationship between silicate melts and related carbonate derivatives, which can form mineralization rich in rare elements.

**Key words:** alkali-ultrabasic rocks, melteigite, alkaline picrites, syenite, carbonatites, rare element deposits, the Tomtor massif.

**Acknowledgements.** This work was supported by the RFBR grant 18-45-140043 p\_a «Trapps of the East of the Siberian Platform» and within the framework of the research plan of the Institute of Socio-Physical Engineering SB RAS.

### References

1. Okrugin A.V., Tolstov A.V., Sleptsov A.P., Baranov L.N. Petrohimicheskie osobennosti associatsii ul'traosnovnykh shchelochnykh porod i karbonatitov Tomtorskogo massiva i interpretatsiya vozmozhnykh trendov ih evolyucii // Prirodnie resursy Arktiki i Subarktiki. 2019. Vol. 24. No. 4. P. 7–24.
2. Sheinmann Yu.M. Formatsiya ul'traosnovnykh-shchelochnykh porod // Shchelochnye intruzii, ikh razmeshchenie i svyazannaya s nimi mineralizatsiya. M.: Gosgeoltekhizdat, 1961. Iss. 12–13. P. 15–54.
3. Milashev V.A., Krutoyarskij M.A., Rabkin M.I., Erlih E.N. Kimberlitovye porodny i pikritovye porfiry severo-vostochnoj chasti Sibirskoj platformy. M.: Gosgeoltekhizdat, 1963. 216 p.
4. Koval'skii V.V., Nikishov K.N., Egorov O.S. Kimberlitovye i karbonatitovye obrazovaniya Anabarskoi anteklizy. M.: Nauka, 1969. 288 p.
5. Egorov L.S. Melilitovye porodny Maimecha-Kotuiskoj provintsii. L.: Nedra, 1969. 248 p.
6. Marshintsev V.K. Karbonatitovye obrazovaniya vostochnogo sklona Anabarskogo svodovogo podnyatiya. Yakutsk: Kn. izd-vo, 1974. 120 p.
7. Kornilova V.P., Nikishov K.N., Koval'skij V.V., Zol'nikov G.V. Atlas tekstur i struktur kimberlitovykh porod. M.: Nauka, 1983. 158 p.
8. Egorov L.S. Ijolit-karbonatitovyj plutonizm (na primere Majmecha-Kotjiskogo kompleksa Polyarnoj Sibiri). L.: Nedra, 1991. 260 p.
9. Bagdasarov Yu.A., Gusev G.S., Gushchin A.V., Mezhelevskij N.V., Morozov A.F. Metallogeniya magmaticheskikh kompleksov vnutriplitovykh geodinamicheskikh obstanovok. M.: GEOS, 2001. 640 p.
10. Frolov A.A., Lapin A.V., Tolstov A.V., Zinchuk N.N., Belov S.V., Burgomistrov A.A. Karbonatity i kimberlity (vzaimootnosheniya, minerageniya, prognoz). M.: NIA-Priroda, 2005. 540 p.
11. Epshtein E.M., Anikeeva L.I. Nekotorye voprosy geologii i petrologii kompleksa ul'traosnovnykh shchelochnykh intruzivnykh porod // Fiziko-khimicheskie problemy formirovaniya gornyx porod i rud. Vol. 2. M.: Izd-vo AN SSSR, 1963. P. 182–195.
12. Vladykin N.V., Torbeeva T.S. Lamproity Tomtorskogo massiva (Vostochnoe Priabar'e) // Geologiya i Geofizika. 2005. Vol. 46. No. 10. P. 1038–1049.
13. Belov S.V., Lapin A.V., Tolstov A.V., Frolov A.A. Minerageniya platformennogo magmatizma (trappy, karbonatity, kimberlity). Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2008. 537 p.
14. Zavarickij A.N. Izverzhennyye gornyye porodny. M.: Izd. AN SSSR, 1961. 479 p.
15. Entin A.R., Zaitsev A.I., Nenashev N.I. i dr. O posledovatel'nosti geologicheskikh sobytii, svyazannykh svnedreniem Tomtorskogo massiva ul'traosnovnykh shchelochnykh porod i karbonatitov (Severo-zapadnaya Yakutiya) // Geologiya i geofizika. 1990. Vol. 31, No. 12. P. 42–51.
16. Kravchenko S.M., Belyakov A.Yu., Pokrovskii B.G. Geokhimiya i genezis Tomtorskogo massiva (sever Sibirskoi platformy) // Doklady RAN. 1992. Vol. 322, No. 5. P. 966–972.
17. Kravchenko S.M., Pokrovskiy B.G. The Tomtor alkaline ultrabasic massif and related REE-Nb deposits, northern Siberia // Econ. Geol. 1995. Vol. 71 (7). P. 676–689.
18. Tolstov A.V. Osobennosti mineralogii i geokhimii apatit-magnetitovykh rud massiva Tomtor (S-Z Yakutiya) // Geologiya i geofizika. 1994. Vol. 35, No. 9. P. 91–100.
19. Epshtein E.M., Danil'chenko N.A., Postnikov S.A. Geologiya Tomtorskogo unikal'nogo mestorozhdeniya redkikh metallov (sever Sibirskoi platformy) // Geologiya Rudnykh Mestorozhdenii. 1994. Vol. 36, No. 2. P. 83–110.
20. Bagdasarov Yu. A. Geokhimicheskie osobennosti karbonatitov i soprovozhdayushchikh ikh silikatnykh porod shchelochno-karbonatitovogo massiva Tomtor (Vostochnoe Priabar'e, Yakutiya) // Geokhimiya. 1997. No. 1. P. 10–20.
21. Vladykin N.V., Kotov A.B., Borisenko A.S. i dr. Vozrastnye rubezhi formirovaniya shchelochno-ul'traosnovnogo massiva Tomtor: rezul'taty geokhronologicheskikh U-Pb i <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar issledovaniy // Doklady RAN. 2014. Vol. 454, No. 2. P. 195–199.
22. 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 // B: Chemie der Erde, 2019.
23. Holmes A. A contribution to the petrology of the kimberlite and its inclusions // Trans. Geol. Soc. S. Africa. 1936. Vol. 39. P. 379–428.
24. Zhuk-Pochekutov K.A., Gladkikh V.S., Leont'ev L.N. Assotsiatsiya shchelochnykh bazal'toidov-bazal'tov Maimecha-Kotuiskoj vulkano-plutonicheskoi formatsii // Petrologiya i Geokhimicheskie Osobennosti

