



GEOCHEMICAL FEATURES OF DIKE AILLIKITES AND ALKALINE ROCKS OF THE BOLSHETAGNINSKY MASSIF (URIK-IYA GRABEN, EAST SAYAN REGION)

V.B. Savelieva , E.P. Bazarova , Yu.V. Danilova , B.S. Danilov

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT. The ICP-MS determinations have been made on microelement content of ~650–640 Ma ultramafic lamprophyre-aillikite dikes and alkaline silicate rocks and carbonatites from the Bolshetagninsky ijolite-syenite massif, spatially overlapped in the northern Urik-Iya graben on the southwestern margin of the Siberian craton. There have been identified two types of spectra of microelement distribution, typical of the Bolshetagninsky massif aillikites and alkaline silicate rocks, respectively; both types of spectra demonstrate significant (more than two orders of magnitude) enrichment in most incompatible elements relative to the primitive mantle. Aillikites have tilt-left distribution spectra of rare elements with Rb, K, Pb, Sr-P, Zr-Hf, \pm U minimums and less-pronounced Y minimum. Multi-element spectra of ijolites-melteigites are characterized by Th, Ta, Pb, Hf, \pm Zr, \pm Ti minimums which is also reflected in nepheline syenite and carbonatite spectra. The Bolshetagninsky massif aillikites and alkaline rocks differ also in Nb/Ta, Zr/Hf, Th/Nb, Th/U ratios. Geochemical differences imply that the parental melts of dike aillikites and alkaline rocks are derived from different mantle sources.

KEYWORDS: Urik-Iya graben; aillikites; ijolites; rare elements

FUNDING: The study was funded by Russian Science Foundation (RSF-18-17-00101). The research activities involved work equipment of Shared Research Facilities "Geodynamics and Geochronology" of the Institute of the Earth's Crust SB RAS, as part of the grant 075-15-2021-682.

SHORT COMMUNICATION

Received: December 6, 2021

Revised: February 1, 2022

Accepted: February 14, 2022

Correspondence: Yulia V. Danilova, jdand@crust.irk.ru

FOR CITATION: Savelieva V.B., Bazarova E.P., Danilova Yu.V., Danilov B.S., 2022. Geochemical Features of DiKE Aillikites and Alkaline Rocks of the Bolshetagninsky Massif (Urik-Iya Graben, East Sayan Region). *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2s), 0614. doi:10.5800/GT-2022-13-2s-0614

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДАЙКОВЫХ АЙЛЛИКИТОВ И ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД БОЛЬШЕТАГНИНСКОГО МАССИВА (УРИКСКО-ИЙСКИЙ ГРАБЕН, ВОСТОЧНОЕ ПРИСАНЬЕ)

В.Б. Савельева, Е.П. Базарова, Ю.В. Данилова, Б.С. Данилов

Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

АННОТАЦИЯ. Методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой определены содержания микроэлементов в дайках ультрамафитовых лампрофиров (айлликитов), щелочных силикатных породах и карбонатитах Большеэтагнинского ийолит-сиенит-карбонатитового массива, имеющих близкий возраст около 650–640 млн лет и пространственно совмещенных в северной части Урикско-Ийского грабена на юго-западной окраине Сибирского кратона. Выявлены два типа спектров распределения микроэлементов, присущие, соответственно, айлликитам и силикатным щелочным породам Большеэтагнинского массива; спектры обоих типов демонстрируют значительное (более чем на два порядка) обогащение наиболее несовместимыми элементами относительно примитивной мантии. Айлликиты имеют наклонные вправо спектры распределения редких элементов с минимумами по Rb, K, Pb, Sr-P, Zr-Hf, \pm U и менее выраженным минимумом по Y. Мультиэлементные спектры ийолитов-мельтейгитов характеризуются минимумами по Th, Ta, Pb, Hf, \pm Zr, \pm Ti, что находит отражение и на спектрах нефелиновых сиенитов и карбонатитов. Айлликиты и щелочные породы Большеэтагнинского массива отличаются между собой также по отношениям Nb/Ta, Zr/Hf, Th/Nb, Th/U. Геохимические различия позволяют предполагать, что родительские расплавы дайковых айлликитов и щелочных пород Большеэтагнинского массива имели разные мантийные источники.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Урикско-Ийский грабен; айлликиты; ийолиты; редкие элементы

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (РФФ-18-17-00101). В работе задействовалось оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН в рамках гранта № 075-15-2021-682.

