

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Общая и региональная геология, петрология и вулканология

УДК 552.311 (571.56)

DOI 10.31242/2618-9712-2019-24-4-1

Петрохимические особенности ассоциации ультраосновных-щелочных пород и карбонатитов Томторского массива и интерпретация возможных трендов их эволюции

А.В. Округин¹, А.В. Толстов^{2,4}, А.П. Слепцов³, Л.Н. Баранов^{2,4}

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

²Научно-исследовательское геологическое предприятие (НИГП) АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия

³АО «Якутскгеология», Якутск, Россия

⁴Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

okrugin@diamond.ysn.ru

Аннотация. Приводится петрохимическая характеристика серии силикатных пород щелочных ультраосновных пород и сиенитов с карбонатитами Томторского массива и рассматривается изменение их составов на экспериментально изученных тройных диаграммах фазовых состояний. В процессе такого анализа по различным сечениям «расширенного базальтового тетраэдра» $Ne-Fo-SiO_2-La$, охватывающего как кварцнормативные (толеитовые), так и нефелиннормативные (щелочные) составы, дается интерпретация возможных трендов эволюции Томторской рудно-магматической системы. Существование таких полихронных сложных рудно-магматических кольцевых комплексов, как Томторский массив, свидетельствует о наличии в литосферной мантии внутриплитных глубинных крупных магмогенерирующих очагов. Уникальная комплексная благородно-редкометалльная рудоносность, широкий спектр изверженных пород от ультраосновных до средних магматитов, обогащенных летучими и рудными компонентами, являются признаками неистощенности исходных расплавов. Подобные легкоплавкие очаги законсервированных в литосферной мантии остаточных расплавов кимберлитового, щелочно-базальтоидного, лампроитового, карбонатитового составов при последующих благоприятных геодинамических обстановках подвергаются быстрому всплытию, претерпевая декомпрессионное расплавление и формируя концентрически-зональные платформенные комплексы ультраосновных-щелочных пород с карбонатитами. Преимущественная приуроченность фанерозойских щелочно-ультраосновных комплексов пород к периферии Сибирской платформы связывается с заложением их потенциальных очагов во время формирования крупных изверженных провинций в результате распада суперконтинента Родиния с расхождением Северо-Азиатского (Сибирского) и Северо-Американского (Лаврентия) кратонов, начавшегося в неопротерозойское время.

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

Благодарности. Авторы благодарят всех коллег, сотрудников, принимавших участие в выполнении лабораторных, аналитических работ и способствовавших проведению данных комплексных исследований. Работа выполнена в рамках НИР ИГАБМ СО РАН (№ 0381-2019-0003) и поддержке РФФИ (проект № 17-05-00390) и гранта РНФ (проект 18-17-00120).

Введение

В связи с предстоящим освоением уникально богатых редкометалльных руд Томторского месторождения, приуроченного к сложнопостроенному полихронному комплексу ультраосновных-

щелочных пород с карбонатитами (УЩК), всестороннее изучение пород и руд данного массива приобретает несомненную актуальность. Выявление всех стадий становления массива и определение среди них места рудоносных процессов

имеют не только практическое значение, но и научную значимость для решения петрологических задач по весьма спорной проблеме формирования комплексов УЩК.

Рассматриваются петрохимические особенности 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. Комплексная оценка всей ассоциации силикатных магматитов и тесно связанных с ними рудно-силикатных обособлений позволит в определенной мере приблизиться к пониманию генетической связи силикатно-карбонатитовых систем, несущих редкометалльное оруденение. Наличие в бассейне р. Анабар также многих тел пермотриасовых щелочных пикритобазальтов, меланефеленитов и трахидолеритов позволяет объединить данные разновозрастных щелочно-ультраосновные комплексы с карбонатитами восточного Прианабарья в единую крупную провинцию [1]. Такие рудно-магматические системы могут быть источниками не только месторождений редких элементов, но и благородных металлов, образующих в данном районе площадные комплексные золото-платиновые россыпепроявления.

Методика исследований

Томторский массив относится к магматическому комплексу (системе) длительного становления, где мы наблюдаем пеструю внешнюю (экзотерическую) картину (рис. 1) сложно переплетенных и наложенных друг на друга процессов. Поэтому, чтобы распутать этот сложный клубок, формализовать и понять внутреннюю суть реального механизма образования данного массива, вызывающего много споров у различных исследователей изучающих отдельные аспекты геологии, петрологии и рудоносности, нужен системный подход. Это позволит изучать сложный объект интегрально, т. е. целостно, но затем дифференциально разбираясь поэлементно на всех уровнях, прийти к выявлению причинно-следственных связей развития системы. Очевидно, что такой анализ кроме привлечения геологических и минералого-геохимических данных невозможен без использования ЭВМ с применением статистических пакетов программ, а также экспериментальных данных по исследованию фазовых изменений при кристаллизации силикатных и

карбонатитовых расплавных систем. Здесь мы приводим первые результаты наших подобных исследований по Томторскому массиву, которые будут продолжаться в дальнейшем.

Как показывает статистическая обработка с использованием пакета программ Statistica, среди выборки 131 анализа фойдолитов, щелочных и нефелиновых сиенитов, щелочных ультраосновных пород и камафоритов (см. таблицу 1) можно выделить пять кластеров по ассоциации основных и ряда рудных микрокомпонентов (рис. 2). Расчет производился методом Уорда (Ward's method), а мерой сходства между элементами множеств выбран квадрат евклидова расстояния (Squared Euclidean distances). Как видно на дендрограмме, наименьшей мерой различия обладают пары: $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$, $\text{FeO}_{\text{tot}}\text{--V}$, Cr--Ni и $\text{P}_2\text{O}_5\text{--Y}$, также сильные связи имеют пары Nb--Zr и $\text{CaO--CO}_2\text{+H}_2\text{O}$. Далее к первой паре примыкают K_2O , Na_2O и Ba , образуя первый кластер – очевидную ассоциацию расплавофильных магматогенных компонентов. К паре Nb--Zr примыкает TiO_2 , формируя второй кластер, по-видимому, парагенезис минералов циркония и титанониобатов. Третью группу создают элементы группы железа, а четвертую – MgO , Cr и Ni – явные высокотемпературные раннемагматические компоненты. Более отдаленной связью обладают пары CaO с летучими и P_2O_5 с Y , переходящие, вероятно, в позднемагматические остаточные расплавы и образующие карбонатитовые дериваты. Подобное сочетание ассоциаций рудно-магматических компонентов разнообразных силикатных пород, разбивающихся на кластеры, имеющие определенные парагенетические связи, указывает на их закономерное эволюционное развитие. Такая кластеризация всей совокупности разнообразных пород Томторского массива, по нашему мнению, согласуется с моделью фракционной дифференциации единой исходной щелочно-ультраосновной магмы, обогащенной карбонатным компонентом с высокими содержаниями некогерентных элементов.

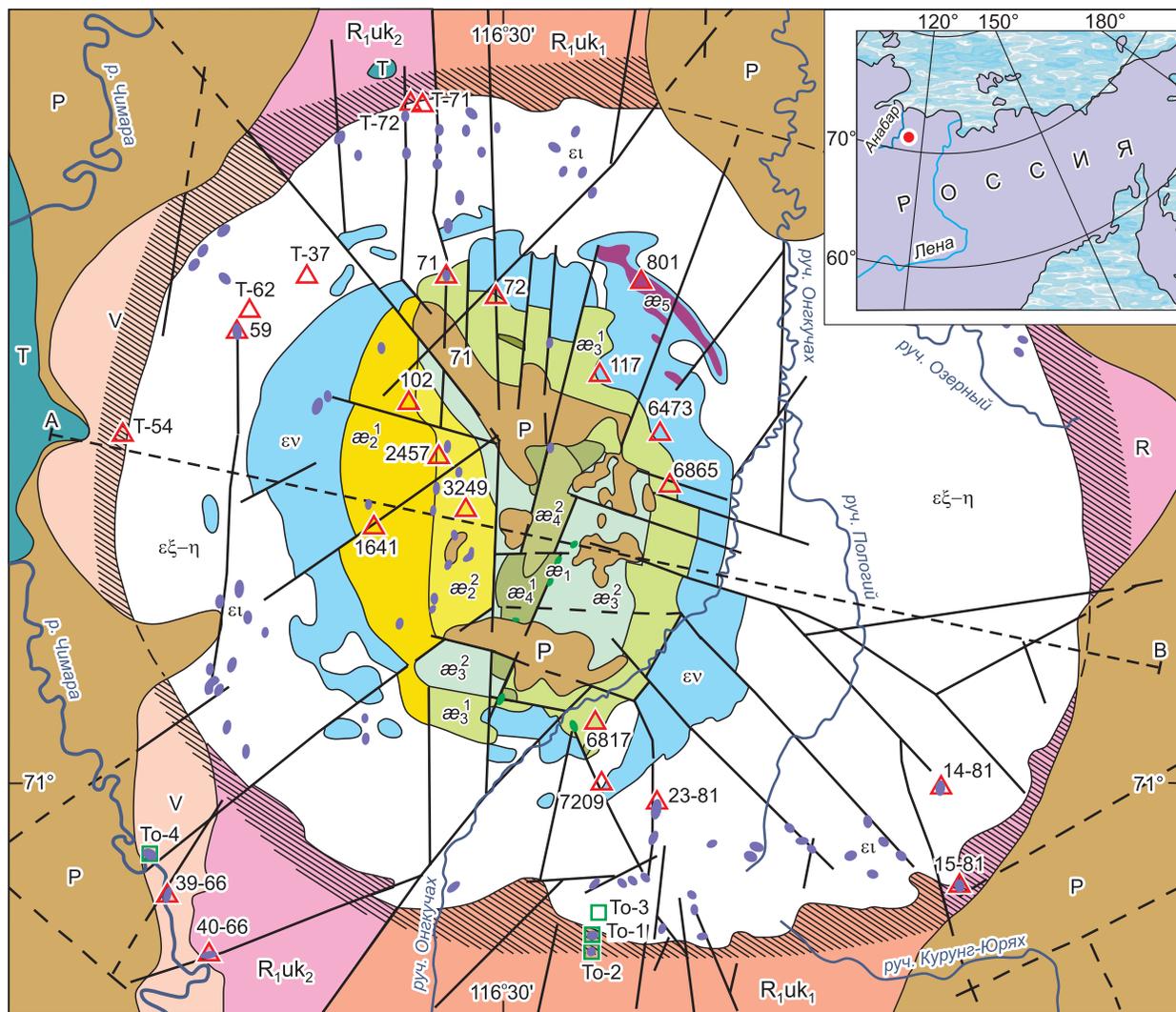
Далее нами рассматривается изменение составов пород Томторского массива на экспериментально изученных тройных диаграммах фазовых равновесий, которые составляют различные сечения «расширенного базальтового тетраэдра» $\text{Ne--Fo--SiO}_2\text{--La(Ca}_2\text{SiO}_4)$ [2]. Схема кристаллизации для большей части этого тетраэдра, охватывающего как кварцнормативные (толеитовые), так и нефелиннормативные (щелочные) составы, по-

