

УДК 552.31

УЛЬТРАМАФИТ-ЩЕЛОЧНО-КАРБОНАТИТОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ КАК РЕЗУЛЬТАТ ДВУХСТАДИЙНОГО ПЛАВЛЕНИЯ МАНТИЙНОГО ПЛЮМА (НА ПРИМЕРЕ СРЕДНЕПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОГО ТИКШЕОЗЁРСКОГО ИНТРУЗИВА, СЕВЕРНАЯ КАРЕЛИЯ, РОССИЯ)

Е. В. Шарков^{1,*}, А. В. Чистяков¹, М. М. Богина¹, академик РАН О. А. Богатиков¹,
В. В. Щипцов², Б. В. Беляцкий³, П. В. Фролов²

Поступило 18.02.2019 г.

Тикшеозёрский ультрамафит-щёлочно-карбонатитовый интрузивный комплекс, как и многочислен- ные аналогичные карбонатит-содержащие комплексы, входит в состав крупной изверженной провин- ции, связанной с подъёмом термохимического мантийного плюма. Полученные нами геохимические и изотопные данные свидетельствуют о том, что ультрамафиты и щелочные породы комплекса могут являться продуктами кристаллизационной дифференциации исходного расплава типа щелочного пик- рита, в то время как карбонатитовые магмы имеют самостоятельное, но тоже мантийное происжде- ние. Мы полагаем, что формирование родоначальных магм Тикшеозёрского комплекса было связано с двухстадийным плавлением головы мантийного плюма: 1) адиабатическое плавление её внутренних частей, приводящее к появлению подщелоченных ультрамафических магм (щелочных пикритов), фракционная кристаллизация которых продуцирует магмы щелочного состава; 2) инконгруэнтное плавление верхнего охлаждённого края головы мантийного плюма под влиянием богатых CO₂ флю- идов, поступающих из зоны адиабатического плавления и приводящего к появлению карбонатитовых магм.

Ключевые слова: ультрамафит-щёлочно-карбонатитовый комплекс, крупная изверженная провинция (КИП), мантийный плюм, карбонатитовый флюид, расплавные пакеты, адиабатическое и инкон- груэнтное плавление.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524864460-465>

Ультрамафит-щёлочно-карбонатитовые интрузивные комплексы входят в состав крупных извер- женных провинций, являясь промежуточными ка- мерами щелочных магматических систем, связанных с подъемом мантийных плюмов [10]. Как видно из названия, они сложены тремя главными сериями пород, и, по мнению большинства исследователей, являются фракционатами единого исходного рас- плава — щелочно-пикритовой магмы. Вместе с тем, несмотря на довольно широкую распространённость карбонатитов и почти вековую историю их изучения, взаимосвязь карбонатитов и силикатных пород до сих пор остается спорной [12, 15 и др.].

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии наук, Москва

²Институт геологии Карельского научного центра Российской Академии наук, Петрозаводск

³Центр изотопных исследований Всероссийского геологического института им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург

*E-mail: sharkov@igem.ru

Мы рассмотрим эту проблему на примере Тикше- озёрского ультрамафит-щёлочно-карбонатитового комплекса в Северной Карелии. Этот комплекс яв- ляется одним из древнейших (~2000 Ma) [8] подобных интрузивов. Вместе с соседним Елетьозерским сие- нит-габбровым комплексом (2086 ± 30 Ma) [4] он входит в состав среднепалеопротерозойской Ятулий- ско-Людиковийской крупной изверженной провин- ции в восточной части Балтийского (Фенносканди- навского) щита [3]. Однако, в отличие от Елетьозёр- ского комплекса, Тикшеозёрский комплекс образо- ван преимущественно клинопироксенитами при существенной роли карбонатитов и фойдолитов. Пре- дыдущие геохимические исследования Тикшеозёр- ского комплекса были сфокусированы на карбонати- тах [2, 6 и др.], в то время как данные по главным (силикатным) интрузивным фазам практически от- сутствуют. Для того чтобы заполнить этот пробел, мы провели геохимическое изучение ультрамафитовых и щелочных компонентов этого комплекса (табл. 1).