1. ВВЕДЕНИЕ

Период примерно от 730 до 570 млн лет назад знаменовался широким проявлением щелочного мантийного магматизма в южной (в современных координатах) части Сибирского кратона [Yarmolyuk et al., 2005; Khromova et al., 2020]. В пределах раннепротерозойского Урикско-Ийского грабена на юго-западной окраине кратона в это время произошло становление зиминского магматического комплекса. Этот комплекс включает в себя тесно пространственно ассоциирующие карбонатиты, сиениты, нефелиновые сиениты, ийолиты, уртиты, мельтейгиты, слагающие три массива – Белозиминский, Среднезиминский и Большеэтагнинский, а также ультрамафитовые лампрофиры, кимберлитоподобные породы, пикриты, нефелиниты, выполняющие дайки, жилы и трубки. Возраст этих пород укладывается в интервал от 650 до 620 млн лет [Savelieva et al., 2021; Khromova et al., 2020; Yarmolyuk et al., 2005; Ashchepkov et al., 2020; Doroshkevich et al., 2016; Salnikova et al., 2019]. С целью геохимической типизации продуктов мантийного магматизма и выяснения геохимических особенностей мантийных источников был изучен химический состав силикатных щелочных пород и карбонатитов Большеэтагнинского массива и айлликитов – наиболее распространенных дайково-жильных образований комплекса.

2. МЕТОДЫ

Анализы пород были выполнены в ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН. Определение главных

компонентов проводилось традиционным химическим методом («мокрая» химия), редких элементов – методом ICP-MS аналитиком С.В. Пантеевой по методике [Panteeva et al., 2003].

3. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Большеэтагнинский массив имеет зонально-кольцевое строение, обусловленное последовательным формированием ийолитов-мельтейгитов, нефелиновых и субщелочных сиенитов, кальцитовых и анкерит-кальцитовых карбонатитов. Особенностью массива является широкое участие в его строении субщелочных калиево-полевошпатовых сиенитов.

Наиболее меланократовыми щелочными породами массива являются ийолиты и более редкие мельтейгиты. Количество кальцита в породах варьируется от 10 до 40 %. В мельтейгите главными породообразующими минералами являются диопсид-геденбергит-эгириновый клинопироксен и кальцит, второстепенными – серицитизированный нефелин, калиевый полевой шпат, титаномагнетит, титанистый гранат, флогопит и магнезиальный биотит ($X_{Mg}=0.66-0.83$). Ийолиты сложены измененным нефелином (30–35 %), клинопироксеном (30–35 %), титанистым андрадитом (20–25 %), кальцитом, апатитом. Нефелиновые сиениты имеют варьирующийся минеральный состав, что обусловлено разным количественным соотношением серицитизированного нефелина (20–50 %), калиевого полевого шпата (10–35 %), клинопироксена – титанистого авгита и диопсид-геденбергита (0–25 %), биотита (5–25 %),

титанистого андрадита (до 20 %), кальцита (до 10 %); акцессорные минералы представлены титаномагнетитом, апатитом, рутилом и др. Кальцитовые карбонаты содержат апатит, магнетит, гематит, пиррохлор, иногда доломит, альбит, кварц, эгирин.

