

УДК 550.93+552.13+552.331.4

ПАЛЕОЗОЙСКИЙ ЭТАП ФОРМИРОВАНИЯ ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД МАССИВА БОГДО, АРКТИЧЕСКАЯ СИБИРЬ (ПО ДАННЫМ $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -ДАТИРОВАНИЯ)

© 2024 г. С. М. Жмодик^{1,*}, А. В. Травин¹, Е. В. Лазарева¹, Д. С. Юдин¹,
Д. К. Белянин¹, А. В. Толстов¹, Н. Н. Добрецов¹

Представлено академиком РАН Н.П. Похиленко 01.08.2023 г.

Поступило 01.08.2023 г.

После доработки 03.10.2023 г.

Принято к публикации 11.10.2023 г.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -методом определен возраст калийсодержащих минералов из высоко-калиевых нефелиновых сиенитов (рисчорритов), либнеритовых и карбонатизированных нефелиновых сиенитов, а также псевдолейцитовых сиенитов щелочного массива Богдо (Арктическая Сибирь). В результате обобщения и анализа данных $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования на сводной термохронологической диаграмме для минералов из пород массива Томтор, кимберлитовой трубки Удачная-Восточная и щелочных пород массива Богдо выявлена полихронность формирования щелочных комплексов томторского типа на палеозойском этапе. По изотопным данным реконструируется сложная, трехэтапная история становления пород массива Богдо с проявлением позднедевонского-раннекарбонного этапа — наиболее продуктивного на редкометалльно-редкоземельное оруденение. Девонский период формирования массивов Томтор и Богдо связывается с воздействием Вилуйского плюма на восточный край Сибирского кратона. Близкий возрастной интервал фиксируется при формировании пород Кольской щелочной провинции.

Ключевые слова: породы и минералы щелочного массива Богдо, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -метод датирования, термохронология

DOI: 10.31857/S2686739724020011

ВВЕДЕНИЕ

В Арктической зоне Сибири восточнее Анабарского щита известно несколько выявленных и прогнозируемых по геофизическим данным массивов щелочных пород с карбонатами томторской группы: Томтор, Богдо, Промежуточный, Буолкала, Чюэмпэ, Уэле, образующих крупную Уджинскую щелочно-карбонатитовую магматическую провинцию ([1–4] и др.). Вмещающими щелочные массивы породами являются известняки, доломиты, терригенные метаморфизованные породы неопротерозойского (NP_1 – NP_3) возраста, которые перекрываются пермского возраста континентальными, юрскими морскими и четвертичными рыхлыми отложениями. Положение массивов контролируется меридиональной рифтогенной структурой (“Уджинским сводом”) с пересекающими ее

трансформными разломами. На теневых моделях рельефа и космических спектрзональных снимках отчетливо выявляется, что положение Томторского и Богдинского массивов ограничено кольцевыми структурами, которые осложнены зонами разломов субширотного (Томторский массив) и северо-восточного направления (массив Богдо). В магнитном и гравитационном полях щелочные массивы выделяются положительными аномалиями. Массив Богдо расположен на 20–40 км севернее наиболее крупного Томторского массива щелочных пород и карбонатитов и является одним из относительно слабо изученных объектов, вскрытых скважинами колонкового бурения. Выяснение времени и последовательности формирования массивов Уджинской щелочной провинции и пород внутри массивов, а также комплексный сравнительный анализ хронологических и минералого-геохимических данных являются важными для выяснения условий возникновения и прогноза редкометалльно-редкоземельного оруденения томторского типа.

В настоящей работе для измененных в разной степени щелочных пород массива Богдо (рис. 1),

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева
Сибирского Отделения Российской Академии наук,
Новосибирск Россия