Представительные анализы силикатных пород и камафоритов Томторского массива
Representative analyzes of silicate rocks and kamaforites of the Tomtor massif

Оксиды, %	Сиениты периферийной части массива			Фойдолиты оторочки карбонатитового ядра			Щелочно-ультраосновные породы мелких секущих тел					Камафориты, скв. 801, глубина, м							
	T-72/7*	14-81/3	14-81/9	15-81/1	15-81/4	6865/2	1641/8	1641/10	1641/13	23-81/2	39-66/5	40-66/5	59/13	To-4/2	35,2	59,50	61,6	111,1	134,6
SiO ₂	54,38	49,50	52,32	53,33	48,87	32,10	34,64	39,66	38,69	33,99	31,39	34,13	31,45	31,25	15,19	25,59	20,56	11,33	37,41
TiO ₂	0,53	0,76	0,85	1,09	2,18	4,55	4,85	4,64	5,87	2,31	2,38	1,60	2,96	2,87	0,69	5,15	3,69	1,80	7,08
Al ₂ O ₃	20,96	19,37	18,17	25,31	19,00	14,25	9,89	8,94	11,03	9,62	6,14	7,87	6,43	8,38	5,40	8,97	8,48	4,43	14,62
Fe ₂ O ₃	2,26	4,74	4,56	3,53	10,25	8,60	10,08	17,08	22,74	7,68	7,04	6,24	7,10	10,29	2,62	16,71	45,38	8,44	19,30
FeO	1,67	1,41	1,49	1,00	3,57	12,68	9,50	2,48	1,02	3,40	2,83	2,29	3,82	5,82	—	—	—	—	—
MnO	0,04	0,21	0,22	0,02	0,05	0,63	1,06	1,06	1,06	0,25	0,13	0,16	0,16	0,18	0,23	0,46	0,68	0,47	0,16
MgO	2,02	1,47	0,94	0,05	1,74	7,88	3,50	0,54	0,22	9,55	18,84	29,84	22,27	15,18	0,22	7,22	9,01	6,51	5,45
CaO	0,64	3,07	4,67	0,81	0,72	3,44	7,88	5,61	3,56	15,47	13,76	3,84	9,11	11,12	39,34	14,41	3,21	31,68	4,57
Na ₂ O	0,36	7,42	2,85	0,54	0,11	0,26	6,60	6,41	8,15	0,98	0,12	0,13	0,11	0,63	0,16	0,12	0,54	0,01	0,85
K ₂ O	12,60	3,48	8,39	9,07	7,46	5,01	0,10	0,11	0,11	3,44	1,51	0,81	2,65	2,57	3,73	5,43	3,51	2,86	1,40
P ₂ O ₅	1,22	0,06	0,06	0,05	0,14	1,18	4,74	4,71	1,96	1,55	0,55	0,23	0,94	1,22	23,46	3,99	1,51	8,11	2,30
CO ₂	1,18	2,33	2,08	0,06	0,22	7,04	2,30	2,36	1,02	6,13	9,14	1,39	5,30	5,37	—	—	—	—	—
п.п.п	1,98	6,11	3,21	5,29	5,78	2,10	6,10	5,11	4,76	4,54	5,99	11,08	7,52	5,10	3,80	10,79	0,23	23,07	5,78
Сумма	99,84	99,93	99,81	100,15	100,09	99,72	101,24	98,71	100,19	98,91	99,82	99,61	99,82	99,98	97,00	99,69	99,70	99,67	99,72
V, г/г	85	130	150	51	750	—	—	—	—	290	110	22	110	—	238	288	—	147	254
Cr	60	70	74	12	260	—	—	—	—	150	570	220	1000	—	7	64	—	7	7
Ni	11	23	9	34	120	—	—	—	—	69	400	260	560	—	896	39	—	98	101
Zn	88	55	650	97	93	—	—	—	—	130	55	100	240	—	249	745	—	84	40
Ba	8800	1300	1900	490	550	—	—	—	—	3200	280	460	960	—	879	893	—	224	854
Nb	110	810	840	530	1200	—	—	—	—	660	300	380	350	—	75	611	—	202	213
Zr	76	540	440	580	3000	—	—	—	—	1100	570	200	430	—	74	375	—	1498	1098
Y	19	34	54	22	130	—	—	—	—	63	38	25	24	—	3209	79	—	213	11

Примечание. * – номер пробы; первые цифры соответствуют номеру скважин или обозначения на рис. 1, а последние цифры после косой линии – порядковому номеру образца. Химические анализы образцов сиенитов и пород мелких секущих тел выполнены в химико-аналитической лаборатории ИТАБМ СО РАН Галенчиковой Л.Т. и Сабардаховой Э.Е., анализы фойдолитов выполнены в ЦАЛ ПГО «Якутскгеология» Забуга Г.Р.

Note. * – sample number; the first digits correspond to the number of drill hole or outcrop in fig. 1, and the last digits after the oblique line to serial number of the sample. Chemical analyzes of samples of syenites and small cross bodies rocks were performed by Galenichikova L.T. and Sabardakhova E.E. in the chemical-analytical laboratory of DPMGI SB RAS. The analyzes of foidolites were performed by Zabuga T.R. in the CAL of PGA “Yakutskgeologiya”.



Геологический разрез по линии А-В

0 1 км

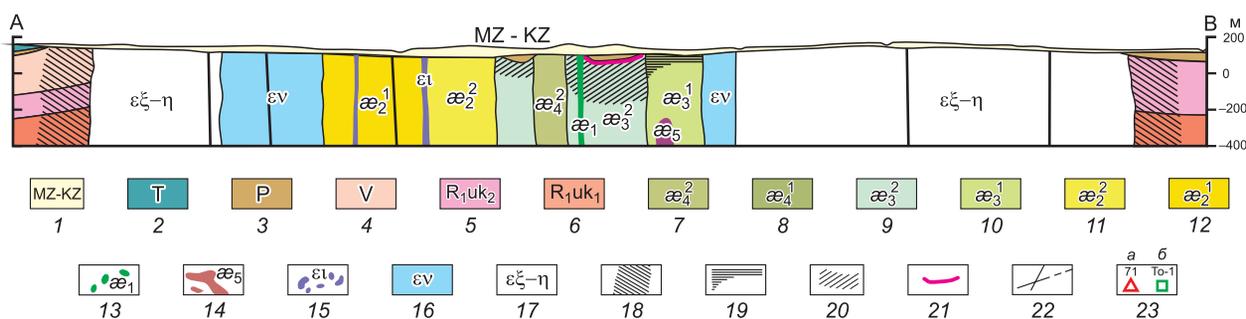


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Томторского массива без мезозойско-кайнозойского перекрывающего чехла.

1 – мезозойско-кайнозойские алевролиты, песчаники, гравелиты нерасчлененные (на разрезе); 2 – нижнетриасовые туфы, лавы платобазальтов; 3 – пермские конгломераты, гравелиты, песчаники, алевролиты, угли; 4 – песчаники, гравелиты, алевролиты венда; 5, 6 – доломиты, сланцы, алевролиты, песчаники улахан-курунгской свиты рифея: верхняя (5) и нижняя (6) подсвиты; 7–14 – карбонатитовый комплекс: 7 – карбонатиты редкометалльные (анкеритовые), 8 – анкерит-шамозитовые породы, 9 – карбонатиты редкометалльные (полиминеральные), 10 – апатит-микроклин-слюдистые породы, 11 – карбонатиты безрудные (кальцитовые и доломит-кальцитовые), 12 – кальцит-микроклин-слюдистые породы, 13 – карбонатитовые брекчии, 14 – камафориты (кальцит-флогопит-магнетитовые породы); 15–17 – комплекс силикатных пород: 15 – мелкие секущие тела щелочно-ультраосновных пород (альнеиты, щелочные пикриты, тингуаиты и др.), 16 – фойдиты

ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АССОЦИАЦИИ УЛЬТРАОСНОВНЫХ-ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД

литы (нефелин-пироксеновые породы якупирангит-уртитового ряда), 17 – щелочные и нефелиновые сиениты; 18–21 – гипергенный комплекс (на разрезе): 18 – зоны мраморизации и сканирования, 19 – плащевая кора выветривания, 20 – глубокая кора выветривания, 21 – каолинит-крандаллитовый горизонт; 22 – тектонические нарушения; 23 – места отбора исследованных образцов: *a* – из керн скважин (с номером скважин) и *b* – из коренных выходов и элювиально-делювиальных развалов пород на поверхности (с номером обнажений). Построена на основе геологической карты, составленной А.В. Толстовым (1998) по материалам геологической съемки (1974–1983) и результатам работ Эбеляхской ГРП. На врезке Томторский массив отмечен красным кружочком.

Fig. 1. Schematic geological map of the Tomtor massif without Mesozoic-Cenozoic overlapping cover.

1 – Mesozoic-Cenozoic silt-shales, sandstones, undivided gravelites (on section); 2 – lower Triassic tuffs, lavas of plateau basalt; 3 – Permian conglomerates, gravelites, sandstones, silt-shales, coals; 4 – Vendian sandstones, gravelites, silt-shales; 5, 6 – dolomites, shales, silt-shales, sandstones of Ulakhan-Kurug formation of Vendian: upper (5) and lower (6) suits; 7–14 – carbonatite complex: 7 – rare-metal carbonatites (ankerite), 8 – ankerite-chamosite rocks, 9 – rare-metal carbonatites (polymineral), 10 – apatite-microcline-mica rocks, 11 – hungry carbonatites (calcite and dolomite-calcite), 12 – calcite-microcline-mica rocks, 13 – carbonatite breccias, 14 – kamaforites (calcite- phlogopite-magnetite rocks); 15–17: silicate rocks complex: 15 – small cross bodies of alkaline-ultrabasic rocks (alnoite, alkaline picrites, tinguaite and others), 16 – foidolites (nepheline-pyroxene rocks of the jacupirangite-urtite series), 17 – alkaline and nepheline syenites; 18–21 – supergene complexes (on section): 18 – marbling and skarning zones, 19 – extended shape waste mantle, 20 – deep waste mantle, 21 – kaolinite-crandallite horizon; 22 – tectonic deformations; 23 – sampling sites: *a* – from core of drill hole (with numbers of drill holes) and *b* – from solid rocks and eluvium-deluvium rock outcrops on the surface (with numbers of outcrops). Composed on geological base which was compiled by A.V. Tolstov (1998) based on materials from a geological survey (1974–1983) and the results of the Ebelyakh GSP. In the inset, the Tomtor massif is marked with a red circle.

зволяет проследить порядок кристаллизации в щелочных ультраосновных породах и интерпретировать возможные тренды эволюции Томторской рудно-магматической системы.