По химическому составу наиболее меланократовые ийолиты-мельтейгиты являются ультраосновными миаскитовыми фойдитами: $\text{SiO}_2=31.0-36.1$ мас. %, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=3.8-6.8$ мас. %, $\text{Ca}=0.38-0.73$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=0.03-0.83$, Mg\# 0.34–0.48, с высоким содержанием (мас. %) CaO (20.0–21.6), $\text{FeO}_{\text{общ}}$ (9.5–10.3) и умеренным – TiO_2 (1.5–2.2), P_2O_5 (0.8–1.3), F (2800–5800 ppm).

Дайки и жилы айлликитов прорывают отложения PR_1 и породы массивов. Айлликиты характеризуются присутствием вкрапленников серпентинизированного оливина Fo_{82-88} , флогопита ($X_{\text{Mg}}=0.79-0.82$), титаномагнетита. Основная масса сложена оливином, флогопитом, первично-магматическим кальцитом (10–40 %),

диопсидом, титан-авгитом ($\text{TiO}_2=2.4-5.1$ мас. %, $\text{Al}_2\text{O}_3=3.3-8.7$ мас. %), хромшпинелидами ($\text{Cr}_2\text{O}_3=15-40$ мас. %), титаномагнетитом, перовскитом, апатитом и др. В отдельных жилах присутствуют щелочные полевые шпаты, керсутит и эгирин. Айлликитам присуще низкое содержание (мас. %) SiO_2 (21.1–32.9), высокое – CO_2 (6.4–21.3), TiO_2 (2.3–7.0) и щелочей (1.9–4.4) при резком преобладании калия над натрием ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=0.01-0.80$); Mg\# варьируется в интервале 0.60–0.74.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты анализов ICP-MS приведены в табл. 1 и показаны в виде мультиэлементных спектров на рис. 1. Айлликиты, и щелочные породы массива характеризуются значительной – более чем на два порядка – обогащенностью относительно примитивной мантии наиболее несовместимыми элементами. Дайки айлликитов имеют сходные, наклоненные вправо, спектры