Таблица 1. Составы пород Тикшеозёрского массива

№ обр.	T18	T4	T15	32–2	37–9	26–1–8	34–1	38–8	T17	T19	T2	839	835
Группа	1	1	2	2	3	2	2	2	1	1	1	3	3
SiO ₂	50,05	46,61	38,04	38,59	27,64	36,22	38,98	41,04	47,60	48,42	48,25	34,61	40,20
TiO ₂	0,55	0,57	4,23	3,11	2,00	3,12	4,44	3,09	0,42	0,41	0,51	0,95	1,98
Al ₂ O ₃	2,25	2,21	9,29	13,04	6,50	12,78	8,23	8,72	1,62	1,49	2,03	15,33	13,66
Fe ₂ O ₃	6,06	10,41	17,54	13,62	12,15	11,93	15,88	12,14	8,51	9,70	9,7	7,48	12,77
MnO	0,09	0,16	0,20	0,19	0,32	0,17	0,18	0,15	0,14	0,16	0,16	0,08	0,21
MgO	18,79	21,33	8,60	7,72	6,76	6,92	10,62	10,17	22,16	24,15	22,42	7,98	7,07
CaO	19,51	15,69	16,50	14,04	20,57	13,51	19,79	18,71	15,99	13,56	15,89	12,17	13,11
Na ₂ O	0,29	0,40	1,71	4,83	4,42	8,24	0,77	1,82	0,23	0,22	0,44	10,14	6,67
K ₂ O	0,02	0,05	0,67	2,13	1,72	0,87	0,41	1,01	0,03	0,03	0,06	1,47	0,97
P ₂ O ₅	0,02	0,02	0,16	0,27	0,73	0,06	0,05	0,52	0,02	0,02	0,02	0,11	0,72
ППП	1,64	2,04	2,49	1,96	16,31	4,75	0,39	2,08	2,69	1,09	0,00	9,27	2,10
S	0,10	0,06	0,26	0,14	0,08	0,02	<0,02	<0,02	0,04	0,14	0,04	0,00	0,13
Сумма	99,38	99,55	99,69	99,64	99,20	98,59	99,74	99,45	99,45	99,39	99,52	99,59	99,60
Cs	0,04	0,06	0,10	1,3	2,5	0,1	0,2	0,4	0,0	0,0	0,1	0,41	0,24
Rb	1,3	1,3	11,7	73,1	61,0	17,8	17,1	24,1	1,0	0,5	1,2	46,54	12,39
Ba	21,3	36,4	280	782	3136	574,6	423,8	1544	33,0	12,1	80,4	1739	1619
Th	0,056	0,10	5,3	13,7	19,1	3,3	2,6	6,1	0,2	0,1	0,3	71,60	3,57
U	0,014	0,022	0,34	2,3	11,7	0,6	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	0,39	0,41
Nb	0,28	0,69	19,9	115	105	13,4	13,2	12,2	0,5	0,3	0,6	8,46	27,33
Ta	0,0	0,046	1,4	3,6	4,9	1,5	1,6	1,0	0,1	0,1	0,1	0,25	1,05
La	1,7	2,2	31,4	75,2	211	32,4	18,7	28,6	2,6	1,2	2,5	70	81
Ce	5,3	7,2	74,5	169	368	64,4	51,7	72,4	6,2	4,1	7,1	156	159
Pr	0,9	1,2	9,8	20,0	38,4	7,7	7,7	9,8	0,9	0,7	1,0	20	19
Sr	45,4	55,1	245	509	2037	442	308	1339	35	33	47	424	2044
Nd	5,0	6,7	44,2	76,4	139	33,2	36,7	44,1	4,5	4,0	5,1	84	76
Zr	12,8	16,7	192	297	179	199	315,5	276,6	10,5	11,0	11,1	123	87
Hf	0,6	0,8	6,6	7,5	4,6	3,8	8,7	7,1	0,4	0,5	0,5	2,97	2,16
Sm	1,4	1,8	9,4	13,0	22,5	6,0	7,6	8,4	1,1	1,2	1,3	15	12
Eu	0,42	0,54	2,6	3,6	6,3	1,8	2,3	2,7	0,3	0,3	0,4	4,5	4,4
Gd	1,4	1,8	7,8	8,8	15,9	5,9	6,9	7,8	1,2	1,1	1,3	9,92	8,67
Tb	0,20	0,25	1,0	1,1	2,0	0,7	0,9	0,9	0,2	0,2	0,2	1,35	1,17
Dy	1,2	1,5	5,4	5,4	10,1	3,1	3,6	3,6	0,9	0,9	1,0	6,70	5,58
Y	5,0	6,5	23,2	20,7	45,2	13,5	13,0	13,1	3,7	3,7	4,0	27	24
Ho	0,20	0,26	0,94	0,86	1,7	0,5	0,6	0,6	0,2	0,2	0,2	1,09	0,94
Er	0,50	0,70	2,38	2,08	4,3	1,6	1,6	1,6	0,4	0,5	0,5	2,71	2,40
Tm	0,07	0,09	0,29	0,25	0,53	0,2	0,2	0,2	0,0	0,1	0,1	0,31	0,28
Yb	0,39	0,54	1,74	1,49	3,2	1,3	1,1	1,1	0,3	0,4	0,4	1,81	1,67
Lu	0,06	0,08	0,25	0,21	0,44	0,1	0,1	0,1	0,07	0,08	0,06	0,21	0,22