Сложность систематики щелочных магматических пород обусловлена высокими содержаниями в них щелочных элементов, что может вызвать при кристаллизации магмы, в зависимости от ее относительной кремнеземистости и глиноземистости, появление самых разнообразных ассоциаций минералов. Последние, кроме типичных породообразующих минералов, включают фельдшпатоиды, мелилиты, монтичеллиты, щелочные и кальциевые феррические минералы и другие экзотические фазы. Эта сложность усугубляется еще и обогащенностью таких пород летучими компонентами, которые накапливаются на постмагматическом этапе и провоцируют сильные аутометасоматические изменения материнского субстрата. Согласно девятому принципу систематики магматических горных пород Международного союза геологических наук (IUGS, 1989), если реальный минеральный состав породы не может быть установлен, химический состав выступает как следующий классификационный признак.

В связи с этим нами было предложено [1] рассматривать сильно измененные породы щелочно-ультраосновного состава на модифицированной диаграмме SAM с развернутыми системами MgO–CaO и SiO₂–(Na₂O+K₂O), где дается удобная визуальная растяжка по главным петроген-

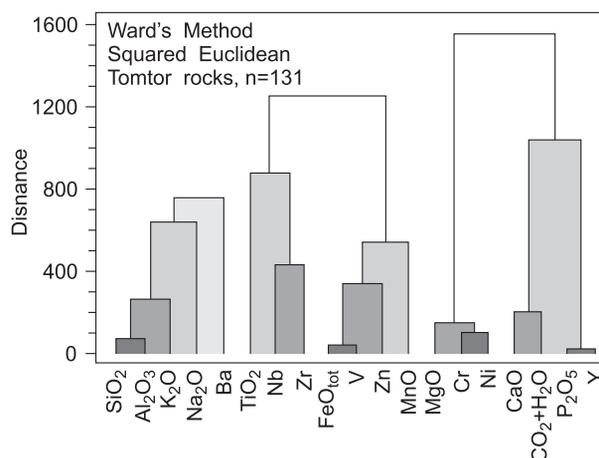


Рис. 2. Дендрограмма силикатных пород и камафоритов Томторского массива

Fig. 2. Dendrogram of silicate rocks and kamaforite ores of the Tomtor massif.

ным элементам (рис. 3). На этой мультидиаграмме центральная тройная система SAM строится в координатах $S = \text{SiO}_2$; $A = \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ – фельзические (афанитовые) компоненты светлоокрашенных минералов; $M = \text{FeO}_{\text{tot}} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5$ – феррические (мафические) компоненты темноокрашенных минералов. Слева прикрепляется тройной симплекс с обособлением от основной массы петрогенных оксидов ($\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}_{\text{tot}} + \text{MnO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{P}_2\text{O}_5$) двух самостоятельных координат MgO и CaO, характеризующих ультрамафитовый (маг-

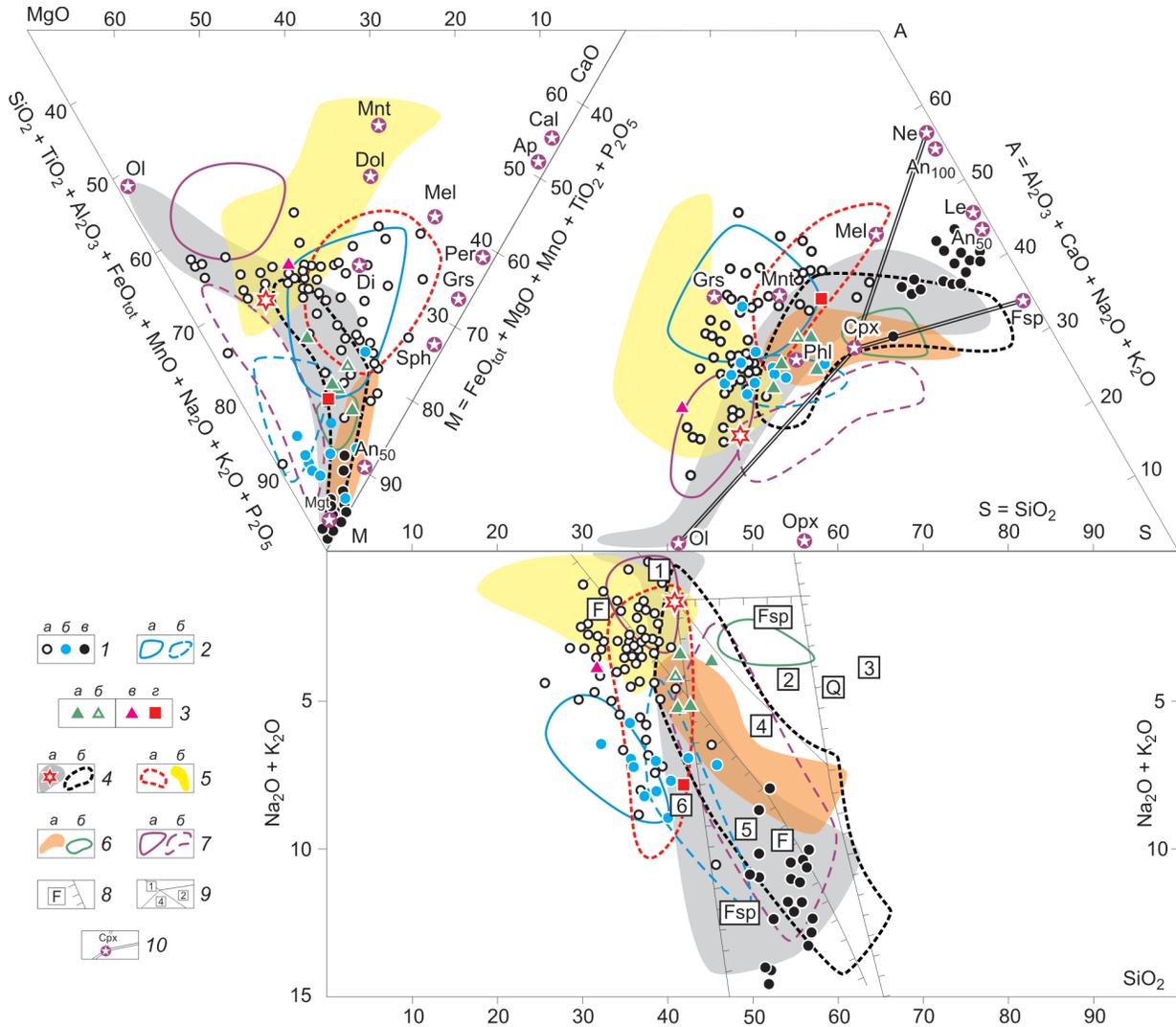


Рис. 3. Составы пород на диаграмме SAM – MgO – CaO – (Na₂O+K₂O) (мас. %):

1 – щелочно-ультраосновные породы (а), фойдолиты (б), щелочные и нефелиновые сиениты (в) Томторского массива по данным авторов; 2 – составы лампроитов по [27] Томторского массива: а – первичные образцы и б – после кислотного выщелачивания; 3 – пикритобазальты и меланефелениты устья р. Анабар по [16] (а), меланефелениты побережья моря Лаптевых по [15] (б), меймечиты р. Малая Куонамка [14] (в), рассчитанный валовый состав раскристаллизованного оксидно-силикатного включения в железистой платине из россыпи р. Маят по [16] (г); 4 – породы щелочно-ультраосновных комплексов (а) – звездочкой показан средний состав пикритовых порфиров и лавы щелочных базальтоидов (б) Маймеча-Котуйской провинции по работам [6, 22, 23, 28]; 5 – мелилитовые породы (а) Маймеча-Котуйской провинции [6, 23] и кимпикриты (б) Анабара [26]; 6 – силы и дайки Р-Т трахидолеритов, щелочных сиенитов (а) и толеитовых долеритов (б) бассейна р. Анабар-Уджа по [17]; 7 – алмазоносные кимберлиты (а) Якутской кимберлитовой провинции [26] и лампроиты (б) западной Австралии [29]; 8 – границы появления типоморфных минералов (Fsp – полевошпат, F – фельдшпатоид, Q – кварц), по [30]; 9 – границы между различными группами пород по виртуальному составу минералов, цифры в квадратах: 1 – ультрамафиты без полевых шпатов и фельдшпатоидов, 2 – плагиоклаз-пироксеновые, плагиоклаз-оливиновые и роговообманковые бескварцевые, 3 – кварц-полевошпатовые, 4 – субщелочные полевошпатовые, 5 – полевошпатово-фельдшпатоидные, 6 – фельдшпатоидные без полевых шпатов по [30]; 10 – точки виртуальных составов типоморфных породообразующих минералов: Ol – форстерит, Opx – ортопироксен, Srx – клинопироксен, Di – диопсид, Phl – флогопит, Mnt – монтчеллит, Grs – меланитовый гранат, Mel – мелилит, Ne – нефелин, Le – лейцит, An₅₀ – плагиоклаз, Fsp – щелочные полевые шпаты, Mgt – магнетит, Ap – апатит, Sph – сфен, Per – перовскит, Cal – кальцит, Dol – доломит; точки состава пород вынесены после пересчета анализа на 100 % сухого остатка; использованы анализы проб без видимых наложенных карбонатных изменений и содержащие CO₂ < 12 %.

Fig. 3. Rock compositions on diagram SAM – MgO – CaO – (Na₂O+K₂O) (wt. %):

1 – alkaline-ultrabasic rocks (a), foidolites (b), alkaline and nepheline syenites (c) of Tomtor massif according to authors; 2 – composition of lamproites by [27] of Tomtor massif: a – primary samples and b – samples after acid leaching; 3 – picrite-basalts and

melanephelinites from estuary of r. Anabar by [16] (a), melanephelinites from coast Laptev sea by [15] (б), meimechites of r. Malaya-Kuonamka by [14] (в), calculated whole-rock composition of crystallized oxide-silicate inclusion in ferro platinum from river Mayat placer by [16] (г); 4 – alkaline-ultrabasic rock complexes (a), star – it is average composition of picritic porphyrites and lavas of alkaline basalts (б), Maymecha-Kotuyskaya province according to works [6, 22, 23, 28]; 5 – melilite rocks (a) of Maymecha-Kotuyskaya province [6, 23] and kimpicrites (б) of Anabar [26]; 6 – sills and dikes of P-T trachydolerites, alkaline syenites (a) and tholeiitic dolerites (б) of Anabar-Udzha basin by [17]; 7 – diamondiferous kimberlites (a) of Yakutsk kimberlite province [26] and lamproites (б) of western Australia [29]; 8 – border of appearance of typomorphic minerals (Fsp – feldspar, F – feldspathoid, Q – quartz), by [30]; 9 – borders between different rock groups according to the virtual composition of minerals, numbers in squares: 1 – ultramafic rocks without feldspar and feldspathoids, 2 – plagioclase-pyroxene, plagioclase-olivine and hornblende without quartz, 3 – quartz-feldspar, 4 – subalkalic feldspar, 5 – feldspar-feldspathoid, 6 – feldspathoid without feldspar by [30]; 10 – points of virtual composition of typomorphic rock-forming minerals: Ol – forsterite, Opx – orthopyroxene, Cpx – clinopyroxene, Di – diopside, Phl – phlogopite, Mnt – monticellite, Grs – melanite garnet, Mel – melilite, Ne – nepheline, Le – leucite, An₅₀ – plagioclase, Fsp – alkaline feldspar, Mgt – magnetite, Ap – apatite, Sph – sphene, Per – perovskite, Cal – calcite, Dol – dolomite; points of rock compositions added after recalculation of analyzes for 100 % of dry residue; used analyzes from samples without visible carbonatite changes and containing CO₂ < 12 %.