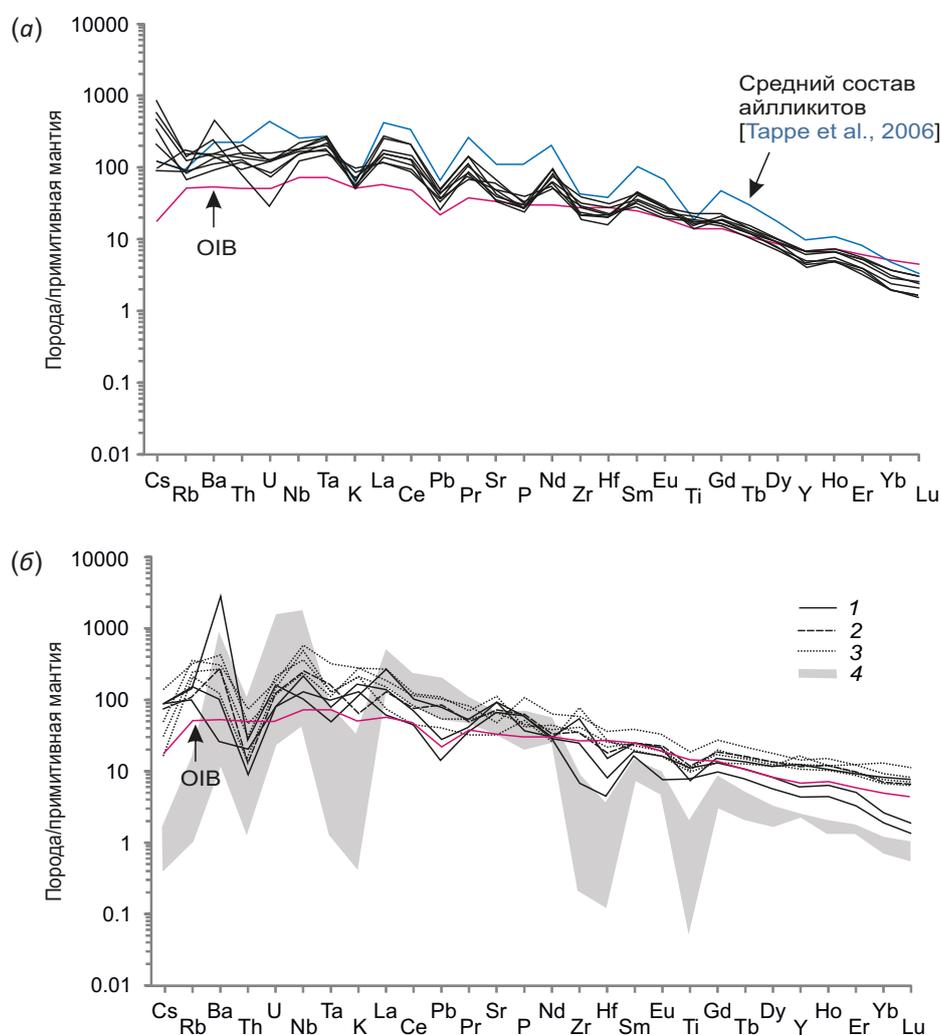


Рис. 1. Мультиэлементные спектры айлликитов (а) и пород Большетагнинского массива (б).

1 – мельтейгит и ийолиты; 2 – уртит; 3 – нефелиновые сиениты; 4 – поле состава карбонатитов. Состав OIB по [Sun, McDonough, 1989]; значения для примитивной мантии по [McDonough, Sun, 1995].

Fig. 1. Multi-element spectra of aillikites (a) and rocks of the Bol'shetagninsky massif (b).

1 – melteigite and ijolites; 2 – urtite; 3 – nepheline syenites; 4 – carbonatite composition field. OIB composition after [Sun, McDonough, 1989]; primitive mantle values after [McDonough, Sun, 1995].

распределения редких элементов с минимумами по Rb, K, Pb, Sr-P, Zr-Hf, присущими айлликитам (Северо-Атлантический кратон [Tappe et al., 2006]), минимумом по U и менее выраженным по Y (рис. 1, а). По сравнению с OIB айлликиты, в целом, обогащены LILE, Th, U, Nb, Ta, LREE и обеднены наиболее тяжелыми REE. По сравнению со средним составом айлликитов [Tappe et al., 2006], айлликиты Присяянья имеют более низкие концентрации редкоземельных элементов, U, Sr, P, Y, а также отличаются отчетливым минимумом по U и отсутствием (или очень слабым проявлением) минимума по титану.

Наиболее меланократовые породы Большетагнинского массива по сравнению с OIB (рис. 1, б) характеризуются обогащенностью наиболее несовместимыми элементами, обедненностью наиболее тяжелыми REE и наличием на мультиэлементных спектрах, наряду с минимумом по Pb, минимумов по Th, Ta, Hf ±Zr и Ti. Бариевая аномалия на спектре мельтейгита обусловлена присутствием в пробе вторичного гиалофана. Уртит характеризуется близким с мельтейгит-ийолитами уровнем обогащенности редкими элементами, но на его спектре выражен минимум по K. В нефелиновых сиенитах, в целом, выше содержание Rb, Ba, K, Nb, Ta, Th, U, Hf, Y и REE, но ниже Cs (табл. 1; рис. 1, б). В кальцитовых карбонатитах содержание высокозарядных элементов, за исключением REE, широко варьируется, но в целом карбонатиты обеднены Zr, Hf, Ti, средними

и тяжелыми REE и Y по сравнению с силикатными щелочными породами. Среднее содержание Ba (1900 ppm) и Sr (915 ppm) близко к таковому в нефелиновых сиенитах (соответственно 1847 и 1294) (табл. 1). По сравнению с сиенитами карбонатиты обеднены Cs, Rb, K, но содержат больше Pb, La, Ce. Особенности редкоземельных спектров ийолитов и мельтейгита – минимумы по Th, Ta, Pb, Hf, ±Zr, ±Ti – проявлены в той или иной степени на спектрах нефелиновых сиенитов и карбонатитов (рис. 1, б).