Примечания. Породы Тикшеозёрского комплекса (группы): 1 — перидотиты, клинопироксениты; 2 — фойдолиты; 3 — карбонат-силикатные породы. Содержания главных компонентов определены (мас.%) методом РФА в ИГЕМ РАН, редких и редкоземельных (в г/т) — методом ICP–MS в ИГЕМ РАН и ИПТМ РАН. В графе Fe₂O₃ приведено суммарное содержание железа.

Тикшеозёрский комплекс площадью около 24 км² прорывает архейские гранито-гнейсы и раннепалеопротерозойские граниты (рис. 1). Считается, что он формировался, по крайней мере, в 3 интрузивных фазы: (1) ультрамафиты (оливиниты, верлиты, клинопироксениты); (2) фойдолиты (якупирангиты, мельтейгиты, уртиты, нефелиновые сиениты); (3) карбонатиты и силикатно-карбонатные породы. Кальцитовые карбонатиты с апатитом обычно содержат редкоземельную (Zr, Nb, Ta) минерализацию; доломит-кальцитовые карбонатиты найдены только в Восточном блоке.

Ультрамафиты первой интрузивной фазы, образующие до 70% современной площади комплекса, обычно представляют собой низко-Ti (TiO_2 0,41–0,78 мас.%) высоко-Mg (Mg# 80–86) породы (кумуляты) с варьирующими соотношениями кумулятивных клинопироксена (диопсида) и оливина при низких концентрациях Fe–Ti оксидов (титаномagnetит, магнетит, ильменит). Состав оливина в перидотитах Fo_{75–80}, снижаясь до Fo_{64–68} в клинопироксенитах. Редкие рудные клинопироксениты содер-

жат до 6,06 мас.% TiO_2 и до 45 мас.% Fe_2O_3 . Все эти ультрамафиты относятся к породам с нормальной щёлочности ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ до 0,72 мас.%).

Фойдолиты представлены щёлочными Ne–Сrx-породами якупирангит-мельтейгит-уртитовой серии со значительными вариациями щелочей от первых процентов в якупирангитах до 9 мас.% в медьтейгитах; Mg# также варьируется от 45 до 67. Якупирангиты, по существу, являются промежуточной разновидностью пород между ультрамафической и щёлочной сериями, где впервые в клинопироксеновом кумулате появляется интерстициальный нефелин. При этом по сравнению с породами ультрамафической серии, темноцветные минералы якупирангитов характеризуются большей железистостью. Так, в отличие от Сrx перидотитов ($\text{Wo}_{46–48}\text{En}_{44–46}\text{Fs}_8$), состав клинопироксена здесь отвечает $\text{Wo}_{50–51}\text{En}_{34–35}\text{Fs}_{14–15}$, а состав оливина — Fo₅₅. В полевых условиях клинопироксениты и якупирангиты практически не различаются, и поэтому на рис. 1 они оба показаны одним знаком.