незиальный) и мелилитовый (кальциевый) тренды изменения составов. К нижней стороне треугольника SAM, показывающей содержание кремнезема, примыкает бинарная диаграмма SiO₂ – (Na₂O + K₂O).

Одной из самых сложных проблем при изучении таких сложных комплексов, как Томторский массив, является выяснение генезиса огромных рудоносных карбонатитовых тел, тесно ассоциирующих с щелочно-ультраосновными магматитами [3–7 и др.].

Краткая геологическая характеристика Томторского массива

Массив Томтор приурочен к сводовой части Уджинского поднятия, расположенного на восточном склоне Анабарского щита. Он имеет концентрически-зональное строение, обусловленное наличием карбонатитового ядра, окаймленного мощной неполно-кольцевой фойдолитовой оторочкой, а значительная периферийная часть массива сложена щелочными и нефелиновыми сиенитами (см. рис. 1). В пределах массива широко распространены мелкие секущие жильные, дайковые, пластовые, трубчатые тела, а также крупные сильно измененные ксеноблоки щелочных ультраосновных пород, природа которых до сих пор вызывает острую дискуссию. Эти породы изучены нами в образцах, отобранных лично с естественных выходов магматитов на поверхность и из кернов заверочных скважин, использованы образцы из коллекции, собранной ранее сотрудниками лаборатории геологии кимберлитов ИГАБМ СО РАН, а также геологами ГУГПП РС(Я) «Якутскгеология», проводившими «Оценочные работы на Северном и Южном участках Томторского рудного поля» (Отчет, 2016 г.).

Севернее от Томторского массива находится второе подобное тело – Богдо, а по аэрогеофизи-

ческим материалам предполагается [8] существование под пермскими и мезокайнозойскими осадками Лено-Анабарского прогиба еще трех аналогичных погребенных массивов: Чюэмпинский (р. Уджа), Буолкалахский и Уэлинский (по одноименным рекам). По Е.М. Эпштейну и др. [6], эти комплексы ультрамафитов, ийолитов и карбонатитов (УИК) составляют Восточно-Прианабарскую провинцию УИК предкембрийского возраста, подобную раннемезозойской Западно-Прианабарской провинции той же формации, расположенной на западном и юго-западном склонах Анабарского щита.

На водоразделах рек Чимара и Эбелях, Томтор и Токур–Уджа Б.Р. Шпунт с соавторами [9] описали вулканогенные породы щелочно-ультраосновного состава, близкие таковым из мелких секущих тел Томторского массива. Указанными авторами сделан вывод, что эти покровы являются краевой частью ранее единой вулканоплутонической постройки Томтор. Еще первые исследователи [7 и др.] определили Томтор как вулканоплутонический комплекс, а в работах [10, 11] на основе K–Ar- и Rb–Sr- датирования показана следующая последовательность формирования Томторского массива, состоящая из трех этапов. Первый интрузивный этап – внедрение фойдолитов, нефелиновых сиенитов периферической зоны, карбонатитов I и фоскоритов (камафоритов) охватывает рубеж 800–650 млн лет; второй вулканогенный – формирование карбонатитов центрального ядра, внедрение секущих тел щелочных габброидов, нефелиновых сиенитов, пород пикритовой и альнеит-тингватитовой серий и связанных с ними карбонатитов II–III, эффузивов фойдитов и рудных лав – 450–370 млн лет; третий вулканогенно-осадочный – сложен породами верхнего рудного горизонта, поздними метасоматитами, образовавшимися в коре выветривания, туфами с прослоя-

ми углей, сохранившимися в кальдерах проседания на трубках взрыва P_{1-2} – 400–240 млн лет.

Геохронологическими U–Pb- и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -исследованиями [12] для пород Томторского массива получены следующие оценки возрастов: щелочной сиенит – 689 ± 5 млн лет, карбонатиты 1 этапа – 693 ± 8 и 681 ± 6 млн лет, лампроиты – 412 ± 2 млн лет и рудоносный карбонатит 2 этапа – 400 ± 4 млн лет. Нами в образце пикритов с крупными порфиристыми выделениями флогопита из диатремы, прорывающей рифейские отложения вблизи южного обрамления Томторского массива, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -методом был определен возраст 379 ± 3 млн лет [1]. Это хорошо согласуется с возрастом в 371 ± 4 млн лет, полученным Rb–Sr-методом для флогопитсодержащих щелочно-ультраосновных пород одного из трубчатых тел на южном обрамлении массива [9]. В результате последних изотопно-геохимических исследований цирконов из сиенитов и камафоритов Томтора U–Pb- методом [13] было установлено, что главная популяция циркона из сиенитов имеет возраст 402 ± 7 млн лет, единичные зерна циркона попадают в возрастной интервал 700–660 млн лет. Возраст цирконов из камафоритов составляет (с учетом погрешности) – около 400 млн лет, что соответствует позднему этапу становления массива.

В верховьях р. Малая Куонамка по руч. Томах было обнаружено [14] дайкообразное тело свежих порфиридных темно-серых пород с вкрапленниками оливина (Fa_{16}) и зоной закалки. В основной массе пород, по химическому составу отвечающей меймечитам Гулинского массива, кроме пироксена, флогопита и оливина широко распространены перовскит. Приуроченность данной дайки к разлому северо-восточного простирания, по которому развита также и дайка нижнемезозойских долеритов, указывает предположительно на такой же возраст меймечитоподобных пород.

На шельфе моря Лаптевых от Нордвикского залива до бассейна р. Урасалах-Батынит в кайнозойских отложениях было установлено постоянное присутствие галек и валунов щелочно-ультраосновных пород [15]. На более южных территориях они не встречены. Крупные размеры обломков (до 0,5 м) этих пород, представленных нефелиновыми пикритами, оливиновыми меланефеленитами, нефелинитами, анальцимитами, оливиновыми мельтейгитами, и существенная примесь их минералов в шлихах моло-

дых отложений указывают на близость коренных выходов данных магматитов.

В устье р. Анабар (мыс Аиркат) авторами были описаны находки пород базальтоидного облика с вкрапленниками оливина, пироксена и флогопита [16], часто встречающиеся среди делювиальных развалов пермотриасовых долеритов. По химическому составу данные породы относятся к субщелочным пикритобазальтам, меланефелинитам и оливиновым меланефелинитам, для которых характерны высокие содержания TiO_2 , K_2O и P_2O_5 . Пикритобазальты по составу близки трахидолеритам Эбехаинского дайкового пояса [17], протягивающегося от Анабара-Уджинского междуречья к северо-западному склону Анабарского щита. Меланефелиниты отличаются от трахидолеритов повышенным содержанием MgO и низкой кремнеземистостью, что отражается в частом присутствии в них нефелина и анальцима. Возраст двух образцов меланефелинитов устья р. Анабар, определенный Rb–Sr-методом, составляет 220 и 221 млн лет [16]. Таким образом, можно констатировать широкое развитие в бассейне р. Анабар кроме среднепалеозойских проявлений щелочно-ультраосновных пород в Томторском массиве и раннемезозойских щелочных пикритобазальтов, трахидолеритов и меланефеленитов, которые по минералого-геохимическим характеристикам близки щелочно-ультраосновным породам Маймеча-Котуйской провинции.

В связи с предполагаемой возможной связью золотоплатиноносных россыпей бассейна р. Анабар с щелочно-ультраосновными магматитами Восточного Прианабарья, следует отметить присутствие в платиновых металлах из россыпей силикатных включений, по составу близких к породам щелочных пород. Например, в одном зерне железистой платины р. Маят было обнаружено [16] включение хорошо раскристаллизованного силикатного вещества, состоящего из тесных сростаний диопсида, нефелина, флогопита, амфибола и титаномагнетита. Рассчитанный исходя из микронзондовых анализов минералов и их объемного соотношения валовый состав включения соответствует мельтейгиту. Силикатные включения подобного состава наблюдаются также в железистой платине из аллювия низовьев р. Бол. Куонамка, в которых, кроме клинопироксена, флогопита, нефелина и мелилита, присутствует около 10 % кальци-

та [18]. Валовые составы, определенные путем непосредственного сканирования поверхности этих включений, показали их щелочно-ультраосновной состав. Кроме этого, в карбонате камафоритов и в пирите нефелиновых сиенитов Томторского массива нами было обнаружено тончайшее микровыделение рудного золота [19].

^{190}Pt – ^4He -методом прямого датирования пяти зерен железистой платины из россыпи р. Маят была получена изохрона, соответствующая возрасту 261 ± 13 млн лет [20]. По другим россыпям предварительно получены и другие среднепалеозойские датировки [21]. Приведенные комплексные данные как по минералого-химическим характеристикам силикатных включений, так и по изотопному возрасту самого платинового металла указывают на вероятную связь МПГ из россыпей бассейна р. Анабар с фанерозойскими массивами щелочно-ультраосновных пород разных возрастов.

Петрохимические особенности пород Томтора

Сложные взаимоотношения между полихронными породами Томторского массива фойдолитового, щелочно-сиенитового, щелочно-ультраосновного и карбонатитового составов вызывают противоречивые мнения не только об их генезисе, но и формационной принадлежности пород. Как видно из диаграммы $\text{SAM-MgO-CaO-(Na}_2\text{O + K}_2\text{O)}$ (см. рис. 3), составы силикатных пород Томторского массива в основном компактно укладываются в полях составов пород щелочных ультрабазитов, базитов, сиенитов и мелилитовых пород Маймеча-Котуйской провинции [22–24]. Частично породы Томтора попадают в поля неалмазоносных или убогоалмазоносных кимберлитов и пикритовых порфиритов восточного склона Анабарской антеклизы [25, 26]. Указанные породы занимают области бесполовошпатовых пород выше коннод Ol-Crx-Ne – щелочных пикритов, мелилитолитов и ультраосновных фойдолитов, примыкающих к тренду мелилитовых пород Маймеча-Котуйской провинции [23]. Второй тренд слагают составы щелочных и нефелиновых сиенитов, слагающих значительную периферическую часть Томторского массива. Этот тренд уводит составы пород в сторону насыщенных кремнеземом базитов и сиенитов с полевошпатовым нормативом.