Комплекса Ул'трабазитов и Карбонатитов. М.: Наука, 1965. P. 5–90.

25. *Vasil'ev Yu.R., Zolotukhin V.V.* Petrologiya ul'trabazitov severa Sibirskoi platformy i nekotorye problemy ikh genezisa. Novosibirsk: Nauka, 1975. 272 p.

26. *Baranov L.N., Tolstov A.V., Okrugin A.V., Sleptsov A.P.* Novoe v mineralogii i geokhimii apatit-magnetitovykh rud massiva Tomtor, severo-vostok Sibirskoi platformy // *Rudy i Metally*. 2018. No. 2. P. 42–54. DOI: 10.24411/0869-5997-2018-00011.

27. *Vasil'ev Yu.R., Konenko V.F., Korolyuk V.N.* Akcessornye hromshpinelidy iz ul'traosnovnykh porod Majmecha-Kotujskogo rajona // *Materialy po Geneticheskoy i Eksperimental'noj Mineralogii*. N.: Nauka, 1976. P. 7–16.

28. *Genkin A.D., Distler V.V., Laputina I.P.* Hromitovaya mineralizatsiya differencirovannykh trappovykh intruzij i usloviya eyo obrazovaniya // *Usloviya obrazovaniya magmaticheskikh rudnykh mestorozhdenij*. М.: Nauka, 1979. P. 105–126.

29. *Chayka I.F., Zhitova L.M., Antsiferova T.N., Abersteiner A., Shevko A.Ya., Izokh A.E., Tolstykh N.D., Gora M.P., Chubarov V.M., Kamenetsky V.S.* In-Situ Crystallization and Continuous Modification of Chromian Spinel in the «Sulfide-Poor Platinum-Group Metal Ores» of the Norilsk-1 Intrusion (Northern Siberia, Russia) // *Minerals*. 2020. Vol. 10. P. 498.

30. *Babushkina S.A.* Sostav mikrokristallov shpinelidov trubki Malokuonamskaya // *Otechestvennaya Geologiya*. 2008. No. 5. P. 85–95.

31. *Sobolev N.V., Pohilenko N.P., Lavrent'ev Yu.G., Usova L.V.* Osobennosti sostava hromshpinelidov iz almazov i kimberlitov YAKutii // *Geologiya i Geofizika*. 1975. No. 11. P. 7–24.

32. *Afanas'ev V.P., Zinchuk N.N., Pohilenko N.P.* Morfologiya i morfogenez indikatornykh mineralov kimberlitov. Novosibirsk: Filial «Geo» izd-va SO RAN, 2001. 276 p.

33. *Muan A., Huack J., Loffal T.* Equilibrium studies with a bearing on lunar rocks // *Proceedings of the Third Lunar Science Conference*. 1972. Vol. 1. P. 185–196.

34. *Davis R.J., Smith G.W.* Yttrotungstite // *Mineral. Mag.* 1971. Vol. 38. P. 261–285.

35. *Shkodzinskii V.S.* Global'naya petrologiya po sovremennym dannym o goryachei geterogennoi akkretsii Zemli. Yakutsk: Izdatel'skii dom SVFU, 2018. 244 p.

36. *Panina L.I., Motorina I.V.* Zhidkostnaya nesmesimost' glubinykh magm i zarozhdenie karbonatitovykh rasplavov // *Geohimiya*. 2008. No. 5. P. 487–504.

37. *Delitsyn L.M., Melent'ev G.B., Batenin V.M., Tolstov A.V.* Sosushchestvovanie dvukh nesmeshivayushchikhsya zhidkikh faz v silikatno-solevoi niobii-redkozemel'noi sisteme // *Dokl. RAN*. 2014. Vol. 462, No. 4. P. 440–443.

#### *About the authors*

OKRUGIN Aleksandr Vitalievich, doctor of geological and mineralogical sciences, chief researcher, Diamond and Precious Metals Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677000, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-1248-8993>, [okrugin@diamond.ysn.ru](mailto:okrugin@diamond.ysn.ru);

ZHURAVLEV Anatoliy Ivanovich, researcher, Diamond and Precious Metals Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677000, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-0115-5146>, [ai.zhuravlevgeo@gmail.com](mailto:ai.zhuravlevgeo@gmail.com).

#### *Citation*

*Okrugin A.V., Zhuravlev A.I.* Convergent mineralogical features of silicate igneous and carbonatite rocks of the Tomtor massif in the northeast of the Siberian platform // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020, Vol. 25, No. 4. pp. 42–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-3>