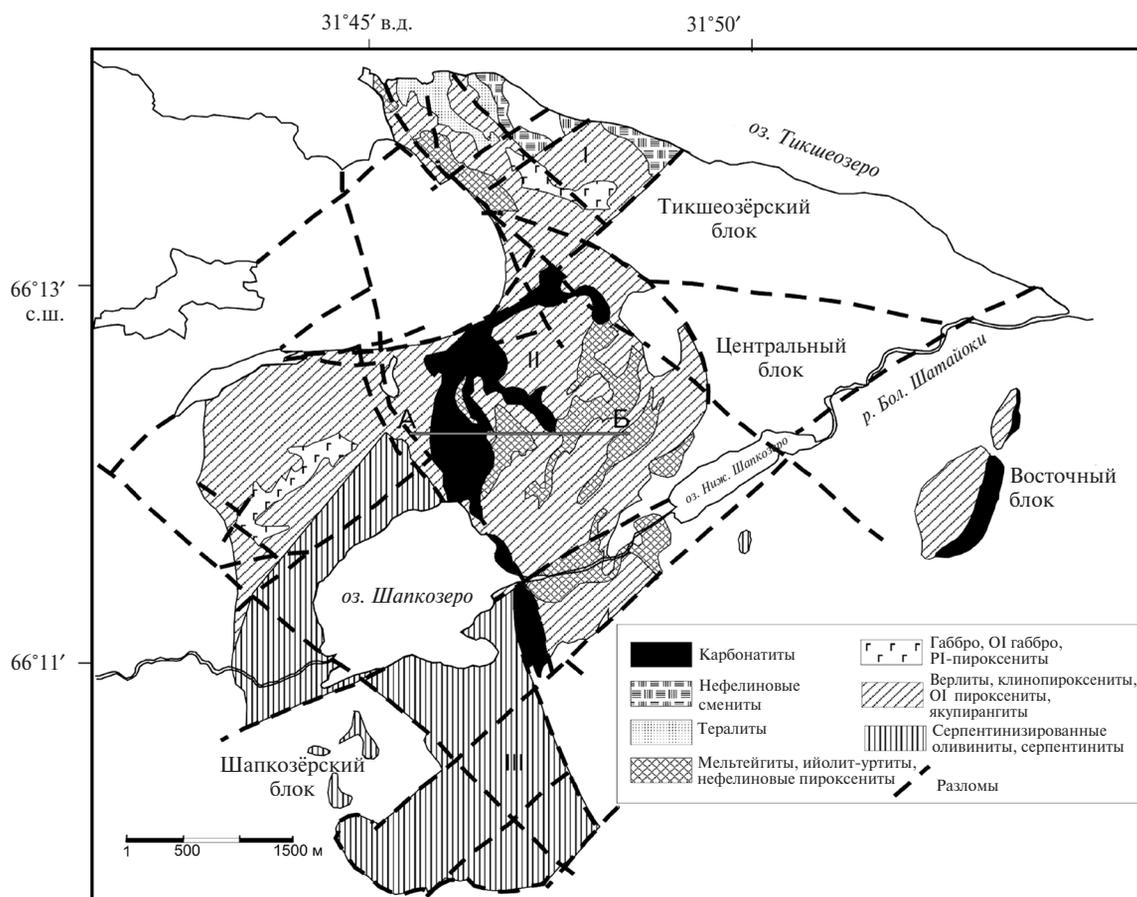


Рис. 1. Схема геологического строения Тикшеозёрского комплекса (по [6] с уточнениями).

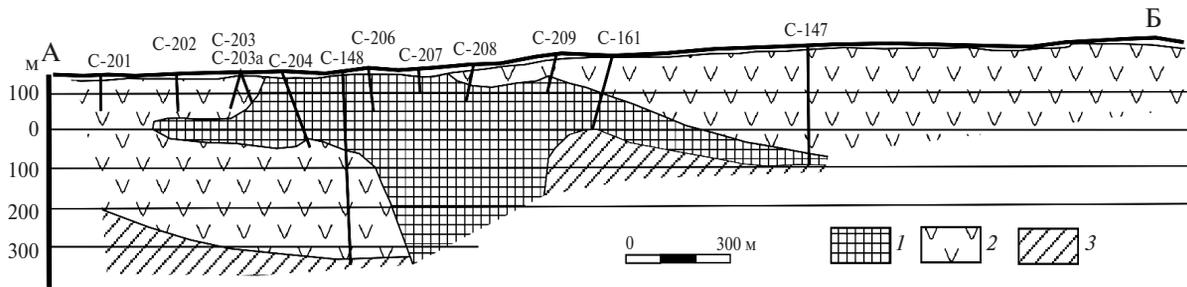


Рис. 2. Поперечный разрез Тикшеозёрского комплекса. (по [6]): 1 — карбонатиты; 2 — ультрамафиты и фойдолиты; 3 — вмещающие архейские гранито-гнейсы.