Оба указанных тренда начинаются от состава исходной магмы, соответствующего среднему со-

ставу [22] пикритовых порфиритов Маймеча-Котуйской провинции, что, очевидно, свидетельствует о глубинной общей генетической связи пород, формирующих два разрозненных ряда, но часто сопутствующих друг другу в разных районах в пределах одних комплексов. Появление двух вышеуказанных трендов можно объяснить в рамках экспериментальных данных по фазовым соотношениям расширенного щелочно-базальтового тетраэдра $\text{Ne-Fo-SiO}_2\text{-La(Ca}_2\text{SiO}_4)$ [2]. Состав предполагаемого исходного расплава щелочных ультраосновных комплексов, расположенный вблизи коннод Ol-Di-Ne (см. рис. 3), будет соответственно находиться недалеко от Ne-Fo-Di сечения щелочно-базальтового тетраэдра, где на котектической линии Ne-Fo-Di-L экспериментально установлен температурный максимум, разделяющий невариантные точки Ne-Mel-Fo-Di и Ne-Pl-Fo-Di . Таким образом, даже небольшие вариации содержания CaO в исходном расплаве, например в результате дифференциации магмы в глубинных промежуточных очагах или контаминации вмещающими карбонатными породами, могут повлечь за собой мелилитовый или нефелиновый тренды изменения составов пород, внедрившихся на различных стадиях становления крупных магматических комплексов.

Тренды изменения составов таких расплавов при фракционной кристаллизации можно проследить на тройных диаграммах фазовых равновесий, приведенных на рис. 4. В системе диопсид-форстерит-кремнезем установлен температурный максимум, который находится около (чуть левее) точки пересечения граничной кривой $\text{Fo}_{\text{ss}}\text{-Di}_{\text{ss}}$ с коннодой Di-En («С» на рис. 3 – [1]). Таким образом, плоскость, проходящая через диопсидовый твердый раствор, точку максимума (С) и форстеритовый твердый раствор, является новым температурным барьером, отделяющим оливинтолеитовую магму от щелочно-базальтовой магмы [31]. Следовательно, кристаллизация расплава состава Е, находящегося в поле Fo-Di-C начнется от энстатитсодержащего состава и пойдет по котектике Fo-Di к тройной окерманитсодержащей эвтектике Fo-Di-Ak , пересекая линию Fo-Di , которая является псевдобинарной. Это обусловлено тем, что форстерит и диопсид могут содержать соответственно монтичеллитовую и энстатитовую молекулы, образуя твердые растворы. Как показывают микрозондовые анализы, в оливинах из щелочно-ультраосновных пород отмечается повышенное содержание CaO , иногда достигающее

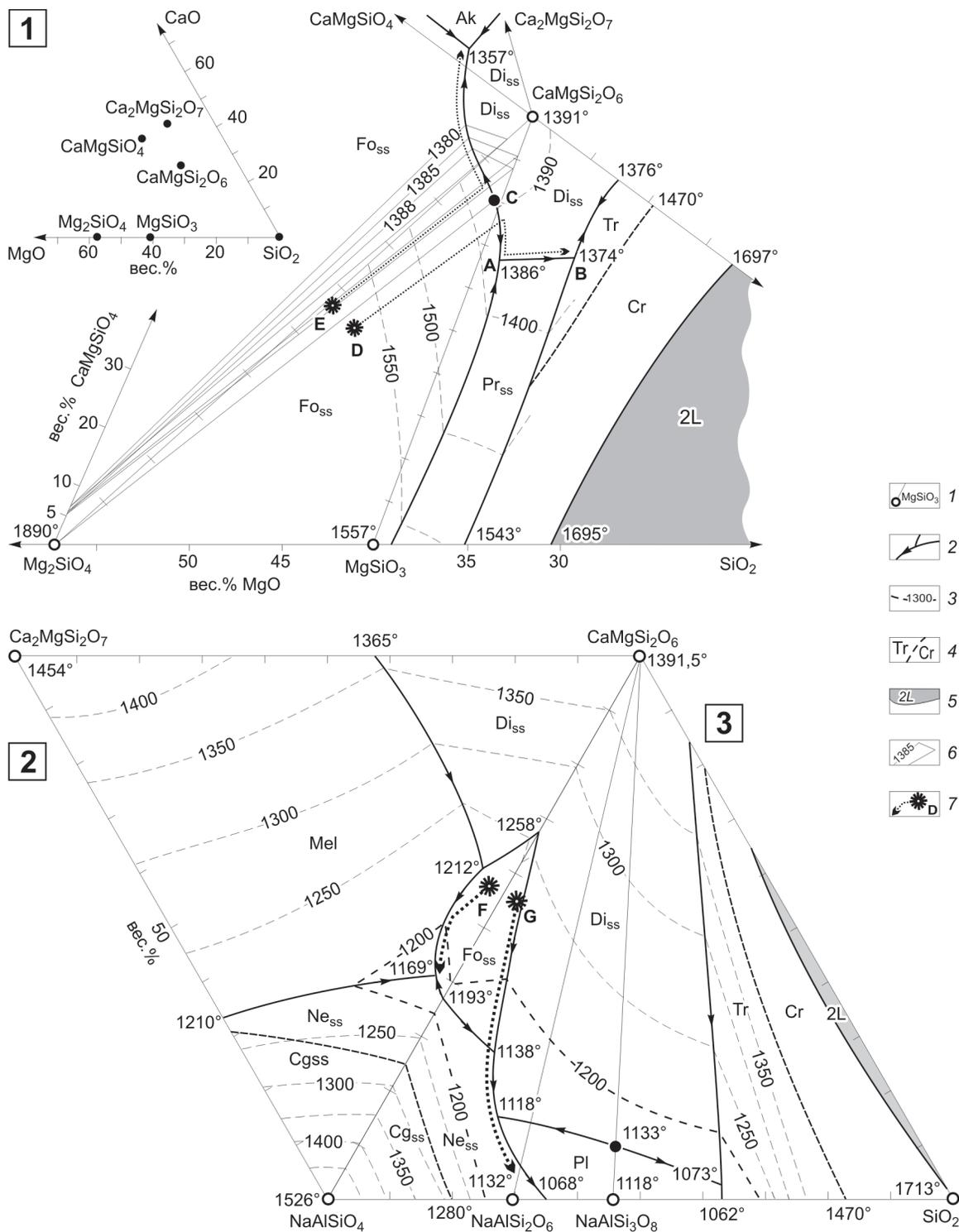


Рис. 4. Возможные тренды кристаллизации разных ассоциаций пород Томторского массива на мультидиаграммах Fo–Ak–Di–Ne–Q.

1 – фигуративные точки фаз; 2 – пограничные кривые с направлениями котектик; 3 – изотермы ликвидуса (°C); 4 – границы полиморфных превращений; 5 – область несмесимости двух жидких фаз (2L); 6 – трехфазовые треугольники сосуществоющих Fo_{ss} и Di_{ss} с расплавом (L) при 1388, 1385 и 1380 °C; 7 – тренды кристаллизации расплавов разного состава (D, E, F, G). Поля кристаллизации фаз: Fo – форстерит; Di – диопсид; Pr – протознстагит; Mel – меллит; Cg – карнегиит; Ne – нефелин; Pl – плагиоклаз; Cr – кристобалит и Tr – тридимит. Диаграммы: Fo–Di–SiO₂ [1] по [31], Ne–Ak–Di [2] по [32],

Ne–Di–SiO₂ [3] [33]. На врезке показаны положения основных минералов в системе MgO–CaO–SiO₂. Остальные пояснения в тексте.

Fig. 4. Possible crystallization trends of various rock associations of the Tomtor massif on multidiagrams of Fo–Ak–Di–Ne–Q. 1 – figurative points of phases; 2 – boundary curves with directions of cotectics; 3 – liquidus isotherms (°C); 4 – boundaries of polymorphic transformations; 5 – immiscibility region of two liquid phases (2L); 6 – three-phase triangles of coexisting Fo_{ss} and Di_{ss} with a melt (L) at 1388, 1385 and 1380 °C; 7 – crystallization trends of melts of different compositions (D, E, F, G). Fields of crystallization of phases: Fo – forsterite; Di – diopside; Pr – protoenstatite; Ak – okermanite; Cg – carnegieite; Ne – nepheline; Ab – albite; Cr – cristobalite and Tr – tridymite. Diagrams: Fo–Di–SiO₂ [1] according to [31], Ne–Ak–Di [2] according to [32], Ne–Di–SiO₂ [3] [33]. The inset shows the positions of main minerals in the MgO–CaO–SiO₂ system. Other explanations in the main text.

2,8 мас.% (~8 мол.% монтичеллита), установленное нами в породах массива Кугда. Если состав исходного расплава также сдвинется в сторону обогащения SiO₂ (точка Д на рис. 4), то ход кристаллизации изменится в противоположный тренд насыщения расплава кремнеземом.

Подобный ход трендов изменения пограничных составов можно наблюдать на тройных диаграммах, содержащих Na-компонент нефелин (рис. 4 – [2], 4 – [3]). Здесь показаны тренды изменения близких между собой составов F и G. Однако, как видно из смежных диаграмм, даже незначительное отклонение в содержании кремнезема может вызвать изменение состава пород от мелилитосодержащих к кварцнормативным разностям.

По спектру распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) мельтейгиты Томторского массива, как пикритобазальты и меланефелиниты устья р. Анабар [16], очень близки трахидолеритам Эбехаинского дайкового пояса, а также пикритам Маймеча-Котуйской провинции, но существенно отличаются от типичных трапповых толеитовых долеритов Эбехаинского пояса. Спектр РЗЭ в оливиновых меланефелинитах устья р. Анабар в деталях повторяет на более низком уровне распределение редкоземельных элементов в меланефелинитах. Подобная картина параллельного снижения РЗЭ наблюдается от пикритов через меймечиты к дунитам Гулинского плутона [34]. Можно предположить, что исходными расплавами для Гулинского массива служат пикриты, фракционная дифференциация которых при осаждении оливина и высокотитанистого хромшпинелида приводит к появлению меймечитов, а далее и дунитов, как предполагалось ранее Ю.Р. Васильевым и В.В. Золотухиным [22].

Некоторые исследователи [27, 35] относят разнообразные проявления пород К-пикритового состава Томторского массива к лампроитам, против чего выступил Ю.А. Багдасаров [36]. По мнению Н.В. Владыкина и Т.С. Торбеевой [27], после кислотного выщелачивания карбонатов из предполагаемых лампроитов породы восстанавливают

свой первичный состав. Однако, как видно из диаграммы (см. рис. 3), составы выщелоченных пород только на левом сегменте диаграммы попадают в поле лампроитов за счет сильного уменьшения доли СаО, в то время как на других они лишь несколько сдвигаются в сторону лампроитов, но не достигают их полей, то есть проблема не заключается в наложенной карбонатизации первичных лампроитов. Можно предположить, что при кислотной обработке вымывается значительная часть СаО породы, которая была трансформирована в карбонатные фазы при постмагматическом автотасоматическом преобразовании пород. Небольшой сдвиг в сторону поля лампроитов только по координатам кремнеземистости заметен лишь за счет относительного увеличения доли SiO₂ – как основного компонента пород, а по другим второстепенным оксидам эти сдвиги практически незаметны.