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Сходные мультиэлементные спектры и узкий диапазон содержания редких элементов в айлликитах позволяют предполагать, что исходным для них являлся один и тот же слабо дифференцированный силикатно-карбонатный расплав. Глубокий минимум по K на спектрах айлликитов и обедненность наиболее тяжелыми редкоземельными элементами указывают на присутствие флогопита и граната в источнике расплава. Отличия спектров айлликитов Присяянья от усредненного спектра айлликитов п-ова Лабрадор [Tappe et al., 2006], возможно, отражают различия в минеральном составе источников.

Сходство мультиэлементных спектров мельтейгит-ийолитов и нефелиновых сиенитов в Большетагнинском массиве показывает, что исходным для этих пород был силикатно-карбонатный расплав, претерпевший

Таблица 1. Редкие элементы (ppm), K₂O, P₂O₅, TiO₂ (мас. %) в щелочных силикатных породах и карбонатитах Большетагнинского массива и дайках айлликитов

Table 1. Rare elements (ppm), K₂O, P₂O₅, TiO₂ (wt. %) in alkaline rocks and aillikite dikes of the Bolshetagninsky massif

№ п/п	№ пробы	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
1	119/19	87.5	1857	18.3	68.8	67.1	1.8	20807	174	170	13.1	37.7	6.5	1.2	5.3	0.76	3.7	0.66	1.4
2	25/19	60.4	1351	54.4	567	86.4	1.9	168	39.6	73.9	9.0	37.9	10.1	3.3	8.4	1.4	7.8	1.6	4.0
3	K35/19	92.1	1807	25.2	255	144	1.9	666	88.1	114	10.9	36.1	7.5	2.5	7.1	1.1	5.5	0.95	2.2
4	105/19	66.0	1425	48.8	362	167	1.6	1889	85.1	126	12.5	42.8	9.9	3.5	10.2	1.6	9.3	1.8	4.3
5	106/19	221	938	62.1	615	384	1.1	1989	119	189	20.8	79.3	16.6	5.0	14.9	2.1	11.8	2.2	5.3
6	121/19	197	2254	53.5	356	155	3.1	2800	175	202	17.5	55.2	10.1	3.2	10.7	1.5	8.9	1.8	4.1
7	122/19	150	1358	45.9	438	240	0.68	1790	97.9	138	13.5	47.4	9.3	3.0	9.5	1.5	8.4	1.5	3.9
8	K23/19	132	628	70.9	848	334	0.35	809	46.4	72.5	8.1	31.2	7.8	2.5	7.3	1.2	8.0	1.8	5.5
9	1/19	0.60	657	10.5	89.5	1184	0.03	85	108	139	12.1	32.1	3.2	0.69	1.8	0.21	1.1	0.20	0.58
10	14/19	10.3	833	10.4	2.1	54.6	0.01	107	329	376	29.1	70.4	6.1	1.4	4.8	0.50	2.0	0.30	0.63
11	113/19	1.4	1254	9.9	5.8	29.7	0.03	5505	286	284	24.4	59.7	5.4	0.88	3.8	0.41	2.0	0.30	0.76
12	17/18	91.1	1272	26.7	277	143	11.9	1021	188	368	37.8	121	18.2	4.3	10.6	1.4	6.4	1.0	2.2
13	26/18	70.2	755	28.0	327	109	9.7	1009	105	211	23.0	82.4	14.7	3.8	9.6	1.3	6.2	1.1	2.5
14	55/18	53.2	649	20.4	240	119	2.6	3106	114	245	29.9	106	19.1	4.3	12.6	1.4	5.9	0.87	1.7
15	97/18	40.0	672	19.8	236	98.1	7.0	611	89.7	184	22.2	78.5	14.3	3.4	9.0	1.1	5.0	0.76	1.7
16	105/18	52.6	975	26.9	397	98.9	1.9	735	106	219	26.8	95.8	17.5	4.3	11.7	1.5	6.5	1.0	2.1
17	18/19	106	1215	18.5	294	122	2.1	904	78.8	151	17.5	66.5	11.3	3.0	2.9	1.0	4.6	0.72	1.6
18	110/18	81.8	971	26.7	228	82.5	17.4	1597	76.6	154	18.9	67.3	12.7	3.2	8.9	1.2	6.0	1.0	2.3
19	53-06/18	49.3	802	17.6	195	120	4.5	890	169	358	36.4	124	17.2	4.3	10.3	1.2	5.4	0.77	1.4