Поздняя фаза Тикшеозёрского комплекса образована преимущественно кальцитовыми низко-Mg и Fe-карбонатитами, а также варьирующими по составу карбонатно-силикатными породами, обогащёнными Na_2O и Al_2O_3 .

В отличие от большинства ультрамафит-щёлочно-карбонатитовых комплексов, имеющих штокообразное или концентрически-зональное строение, Тикшеозёрский интрузив скорее выглядит как лополит, интродуцированный крупным карбонатитовым телом (рис. 2). В целом ситуация напоминает взаимоотношения между феррогабброидами и сиенитами в сиенит-габбровых комплексах, например, Еletzозёрским (Шарков и др, 2018).

Геохимические особенности изученных пород иллюстрируются на рис. 3. Все породы обогащены крупно-ионными литофильными элементами, тогда как щелочные еще и высокозарядными элементами. Спектры распределения редких земель (REE) характеризуются различной вариабельностью фракционирования. Устанавливается возрастание общего содержания REE от ультрамафитов (19–25 ppm) через ийолит-мельтейгиты (до 380 ppm) к карбонатно-силикатным породам (до 820 ppm) и карбонатитам (до 1260 ppm). Наименее фракционированные спектры REE ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 2,6\text{--}6,5$) наблюдаются в клинопироксенитах и якупирангитах. В фойдолитах это отношение варьирует от 12 до 34. Гораздо более высокое $(\text{La}/\text{Yb})_N$ отношение установлено в карбонатно-силикатных породах и в карбонатитах (26–53). Самое высокое REE фракционирование с наиболее высоким $(\text{La}/\text{Yb})_N$ отношением (54) было найдено в нефелиновом сиените. Во всех породах практически отсутствует Eu-аномалия (Eu^* от 0,8 до 1,2) при резко выраженных отрицательных Zr- и Nb-аномалиях (Nb/Nb^* обычно 0,3–0,7 и до 0,06–0,2 в карбонатитах).

Спектры распределения верлитов и клинопироксенитов комплементарны таковым у мельтейгит-

уртитов (рис. 3). Это может свидетельствовать о том, что ультрамафиты формировались на ранних стадиях становления интрузивов при выделении из исходного расплава (по-видимому, щелочного пикрита) клинопироксен-оливиновых кумулатов, а щелочные породы формировались из более фракционированных расплавов.

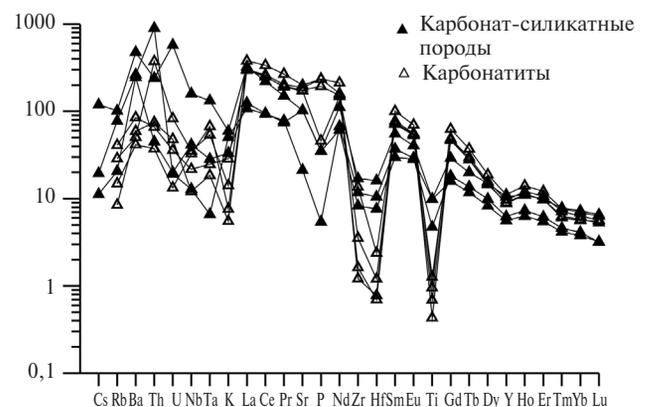
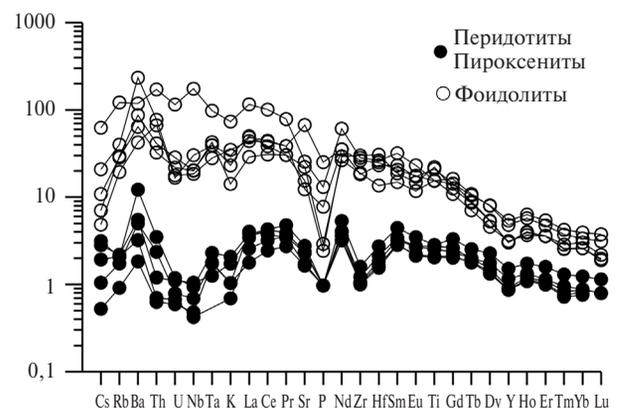


Рис. 3. Спектры распределения редких и редкоземельных элементов в породах Тикшеозёрского комплекса (нормализовано к примитивной мантии). Данные по карбонатитам по [2].