Модели формирования комплексов ультраосновных-щелочных пород и карбонатитов

В составе самостоятельной платформенной формации ультраосновных-щелочных пород Ю.М. Шейнманном [37] были выделены две субформации: сложные карбонатитосодержащие интрузии центрального типа и кимберлитовые трубки. Генетическое единство комплексов УЩК подтверждается не только общностью петрохимических признаков, но и структурной связью [26]. Например, на Томторском массиве наблюдается сосредоточение самых разнообразных пород в пределах одной концентрически-зональной вулканоплутонической структуры, в которой время формирования отдельных магматических фаз охватывает рубеж от рифея до среднего палеозоя [10]. Наиболее острой проблемой в генезисе УЩК является выяснение характера взаимодействия карбонатитовых и силикатных расплавов.

Практически повсеместная тесная пространственная и временная приуроченность карбонатитовых массивов с комплексами щелочных ультраосновных пород

траосновных пород и сиенитов позволила А. Хегбому, В. Бреггеру, Р. Дели и Г. Эккерману выдвинуть положение о магматическом происхождении карбонатитовых образований. П. Уилли на основе экспериментальных данных по многим карбонатсодержащим системам [38] дается заключение о существовании несмесимости силикатной и карбонатной магм, обуславливающей возможность отделения карбонатитовых расплавов и флюидов от материнской щелочно-перидотитовой магмы. В качестве реальности существования несмесимости между силикатным и карбонатитовым магматическими расплавами разные исследователи приводят многочисленные факты [39, 40; и др.] существования в щелочных породах глобулей и расплавных включений карбонатного состава в минералах, в том числе и в глубинных. Явление отделения кальцитовой фазы от силикатного расплава на магматической стадии путем ликвации было описано на примере дифференцированного силла анальцимовых базальтоидов в Казахстане [41]. Здесь в средней части силла наблюдаются скопления мелких (до 5 мм) сферических глобулей кальцита, которые вверх по разрезу при слиянии укрупняются и приобретают сложные формы, образуя отдельные гнезда размером до 10–20 см, линзовидные обособления и прожилки кальцита.

В результате экспериментально-технологической плавки пироклор-монацитовой и пироклор-монацит-крандаллитовой проб из Томторского массива установлено расслоение расплава на две несмешивающиеся жидкие фазы с резкой границей [42]. Верхний слой был представлен силикатным расплавом, обогащенным Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 и Nb_2O_5 , а нижний – фосфатно-солевым, концентрирующим P_2O_5 , TR_2O_3 , Sc_2O_3 , CaO , SrO , BaO . Извлечение РЗЭ в фосфатно-солевой ликват составляет 80–85 %, а извлечение ниобия – более сложное зависящее от исходного состава руд. Эти исследования показывают, что полученные результаты имеют значение не только для селективной концентрации полезных рудных компонентов, но и для установления ликвационного механизма распределения микроэлементов в процессе эволюции рудно-магматической системы.

По мнению В.Н. Анфиголова и В.К. Пуртова [43], карбонатно-силикатные системы при низких давлениях в твердом состоянии образуют двойные соединения и твердые растворы, т. е. являются структурно совместимыми компонентами,

поэтому в расплавленном состоянии они смешиваются в широких пределах. Из-за такой противоречивости карбонат-силикатного взаимодействия предполагается, что в зависимости от давления и содержания CO_2 , H_2O , P , F и щелочей допускается возможность существования постепенных переходов от карбонатитовых магм к гидротермальным растворам. Показано, что карбонатитовые расплавы крайне текучи, и это создает благоприятные условия для их перехода в гидротермальные или «карботермальные» растворы, которые могут служить источником щелочей для фенитизации [38].

В результате исследования карбонатитовых и кимберлитовых образований восточного склона Анабарского поднятия В.К. Маршинцевым [44, 45] установлены геологические и минералогическо-геохимические признаки их различия и вертикальной зональности. Выделены два типа карбонатитов: интрузивные карбонатиты, выполняющие жильные и дайковые тела, и карбонатитовые брекчии – слагающие трубки взрыва. Интрузивные карбонатиты, пространственно тяготеющие к кимберлитовым трубкам, по ряду признаков (присутствию в них пироба, пикроильменита, хромшпинелидов и алмаза, повышенному содержанию Ti , Ni , Cr , Co) сходны с кимберлитами. Карбонатитовые же брекчии обогащены Nb , Ta , Zr , P , Sr , Ba , TR , что является специфической геохимической особенностью классических карбонатитовых комплексов щелочно-ультраосновных пород. Все это свидетельствует о том, что кимберлиты и УЩК, несмотря на сходство исходной магмы, имеют весьма значительные и дискретные различия.

Многие исследователи придерживаются модели частичного выплавления магм, имеющих богатую редкометалльную специализацию, из метасоматически обогащенной мантии. Высокие концентрации редких элементов в щелочных породах и карбонатитах Гулинского массива Л.Н. Когарко и Р.Э. Зартманом [46] связываются с процессами мантийного метасоматоза, вызванного подъемом Сибирского суперплюма. В.С. Шкодзинским [47] активно развивается теория о формировании кимберлитовых и карбонатитовых магм, связанная с процессами фракционирования магматического океана на поверхности Земли. В этом случае не существует трудно разрешимой проблемы отделения той мизерной доли расплава, которая бы соответствовала рас-

смаатриваемым высокощелочным магмам, согласно гипотезе частичного выплавления из мантийных гипербазитов. Напротив, обогащенные легкими элементами очаги остаточных расплавов кимберлитового, щелочно-базальтоидного, лампроитового, карбонатитового составов при благоприятных геодинамических обстановках подвергаются быстрому всплытию и последующему декомпрессионному расплавлению. Им показано, что в глубинных условиях в магме отсутствует флюидная фаза, вследствие растворения ее в расплаве под влиянием высокого давления. Но низкотемпературные магмы, к которым могут относиться и карбонатитовые магмы, в близповерхностных условиях затвердевали в результате декомпрессионного выделения в них флюидной фазы. При этом происходит консервация флюидной фазы, но увеличение давления в них со временем приводит к дезинтеграции верхних частей магматических колонн, обуславливая вулканические взрывы.

Заключение

Преимущественную приуроченность щелочно-ультраосновных комплексов пород к периферии Сибирской платформы авторы связывают с формированием крупных изверженных провинций в результате распада суперконтинента Родиния, начавшегося в неопротерозойское время [48]. Существование таких полихронных сложных рудно-магматических кольцевых комплексов, как Томторский массив, свидетельствует о наличии в литосферной мантии внутриплитных глубинных крупных магомгенерирующих очагов. Уникальная комплексная благородно-редкометалльная рудоносность, широкий спектр изверженных пород от ультраосновных до кислых магматитов, обогащенных летучими и рудными компонентами, являются признаками неистощенности исходных расплавов. В зависимости от физико-химических параметров плавления, степени дифференциации, контаминации и других факторов могут формироваться сложные рудно-магматические комплексы, которые иногда возобновляются при последующих этапах тектономагматических активизаций.

Литература

1. *Округин А.В., Толстов А.В.* Петрогеохимическая характеристика сиенит–щелочно-ультраосновного силикатного комплекса пород Томторского мас-

сива (северо-восток Сибирской платформы) // Отечественная геология. 2017. № 5. С. 56–66.

2. *Шерер Дж., Йодер Х.* Кристаллическое состояние и плавление простых щелочных базальтов // Экспериментальная петрология и минералогия. М.: Недра. 1971. С. 6–15.

3. *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.

4. *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.

5. *Толстов А.В., Коноплев А.Д., Кузьмин В.И.* Особенности формирования уникального редкометалльного месторождения Томтор и оценка перспектив его освоения // Разведка и охрана недр. 2011. № 6. С. 20–26.

6. *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.

7. *Эрлих Э.Н.* Новая провинция щелочных пород на северо-востоке Сибирской платформы // Зап. ВМО. 1964. Т. 90, вып. 6. С. 682–693.

8. *Поршнев Г.И., Степанов Л.Л.* Геология и минералогия Уджинской провинции (северо-запад Якутской АССР) // Советская геология. 1981. № 12. С. 103–106.

9. *Шпунт Б.Р., Шамишина Э.А., Брахофгель Ф.Ф., Филиппов Н.Д.* Состав и петрохимические особенности щелочно-ультраосновных пород Уджинского поднятия (север Сибирской платформы) // Изв. АН СССР. Серия геологическая. 1991. № 8. С. 68–80.

10. *Зайцев А.И., Энтин А.Р., Ненашев Н.И., Лазебник К.А., Тянь О.А.* Геохронология и изотопная геохимия карбонатитов Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1992. 248 с.

11. *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.

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

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. В: Chemie der Erde, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.04.001>