Таблица 1. (продолжение)

Table 1. (continued)

№ п/п	№ пробы	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Nb/Ta	Zr/Hf	Th/U	Th/Nb	Ce/Pb	1000* Pr/Sr	La/Yb
1	119/19	0.17	0.83	0.09	1.2	1.8	11.5	2.0	3.2	3.4	0.76	1.57	38	56	0.6	0.03	15	7	211
2	25/19	0.63	3.7	0.51	4.3	3.7	2.0	1.6	1.6	3.71	1.26	1.48	24	133	1.0	0.02	36	7	11
3	K35/19	0.23	1.1	0.12	2.3	2.9	4.1	0.69	1.6	4.84	1.24	2.20	50	112	0.4	0.005	28	6	79
4	105/19	0.55	3.0	0.41	5.1	6.1	13	1.0	2.5	1.86	1.32	2.43	28	72	0.4	0.01	10	9	28
5	106/19	0.69	4.1	0.56	10.1	12.0	15.3	5.8	3.6	8.17	2.23	3.66	32	61	1.6	0.02	12	22	29
6	121/19	0.57	3.3	0.48	6.2	3.9	16.4	3.5	2.4	7.92	0.85	2.03	40	58	1.5	0.02	12	8	53
7	122/19	0.49	3.0	0.42	7.0	4.6	7.8	2.3	4.3	6.05	0.92	2.16	52	63	0.5	0.01	18	10	33
8	K23/19	0.84	5.7	0.76	7.7	4.5	6.0	1.1	3.0	6.13	1.07	1.90	75	110	0.4	0.003	12	13	8
9	1/19	0.08	0.52	0.07	0.94	2.8	7.5	1.7	33	0.01	1.47	0.37	420	95	0.1	0.001	18	18	209
10	14/19	0.06	0.29	0.04	0.03	0.12	20.5	0.11	0.55	0.90	0.40	0.04	473	61	0.2	0.002	18	35	1120
11	113/19	0.09	0.41	0.06	0.08	0.05	29.7	6.8	0.46	0.08	0.58	0.01	653	70	15	0.23	10	19	690
12	17/18	0.28	1.3	0.16	6.0	9.7	6.3	16.4	2.3	1.80	0.62	2.83	15	46	7.1	0.11	58	30	139
13	26/18	0.28	1.6	0.21	7.5	6.2	3.7	10.7	2.4	1.95	0.61	3.25	18	44	4.4	0.10	57	30	66
14	55/18	0.18	0.87	0.11	5.7	10.1	6.1	12.0	2.6	1.46	0.47	4.50	12	42	4.7	0.10	40	46	132
15	97/18	0.19	1.0	0.14	6.0	8.0	6.5	9.4	1.7	1.40	0.55	4.18	12	39	5.6	0.10	28	33	86
16	105/18	0.25	1.3	0.17	8.7	7.0	5.1	10.5	1.4	1.60	0.54	3.01	14	45	7.5	0.11	43	28	84
17	18/19	0.16	0.83	0.11	6.3	7.7	5.2	7.2	2.4	2.32	0.68	3.62	16	47	3.0	0.06	29	14	94
18	110/18	0.28	1.6	0.20	5.7	5.7	4.7	6.3	0.56	2.81	0.80	3.66	14	40	11	0.08	32	19	48
19	53-06/18	0.17	0.84	0.11	4.3	9.4	7.3	12.8	3.3	1.39	0.53	3.31	13	46	3.9	0.11	49	45	202

Примечание. 1–11 – Большетагнинский массив: 1 – мельтейгит, 2, 3 – ийолиты, 4 – уртит, 5–8 – нефелиновые сиениты, 9–11 – кальцитовые карбонатиты; 12–19 – айлликиты.