С другой стороны, типоморфной особенностью всех карбонатитовых пород является сильнейшая отрицательная Zr–Hf-аномалия (рис. 3). В то же время отсутствие Zr–Hf-аномалии в ультрамафитах и щёлочных породах свидетельствует об их независимой эволюции, не связанной с карбонатитами.

Судя по изотопным данным, как силикатные породы, так и карбонатиты Тикшеозёрского комплекса также имеют мантийные изотопные характеристики [7]. Начальные изотопные составы в силикатных породах комплекса (ϵNd до + 2,5, $\text{Sr}_i = 0,7020 - 0,7037$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i = 13,69$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i = 14,79$) демонстрируют преобладание мантийного источника исходного ультрамафического расплава (щёлочной пикрит). Мантийное происхождение карбонатитов также подтверждается их изотопными характеристиками: ϵNd до +3 ~+4,5, $\text{Sr}_i = 0,7016 - 0,7020$; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i \sim 15,56$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i \sim 15,12$.

ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, изотопные данные (Sr, Nd и Pb) свидетельствуют о том, что карбонатитовые расплавы произошли из того же мантийного источника, что и ассоциирующиеся с ними силикатные магмы. Вместе с тем геохимические данные по ультрамафит-щёлочным породам комплекса свидетельствуют о том, что они произошли из общей исходной магмы (щёлочного пикрита), тогда как карбонатиты и карбонатно-силикатные породы имеют независимое происхождение.

Согласно современной парадигме [1, 11, 14 и др.], формирование крупных изверженных провинций связано с подъёмом мантийных термохимических плюмов, формирующихся на границе внешнего жидкого ядра и мантии в результате просачивания флюидов ядра в породы вышележащей мантии. Из этого следует, что вещество этих плюмов образовано двумя типами материала: силикатами мантии и “ядерными” флюидами, которые в разных пропорциях могут вовлекаться в процессы плавления в их головных частях.

Изучение связанных с плюмами магматических систем показало, что одни и те же головные части плюмов могут генерировать разные типы первичных расплавов: 1) при адиабатическом плавлении вещества головных частей плюмов и 2) при инконгруэнтном плавлении верхних охлажденных краёв плюмов под влиянием избытка флюидов, просачивавшихся из нижележащих зон адиабатического плавления [5]. Следы инконгруэнтного плавления сохранились

в качестве “расплавных пакетов” (melt-pockets) в ксенолитах щпинелевых лерцолитов в базальтах и базальтах [9, 13 и др.]. Таким образом, последовательность процессов адиабатического и флюидо-зависимого плавления голов мантийных плюмов может обеспечить появление двух различных типов магм.

С таких позиций рассматриваемый комплекс аналогичен габбро-сиенитовым комплексам (интрузивным версиям базальт-трахитовых серий), где сиениты и феррогабброиды разделены “разрывом Дэли” и генетически не связаны с другом. Изучение расплавных пакетов в мантийных ксенолитах в базальтах этих серий показало, что их первичные расплавы (Fe–Ti базальты и трахиты соответственно) были генерированы по этой схеме [5]. В случае Тикшеозёрского комплекса ультрамафиты и фойдолиты, с одной стороны, и карбонатиты, с другой, также имеют независимое происхождение. Это согласуется с находками карбонатитовых и карбонатно-силикатных “расплавных пакетов” в ксенолитах мантийных щпинелевых лерцолитов в кайнозойских базальтах Шпицбергена [13]. По-существу, рассмотренные ассоциации представляют собой бимодальные комплексы наподобие габбро-сиенитовых.