14. Музыка Г.М., Чумирин К.Г. К вопросу о проявлении аналогов меймечитов на южной окраине Анабарского массива // Геология, петрография и минералогия магматических образований северо-восточной части Сибирской платформы. М.: Наука, 1970. С. 183–190.
15. Милашев В.А., Томановская Ю.И. Проявления щелочно-ультраосновного магматизма в прибрежной части моря Лаптевых // Кимберлитовый вулканизм и перспективы коренной алмазности Сибирской платформы. Л.: НИИГА. 1971. С. 127–133.
16. Округин А.В., Зайцев А.И., Борисенко А.С., Земнухов А.Л., Иванов П.О. Золотоплатиноносные россыпи бассейна р. Анабар и их возможная связь с щелочно-ультраосновными магматитами севера Сибирской платформы // Отечественная геология. 2012. № 5. С. 11–21.
17. Томишин М.Д., Округин А.В., Савинов В.Т., Шахотко Л.И. Эбегаинский дайковый пояс трахидолеритов на севере Сибирской платформы // Геология и геофизика. 1997. Т. 38, № 9. С. 1475–1483.
18. Округин А.В., Земнухов А.Л. Силикатные включения в платиновых металлах россыпей р. Анабар как индикаторы их материнских источников // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции. Якутск: Изд. дом СВФУ. 2019. Т. 1. С. 73–76.
19. 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.
20. Округин А.В., Якубович О.В., Гедз А.М., Земнухов А.Л., Иванов П.О. Минеральные парагенезисы и ^{190}Pt - ^{4}He возраст Fe-Pt твердых растворов из россыпей р. Анабар (северо-восток Сибирской платформы) // Докл. РАН. 2019. Т. 484. С. 63–66.
21. Округин А.В., Якубович О.В., Эрнст Р., Дружинина Ж.Ю. Платиноносные россыпи Сибирской платформы: минеральные ассоциации и их возрастные характеристики как индикаторы проявления крупных изверженных провинций на древней платформе // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2018. № 3. С. 36–52.
22. Васильев Ю.Р., Золотухин В.В. Петрология ультрабазитов севера Сибирской платформы и некоторые проблемы их генезиса. Новосибирск: Наука, 1975. 272 с.
23. Егоров Л.С. Мелилитовые породы Маймеча-Котуйской провинции. Л.: Недра, 1969. 248 с.
24. Эпштейн Е.М., Аникеева Л.И. Некоторые вопросы геологии и петрологии комплекса ультраосновных щелочных интрузивных пород // Физико-химические проблемы формирования горных пород и руд. Т. 2. М.: Изд-во АН СССР. 1963. С. 182–195.
25. Ковальский В.В., Никушов К.Н., Егоров О.С. Кимберлитовые и карбонатитовые образования Анабарской антеклизы. М.: Наука, 1969. 288 с.
26. 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.
27. Владыкин Н.В., Торбеева Т.С. Лампроиты Томторского массива (Восточное Прианабарье) // Геология и геофизика. 2005. Т. 46, № 10. С. 1038–1049.
28. Жук-Почекутов К.А., Гладких В.С., Леонтьев Л.Н. Ассоциация щелочных базальтоидов–базальтов Маймеча-Котуйской вулканоплутонической формации // Петрология и геохимические особенности комплекса ультрабазитов и карбонатитов. М.: Наука, 1965. С. 5–90.
29. Jaques A.L., Lewis J.D., Smith C.B. The kimberlites and lamproites of Western Australia. Bull. Geol. Surv. W. Australia. 1986. 132. 268 p.
30. Маракушев А.А. Петрогенезис и рудообразование. М.: Наука, 1979.
31. Куширо И., Шерер Дж. Новые данные по системе диопсид–форстерит–кремнезем // Экспериментальная петрология и минералогия. М.: Недра, 1969. С. 52–62.
32. Onuma K., Yagi K. The system diopside-akermanite-nepheline // Amer. Mineral. 1967. Vol. 52. P. 227–243.
33. Schairer I.F., Yoder H.S. The nature of residual liquids from crystallization, with data on the system nepheline-diopside-silica // Amer. J. Sci. 1960. Vol. 258-A. P. 273–283.
34. Соболев А.В., Соболев С.В., Кузьмин Д.В., Малич К.Н., Петрунин А.Г. Механизм образования сибирских меймечитов и природа их связи с траппами и кимберлитами // Геология и геофизика. 2009. № 12. С. 1293–1334.
35. Шихорина К.М. Высококалийные породы Чимара-Уджинского района (северо-восток Сибирской платформы) // Изв. АН СССР. Серия геологическая. 1991. № 3. С. 58–64.
36. Багдасаров Ю.А. Геохимические особенности карбонатитов и сопровождающих их силикатных пород щелочно-карбонатитового массива Томтор (Восточное Прианабарье, Якутия) // Геохимия. 1997. № 1. С. 10–20.
37. 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.
38. Уилли П.Дж. Проблема образования карбонатитов в свете экспериментальных данных. Возникновение и дифференциация карбонатитовой магмы // Карбонатиты. М.: Мир, 1969. С. 265–300.
39. Solovova I.P., Girnits A.V., Kogarko L.N., Kononkova N.N., Stoppa F., Rosatelli G. Compositions of mag-

mas and carbonate–silicate liquid immiscibility in the Vulture alkaline igneous complex, Italy // *Lithos*. 2005. Vol. 85. P. 113–128. DOI:10.1016/j.lithos.2005.03.022

40. *Wyllie P.J., Lee W.J.* Kimberlites, carbonatites, peridotites and silicate-carbonate liquid immiscibility explained in parts of the system CaO-(Na₂O+K₂O)-(MgO+FeO)-(SiO₂+Al₂O₃)-CO₂ // *Proceedings of the VIIth International kimberlite conference*. Cape Town. 1999. Vol. 2. P. 923–932.

41. *Капустин Ю. Л.* Дифференцированный силл базальтоидов и особенности выделения в нем кальция // *Зап. ВМО*. 1985. №3. С. 275–288.

42. *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.

43. *Анфиголов В.Н., Пуртов В.К.* Несмесимость расплавов в карбонатно-силикатных системах. Ревизия экспериментальных данных // *Геохимия*. 2003. № 7. С. 691–698.

44. *Мариинцев В.К.* Вертикальная неоднородность кимберлитовых тел Якутии. Новосибирск: Наука, 1986. 240 с.

45. *Мариинцев В.К.* Карбонатитовые образования восточного склона Анабарского сводового поднятия. Якутск: Кн. изд-во. 1974. 120 с.

46. *Козарко Л.Н., Зартман Р.Э.* Новые данные о возрасте Гулинской интрузии и проблема связи щелочного магматизма Маймеча-Котуйской провинции с Сибирским суперплюмом (данные по изотопии U-Th-Pb системы) // *Геохимия*. 2011. № 5. С. 462–472.

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

48. *Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U., Hanes J.A., Gladkochub D.P., Okrugin A.V. et al.* Long-lived connection between southern Siberia and northern Laurentia in the Proterozoic // *Nature Geoscience*. 2016. Vol. 9, No. 6. P. 464–469.

Поступила в редакцию 04.09.2019

Принята к публикации 12.11.2019

Об авторах

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

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

ТОЛСТОВ Александр Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, директор, Научно-исследовательское геологическое предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО), 678170, Республика Саха (Якутия), г. Мирный, Чернышевское шоссе, д. 16, Россия, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. ак. Коптюга, 3, Россия,

<https://orcid.org/0000-0002-6057-5987>, tolstovAV@alrosa.ru;

СЛЕПЦОВ Афанасий Петрович, главный геолог прииска «Центральный», АО «Якутскгеология», 677009, Якутск, ул. Кальвица, 24, Россия,

<https://orcid.org/0000-0002-1986-4074>, sleptsoffap@gmail.com;

БАРАНОВ Леонид Николаевич, младший научный сотрудник, Научно-исследовательское геологическое предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО), Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. ак. Коптюга, 3, Россия,

<https://orcid.org/0000-0001-6526-3635>, baranovln@alrosa.ru.

Информация для цитирования

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, том 24, № 2. С. 7–24. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-4-1>

Petrochemical features of the association of ultrabasic alkali rocks and carbonatites of the Tomtor massif and interpretation of possible trends of their evolution

A.V. Okrugin¹, A.V. Tolstov^{2,4}, A.P. Sleptsov³, L.N. Baranov^{2,4}

¹Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russia,

²PJSC "Alrosa", Mirny, Russia,

³JSC "Yakutskgeologia", Yakutsk, Russia,

⁴V.S Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

okrugin@diamond.ysn.ru

Abstract. Petrochemical characteristics of the series of silicate rocks, alkali ultrabasic rocks and syenites with carbonatites of the Tomtor massif are given, and the change in their compositions is analyzed using experimentally studied triple diagrams of phase states. In the process of such analysis on different cross sections of "the extended basalt tetrahedron" Ne-Fo-SiO₂-La, covering both quartznormative (tholeiitic), and nephelinenormative (alkali) basalts, possible trends of evolution of the Tomtor ore-magmatic system are interpreted. Existence of such polychromous complicated ore-magmatic ring complexes as Tomtor massif indicates occurrence of intraplate deep large magma-generating hearths in lithosphere mantle. Extraordinary complex precious-rare-metal ore content, wide variety of igneous rocks from ultrabasic to middle magmatites, enriched with volatile and ore components, are signs of non-depleting primary melts. Such easily fusible hearths, conserved in lithosphere mantle of residual melts of kimberlite, alkali-basaltoid, lamproite, carbonatite compositions, under the subsequent favorable geodynamic settings, are subject to rapid flotation, undergoing decompression melting and forming concentric-zonal platform complexes of alkali ultrabasic rocks with carbonatites. The Phanerozoic alkali-ultrabasic complexes of the rocks are predominantly confined to the periphery of the Siberian platform, and its related to location of their potential hearths during formation of large igneous provinces as a result of breakup of the Rodinia supercontinent with a divergence North-Asian (Siberian) and North-American (Laurentia) cratons, which began in the Neoproterozoic.

Key words: alkali-ultrabasic rocks, picrites, syenites, carbonatites, deposits of rare elements, Tomtor massif.

Acknowledgements. The authors thank all colleagues who participated in the laboratory, analytical work and contributed to these comprehensive studies. The work was carried out in the framework of research IGABM SB RAS (№ 0381-2016-0003) and the support of RFBR (project № 17-05-00390) and of RSF (project 18-17-00120).

References

1. Okrugin A.V., Tolstov A.V. Petrogeokhimicheskaya kharakteristika sienit-shchelochno-ul'traosnovnogo silikatnogo kompleksa porod Tomtorskogo massiva (severovostok Sibirskoi platformy) // Otechestvennaya geologiya. 2017. N 5. P. 56–66.
2. Sherer Dzh., Ioder Kh. Kristallichesкое sostoyanie i plavlenie prostykh shchelochnykh bazal'tov // Eksperimental'naya petrologiya i mineralogiya. M.: Nedra, 1971. P. 6–15.
3. Kravchenko S.M., Belyakov A.Yu., Pokrovskii B.G. Geokhimiya i genezis Tomtorskogo massiva (sever Sibirskoi platformy) // Dokl. RAN. 1992. Vol. 322, N 5. P. 966–972.
4. Tolstov A.V. Osobennosti mineralogii i geokhimi mii apatit-magnetitovykh rud massiva Tomtor (S-Z Yakutiya) // Geologiya i geofizika. 1994. Vol. 35, N 9. P. 91–100.
5. Tolstov A.V., Konoplev A.D., Kuzmin V.I. Osobennosti formirovaniya unikal'nogo redkometal'nogo mestorozhdeniya Tomtor i otsenka perspektiv ego osvojenia // Razvedka i ohrana neдр. 2011. N 6. P. 20–26.
6. 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, N 2. P. 83–110.
7. Erlikh E.N. Novaya provintsiya shchelochnykh porod na severo-vostoke Sibirskoi platformy // Zap. VMO. 1964. Vol. 90, Iss. 6. P. 682–693.
8. Porshnev G.I., Stepanov L.L. Geologiya i minerageniya Udzhinskoi provintsii (severo-zapad Yakutskoi ASSR) // Sovetskaya geologiya. 1981. N 12. P. 103–106.