Note. 1–11 – Bolshetagninsky massif: 1 – melteigite, 2, 3 – ijolites, 4 – urtite, 5–8 – nepheline syenites, 9–11 – calcite carbonatites; 12–19 – aillikites.

фракционную дифференциацию, в процессе которой сначала кристаллизовались богатые клинопироксеном мельтейгит-ийолиты, а остаточный расплав обогащался K, Rb, Ba, Th, U, Nb, Ta, Zr, Hf, REE и обеднялся Cs. Спектры карбонатитов, в общем, сходны со спектрами силикатных щелочных пород, что указывает на их вероятную генетическую связь. Обособление карбонатного расплава могло происходить либо в процессе кристаллизационной дифференциации силикатно-карбонатного расплава, либо в результате ликвации, в последнем случае карбонатный расплав должен обогащаться Ba и Sr [Veksler et al., 2012]. Мы не располагаем представительной выборкой образцов, но содержание Sr и Ba в карбонатитах на уровне такового в нефелиновых сиенитах свидетельствует скорее в пользу первой модели.

Отношения Nb/Ta и Th/Nb в айлликитах (табл. 1) в общем близки к таковым в OIB [Sun, McDonough, 1989] (соответственно 18; 0.08), а Zr/Hf и Th/U несколько выше, чем в OIB (36; 3.9). Щелочные породы и карбонатиты Большетагнинского массива характеризуются более высокими отношениями Nb/Ta и Zr/Hf, а отношения Th/Nb, Ce/Pb, Th/U в них (за исключением пробы карбонатита 113/19) резко понижены. В нефелин-содержащих породах также ниже отношение Pr/Sr.

Наряду с различиями мультиэлементных спектров эти данные указывают на отсутствие генетической связи между дайковыми айлликитами и силикатными щелочными породами массива.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокие концентрации несовместимых элементов в айлликитах и щелочных породах Большетагнинского массива показывают, что исходными для тех и других были расплавы, образовавшиеся при плавлении обогащенной мантии [Pilet, 2015]. В то же время геохимические различия двух групп пород позволяют предполагать, что их родительские расплавы имели разные мантийные источники.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность с.н.с. ИГГД РАН В.М. Саватенкову и анонимному рецензенту за конструктивные замечания, позволившие существенно улучшить качество статьи.

8. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

9. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Ashchepkov I., Zhmodik S., Belyanin D., Kiseleva O., Medvedev N., Travin A., Yudin D., Karmanov N., Downes H., 2020. Aillikites and Alkali Ultramafic Lamprophyres of the Beloziminsky Alkaline Ultrabasic-Carbonatite Massif: Possible Origin and Relations with Ore Deposits. *Minerals* 10 (5), 404. <http://doi.org/10.3390/min10050404>.
- Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Izbrodin I.A., Ripp G.S., Khromova E.A., Posokhov V.F., Travin A.V., Vladykin N.V., 2016. Stable Isotope Composition of Minerals in the Belaya Zima Plutonic Complex, Russia: Implications for the Sources of the Parental Magma and Metasomatizing Fluids. *Journal of Asian Earth Sciences* 116, 81–96. <http://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.11.011>.
- Khromova E.A., Doroshkevich A.G., Izbrodin I.A., 2020. Geochemical and Sr-Nd-Pb Isotopic Characteristics of Alkaline Rocks and Carbonatite of the Belaya Zima Massif (Eastern Sayan). *Geosphere Research* 1, 33–55 (in Russian) [Хромова Е.А., Дорощкевич А.Г., Избродин И.А. Геохимическая и Sr-Nd-Pb изотопная характеристики щелочных пород и карбонатитов Белозиминского массива (Восточный Саян) // Геосферные исследования. 2020. № 1. С. 33–55]. <http://doi.org/10.17223/25421379/14/3>.
- McDonough W.F., Sun S.-S., 1995. The Composition of the Earth. *Chemical Geology* 120 (3–4), 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4).
- Panteeva S.V., Gladkochoub D.P., Donskaya T.V., Markova V.V., Sandimirova G.P., 2003. Determination of 24 Trace Elements in Felsic Rocks by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry after Lithium Metaborate Fusion. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 58 (2), 341–350. [http://doi.org/10.1016/S0584-8547\(02\)00151-9](http://doi.org/10.1016/S0584-8547(02)00151-9).
- Pilet S., 2015. Generation of Low-Silica Alkaline Lavas: Petrological Constraints, Models, and Thermal Implications. In: G.R. Foulger, M. Lustrino, S.D. King (Eds), *The Interdisciplinary Earth: A Volume in Honor of Don L. Anderson*. Geological Society of America Special Papers, Vol. 514, p. 281–304. [http://doi.org/10.1130/2015.2514\(17\)](http://doi.org/10.1130/2015.2514(17)).
- Salnikova E.B., Chakhmouradian A.R., Stifeeva M.V., Reguir E.P., Kotov A.B., Gritsenko Y.D., Nikiforov A.V., 2019. Calcic Garnets as a Geochronological and Petrogenetic Tool Applicable to a Wide Variety of Rocks. *Lithos* 338–339, 141–154. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.03.032>.
- Savelieva V.B., Yudin D.S., Danilova Yu.V., Bazarova E.P., Danilov B.S., 2021. The ^{39}Ar - ^{40}Ar Geochronological Data for K-rich ultramafic magmatism of the Urik-Iya Graben (South-western of the Siberian Craton). In: *Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from Ocean to Continent)*. Proceedings of Scientific Meeting (October 19–22, 2021). Iss. 19. IEC SB RAS, Irkutsk, p. 205–207 (in Russian) [Савельева В.Б., Юдин Д.С., Данилова Ю.В., Базарова Е.П., Данилов Б.С. Результаты геохронологического ^{39}Ar - ^{40}Ar изучения калиевого ультраосновного магматизма Урикско-Ийского грабена (юго-западная часть Сибирского кратона) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научного совещания (19–22 октября 2021 г.). ИЗК СО РАН, 2021. Вып. 19. С. 205–207].
- Sun S.-S., McDonough W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society of London Special Publications* 42 (1), 313–345. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>.
- Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Heaman L.M., Kjarsgaard B.A., Romer R.L., Stracke A., Joyce N., Hoefs J., 2006. Genesis of Ultramafic Lamprophyres and Carbonatites at Aillik Bay, Labrador: a Consequence of Incipient Lithospheric Thinning beneath the North Atlantic Craton. *Journal of Petrology* 47 (7), 1261–1315. <https://doi.org/10.1093/petrology/egl008>.
- Veksler I.V., Dorfman A.M., Dulski P., Kamenetsky V.S., Danyushevsky L.V., Jeffries T., Dingwell D.B., 2012. Partitioning of Elements between Silicate Melt and Immiscible Fluoride, Chloride, Carbonate, Phosphate and Sulfate Melts, with Implications to the Origin of Natrocarbonatite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 79, 20–40. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.11.035>.
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Salnikova E.B., Nikiforov A.V., Kotov A.B., Vladykin N.V., 2005. Late Riphean Rifting and Laurasia Break-Up: Data of Geochronological Studies of Ultrabasic Alkaline Complexes in the Southern Framework of the Siberian Craton. *Doklady Earth Sciences* 404 (3), 400–406 (in Russian) [Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Сальникова Е.Б., Никифоров А.В., Котов А.Б., Владыкин Н.В. Позднерифейский рифтогенез и распад Лавразии: данные геохронологических исследований ультраосновных щелочных комплексов в южном обрамлении Сибирского кратона // Доклады АН. 2005. Т. 404. № 3. С. 400–406].