Таким образом, мы полагаем, что формирование родоначальных магм Тикшеозёрского комплекса, как и других ультрамафит-щёлочно-карбонатитовых комплексов, было связано с двухстадийным плавлением головы мантийного плюма: 1) адиабатическое плавление её внутренних частей, приводящее к появлению подщелоченных ультрамафических магм (щёлочных пикритов), фракционная кристаллизация которых продуцирует магмы щёлочного состава; 2) инконгруэнтное плавление верхнего охлажденного края головы мантийного плюма под влиянием богатых CO_2 флюидов, поступавших из зоны адиабатического плавления и приводящего к появлению карбонатитовых магм.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках Базовой темы ИГЕМ РАН (№ 0136–2018–0030).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН Филиал «Гео», 2001, 408 с.
2. Кулешевич Л.В. // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск. Изд-во КарНЦ РАН. 2016. № 18. С. 71–87.
3. Шарков Е.В., Богина М.М. // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2006. Т. 14. № 4. С. 3–27.

4. Шарков Е.В., Беляцкий Б.В., Богина М.М. и др. // Петрология. 2015. Т. 23. № 3. С. 285–307.
5. Шарков Е.В., Богатиков О.А. // ДАН. 2017. Т. 472. № 6. С. 691–696.
6. Щипцов В.В., Бубнова Т.П., Гаранжа А.В. и др. Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН. 2007. № 10. С. 159–170.
7. Belyatsky B.V., Krymsky R.S., Rodionov N.V., et al. // Goldschmidt2017, Abstract 05F-2230. August 2017, P. 13–17.
8. Corfu F., Bayanova T., Shchiptsov V., Frantz N. // Cent. Eur. J. Geosci. 2011. V. 3. № 3. P. 302–308.
9. Downes H. // J. Petrol. 2001. V. 41. P. 233–250.
10. Ernst R.E. Large Igneous Provinces. Cambridge. Cambridge Univ. Press, 2014., 653 p.
11. French S.W., Romanowicz B. // Nature. 2015. V. 525. N7567. P. 95–99.
12. Gill R. Igneous Rocks and Processes. A Practical Guide. Wiley Blackwell, Oxford: 2010. 428 p.
13. Ionov D.A., O'Reily S.Y., Genshaft Y.S., Kopylova M.G. // Contribs Mineral. and Petrol. 1996. V. 125. № 4. P. 375–392.
14. Maruyama S. // J. Geol. Soc. Jap. 1994. V. 100. P. 24–49.
15. Woolley A.R., Church J.A. // Lithos. 2005. V. 85. P. 1–14.

**ULTRAMAFIC-ALKALINE-CARBONATITE COMPLEXES AS A RESULT
OF TWO-STAGE MELTING OF MANTLE PLUME: EVIDENCE FROM
THE MID-PALEOPROTEROZOIC TIKSHEOZERO INTRUSION,
NORTHERN KARELIA, RUSSIA**

**E. V. Sharkov¹, A. V. Chistyakov¹, M. M. Bogina¹, Academician of the RAS O. A. Bogatikov¹,
V. V. Shchiptsov², B. V. Belyatsky³, P. V. Frolov²**

¹*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

²*Institute of Geology of the Karelian Branch of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russian Federation*

³*Federal State Budgetary Enterprise "A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute",
Saint-Petersburg, Russian Federation*

Received February 18, 2019

Tiksheozero ultramafic-alkaline-carbonatite intrusive complex, like numerous carbonatite-bearing complexes of similar composition, is a part of large igneous province, related to the ascent of thermochemical mantle plume. Our geochemical and isotopic data evidence that ultramafites and alkaline rocks are joined by fractional crystallization, whereas carbonatitic magmas has independent origin. We suggest that origin of parental magmas of the Tiksheozero complex, as well as other ultramafic-alkaline-carbonatite complexes, was provided by two-stage melting of the mantle-plume head: (1) adiabatic melting of its inner part, which produced moderately-alkaline picrites, which fractional crystallization led to appearance of alkaline magmas, and (2) incongruent melting of the upper cooled margin of the plume head under the influence of CO₂-rich fluids that arrived from underlying zone of adiabatic melting gave rise to carbonatite magmas

Keywords: ultramafic alkaline-carbonatite complex, large igneous province, mantle plume, carbonatite fluid, melted packets, adiabatic and incongruent melting.