9. *Shpunt B.R., Shamshina E.A., Brakhfogel' F.F., Filippov N.D.* Sostav i petrokhimicheskie osobennosti shchelochno-ul'traosnovnykh porod Udzhinskogo podnyatiya (sever Sibirskoi platformy) // *Izv. AN SSSR. Seriya geologicheskaya*. 1991. N 8. P. 68–80.
10. *Zaitsev A.I., Entin A.R., Nenashev N.I., Lazebnik K.A., Tyan O.A.* Geokhronologiya i izotopnaya geokhimiya karbonatitov Yakutii. Yakutsk: YaNTs SO RAN, 1992. 248 p.
11. *Entin A.R., Zaitsev A.I., Nenashev N.I. i dr.* O posledovatel'nosti geologicheskikh sobytii, svyazannykh s vnedreniem Tomtorskogo massiva ul'traosnovnykh shchelochnykh porod i karbonatitov (Severo-zapadnaya Yakutiya) // *Geologiya i geofizika*. 1990. Vol. 31, N 12. P. 42–51.
12. *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 40Ar/39Ar issledovaniy // *Dokl. RAN*. 2014. Vol. 454, N 2. P. 195–199.
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. B: *Chemie der Erde*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.04.001>
14. *Muzyka G.M., Chumirin K.G.* K voprosu o proyavlenii analogov meimechitov na yuzhnoi okraine Anabarskogo massiva // *Geologiya, petrografiya i mineralogiya magmaticheskikh obrazovaniy severo-vostochnoi chasti Sibirskoi platformy*. M.: Nauka, 1970. P. 183–190.
15. *Milashhev V.A., Tomanovskaya Yu.I.* Proyavleniya shchelochno-ul'traosnovnogo magmatizma v pribrezhnoi chasti morya Laptevnykh // *Kimberlitovyi vulkanizm i perspektivy korennoi almazonosnosti Sibirskoi platformy*. L.: NIIGA, 1971. P. 127–133.
16. *Okrugin A.V., Zaitsev A.I., Borisenko A.S., Zemnukhov A.L., Ivanov P.O.* Zolotoplatinonosnye rossypi basseina r. Anabar i ikh vozmozhnaya svyaz' s shchelochno-ul'traosnovnymi magmatitami severa Sibirskoi platformy // *Otechestvennaya geologiya*. 2012. N 5. P. 11–21.
17. *Tomshin M.D., Okrugin A.V., Savinov V.T., Shakhotko L.I.* Ebekhainskii daikovyi poyas trakhidoleritov na severe Sibirskoi platformy // *Geologiya i geofizika*. 1997. Vol. 38, N 9. P. 1475–1483.
18. *Okrugin A.V., Zemnukhov A.L.* Silikatnye vklyucheniya v platinovykh metallakh rossypei r. Anabar kak indikatoriy ikh materinskikh istochnikov // *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii: materialy IX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Yakutsk: Izd. dom SVFU. 2019. Vol. 1. P. 73–76.
19. *Baranov L.N., Tolstov A.V., Okrugin A.V., Slepstov A.P.* Novoe v mineralogii i geokhimii apatit-magnetitovykh rud massiva Tomtor, severo-vostok Sibirskoi platformy // *Rudy i metally*. 2018. N 2. P. 42–54. DOI: 10.24411/0869-5997-2018-00011.
20. *Okrugin A.V., Yakubovich O.V., Gedz A.M., Zemnukhov A.L., Ivanov P.O.* Mineral'nye paragenezisy i 190Pt-4He vozrast Fe-Pt tverdykh rastvorov iz rossypei r. Anabar (severo-vostok Sibirskoi platformy) // *Dokl. RAN*. 2019. Vol. 484. P. 63–66.
21. *Okrugin A.V., Yakubovich O.V., Ernst R., Druzhinina Zh.Yu.* Platinonosnye rossypi Sibirskoi platformy: mineral'nye assotsiatsii i ikh vozrastnye kharakteristiki kak indikatoriy proyavleniya krupnykh izverzhennykh provintsii na drevnei platforme // *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki*. 2018. N 3. P. 36–52.
22. *Vasil'ev Yu.R., Zolotukhin V.V.* Petrologiya ul'trabazitov severa Sibirskoi platformy i nekotorye problemy ikh genezisa. Novosibirsk: Nauka, 1975. 272 p.
23. *Egorov L.S.* Melilitovye porodyy Maimecha-Kotuiskskoi provintsii. L.: Nedra, 1969. 248 p.
24. *Epshtein E.M., Anikeeva L.I.* Nekotorye voprosy geologii i petrologii kompleksa ul'traosnovnykh shchelochnykh intruzivnykh porod // *Fiziko-khimicheskie problemy formirovaniya gornykh porod i rud*. Vol. 2. M.: Izd-vo AN SSSR, 1963. P. 182–195.
25. *Koval'skii V.V., Nikishov K.N., Egorov O.S.* Kimberlitovye i karbonatitovye obrazovaniya Anabarskoi anteklizy. M.: Nauka, 1969. 288 p.
26. *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.
27. *Vladykin N.V., Torbeeva T.S.* Lamproity Tomtorskogo massiva (Vostochnoe Prianabar'e) // *Geologiya i geofizika*. 2005. Vol. 46, N 10. P. 1038–1049.
28. *Zhuk-Pochekutov K.A., Gladkikh V.S., Leont'ev L.N.* Assotsiatsiya shchelochnykh bazal'toidov–bazal'tov Maimecha-Kotuiskskoi vulkano-plutonicheskoi formatsii // *Petrologiya i geokhimicheskie osobennosti kompleksa ul'trabazitov i karbonatitov*. M.: Nauka, 1965. P. 5–90.
29. *Jaques A.L., Lewis J.D., Smith C.B.* The kimberlites and lamproites of Western Australia. *Bull. Geol. Surv. W. Australia*. 1986. 132. 268 p.
30. *Marakushev A.A.* Petrogenesis i rudoobrazovanie. M.: Nauka, 1979.
31. *Kushihiro I., Sherer Dzh.* Novye dannye po sisteme diopsid-forsterit-kremnezem // *Eksperimental'naya petrologiya i mineralogiya*. M.: Nedra, 1969. P. 52–62.
32. *Onuma K., Yagi K.* The system diopside-akermanite-nepheline // *Amer. Mineral*. 1967. Vol. 52. P. 227–243.
33. *Schairer I.F., Yoder H.S.* The nature of residual liquids from crystallization, with data on the system nepheline-diopside-silica // *Amer. J. Sci*. 1960. Vol. 258-A. P. 273–283.
34. *Sobolev A.V., Sobolev S.V., Kuz'min D.V., Malich K.N., Petrulin A.G.* Mekhanizm obrazovaniya sibirskikh meimechitov i priroda ikh svyazi s trappami i kimberlitami // *Geologiya i geofizika*. 2009. N 12. P. 1293–1334.
35. *Shikhorina K.M.* Vysokokalievyye porodyy Chimara-Udzhinskogo raiona (severo-vostok Sibirskoi platformy) // *Izv. AN SSSR. Seriya geologicheskaya*. 1991. N 3. P. 58–64.

36. *Bagdasarov Yu.A.* Geokhimicheskie osobennosti karbonatitov i soprovozhdayushchikh ikh silikatnykh porod shchelochno-karbonatitovogo massiva Tomtor (Vostochnoe Priabar'e, Yakutiya) // *Geokhimiya*. 1997. N 1. P. 10–20.
37. *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.
38. *Uilli P.Dzh.* Problema obrazovaniya karbonatitov v svete eksperimental'nykh dannyykh. Vozniknovenie i differentsiatsiya karbonatitovoi magmy // *Karbonatity*. M.: Mir, 1969. P. 265–300.
39. *Solovova I.P., Giris A.V., Kogarko L.N., Kononkova N.N., Stoppa F., Rosatelli G.* Compositions of magmas and carbonate-silicate liquid immiscibility in the Vulture alkaline igneous complex, Italy // *Lithos*. 2005. Vol. 85. P. 113–128. DOI:10.1016/j.lithos.2005.03.022
40. *Wyllie P.J., Lee W.J.* Kimberlites, carbonatites, peridotites and silicate-carbonate liquid immiscibility explained in parts of the system CaO-(Na₂O+K₂O)-(MgO+FeO)-(SiO₂+Al₂O₃)-CO₂ // *Proceedings of the VIIth International kimberlite conference*. Cape Town. 1999. Vol. 2. P. 923–932.
41. *Kapustin Yu.L.* Differentsirovannyi sill bazal'toidov i osobennosti vydeleniya v nem kal'tsita // *Zap. VMO*. 1985. N 3. P. 275–288.
42. *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. V. 462. N 4. P. 440–443.
43. *Anfigolov V.N., Purtov V.K.* Nesmesimost' rasplavov v karbonatno-silikatnykh sistemakh. Reviziya eksperimental'nykh dannyykh // *Geokhimiya*. 2003. N 7. P. 691–698.
44. *Marshintsev V.K.* Vertikal'naya neodnorodnost' kimberlitovykh tel Yakutii. Novosibirsk: Nauka. 1986. 240 p.
45. *Marshintsev V.K.* Karbonatitovye obrazovaniya vostochnogo sklona Anabarskogo svodovogo podnyatiya. Yakutsk. Kn. izd-vo, 1974. 120 p.
46. *Kogarko L.N., Zartman R.E.* Novye dannye o vozraste Gulinskoj intruzii i problema svyazi shchelochnogo magmatizma Maimecha-Kotuistkoi provintsii s Sibirskim superplyumom (dannye po izotopii U-Th-Pb sistemy) // *Geokhimiya*. 2011. N 5. P. 462–472.
47. *Shkodzinskii V.S.* Global'naya petrologiya po sovremennym dannym o goryachej geterogennoj akkretsii Zemli. Yakutsk: Izdatel'skii dom SVFU, 2018. 244 p.
48. *Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U., Hanes J.A., Gladkochub D.P., Okrugin A.V. et al.* Long-lived connection between southern Siberia and northern Laurentia in the Proterozoic // *Nature Geoscience*. 2016. Vol. 9. No. 6. P. 464–469.

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;

TOLSTOV Aleksandr Vasilevich, doctor of geological and mineralogical sciences, director, PJSC "ALROSA", 16 Chernyshevskoe sh., Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia, V.S Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-6057-5987>, tolstovAV@alrosa.ru;

SLEPTSOV Afanasiy Pertovich, head geologist of the «Central» mine, 24 Kalvitsa st., Yakutsk, 677009, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-1986-4074>, sleptsoffap@gmail.com;

BARANOV Leonid Nikolaevich, laboratory assistant, V.S Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3 Ac. Koptyuga st., Novosibirsk, 630090, Russia, PJSC «ALROSA», 16 Chernyshevskoe sh., Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia, <https://orcid.org/0000-0001-6526-3635>, baranovln@alrosal.ru.

Citation

Okrugin A.V., Tolstov A.V., Sleptsov A.P., Baranov L.N. Petrochemical features of the association of ultrabasic alkali rocks and carbonatites of the Tomtor massif and interpretation of possible trends of their evolution // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2019, Vol. 24, N 4. P. 7–24. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-4-1>