*E-mail: zhmodik@igm.nsc.ru

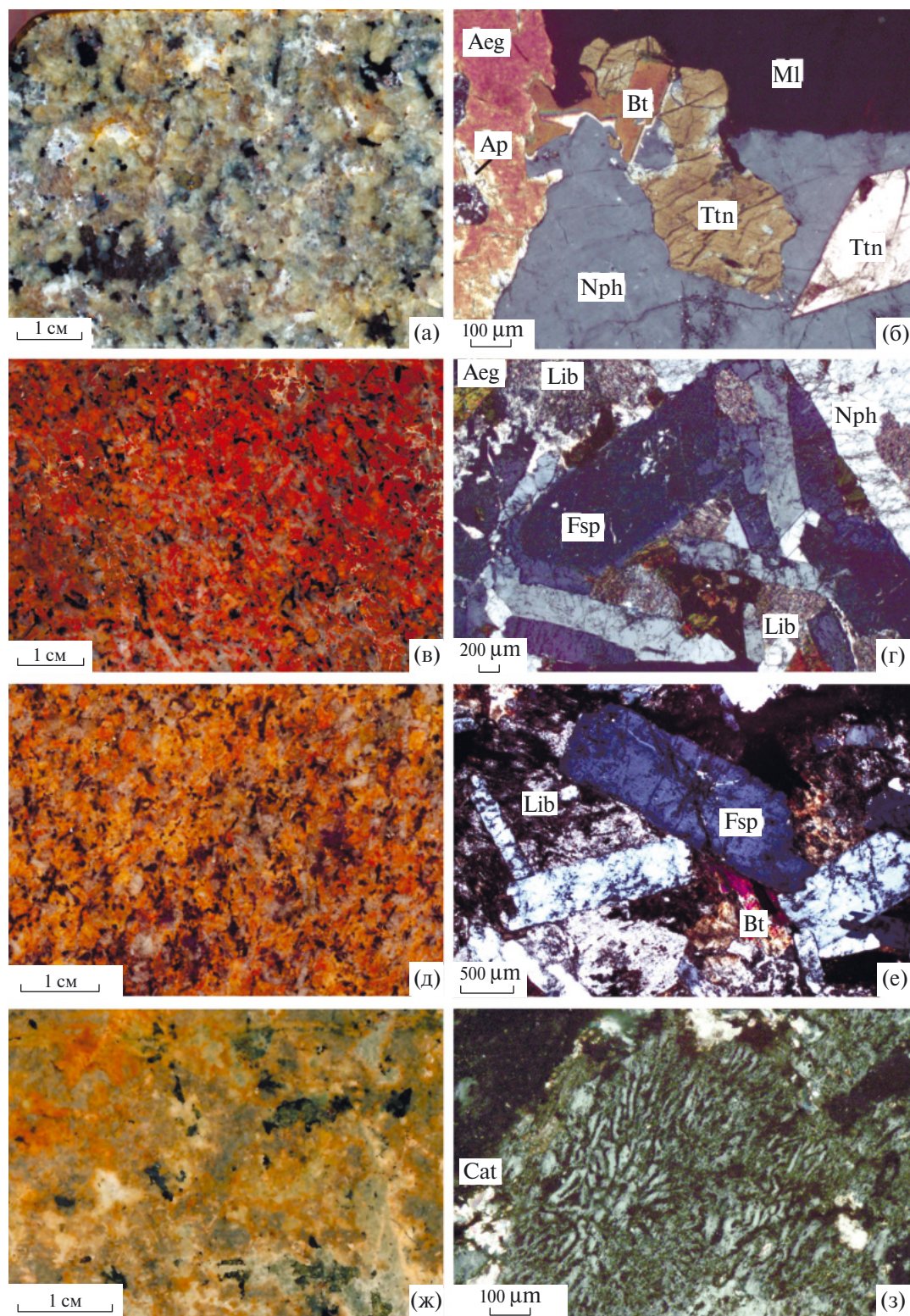


Рис. 1. Общий вид (а, в, д, ж) и микрофото (б, г, е, з) пород щелочного массива Богдо, для которых определен $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возраст по Би, Неф и КПШ. а–б – Бог-18 – ВКНС (рискоррит); в–г – Бог-6 м/з-ср/з либнеритовые нефелиновые сиениты (ЛНС); д–е – Бог-14 ср/з-кр/з либнеритовые нефелиновые сиениты (ЛНС); ж–з – Бог-1 – плевдолейцитовый карбонатизированный сиенит (ПЛКС). Aeg – Эгирин; Bt – Биотит; Cat – Кальцит; MI – Меланит; Ttn – Титанит; Fsp – К-полево шпат; Ap – Апатит; Nph – Нефелин; Lib – Либенерит.

опробованных по керну скважины № 3257.5 (интервал 32–42 м), проведено определение возраста $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -методом ступенчатого прогрева [5]. Расчет значений возраста плато проводился с использованием программы Isoplot [6]. Ранее по титаниту, отобранному из этих же образцов U/Pb SHRIMP-II-методом, получен возраст 394.4 ± 3.2 млн лет [4]. Химический состав пород определен РФА-методом на спектрометре ARL-9900XP, “ThermoFisher Scientific”; микроэлементный – методом ИСП-МС на приборе Element I, “Finnigan MAT”; состав и микроморфология минералов исследованы на СЭМ MIRA 3 LMU (“Tescan” Ltd) с системой микроанализа INCA Energy 450+ XMax 80 (“Oxford Instruments” Ltd). Петрографическое изучение шлифов проводилось на микроскопе AxioScop.A1 (“Zeiss”). Все исследования выполнены в ИГМ СО РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Среди пород массива Богдо выделяются: крупнозернистые лейкократовые светло-серой или зеленовато-серой окраски высоко-калиевые нефелиновые сиениты (рисчорриты) (ВКНС), пойкилитовой структуры с нефелином, содалитом, К–Ва-полевым шпатом (КПШ) (табл. 1, 2), пироксеном, биотитом, титанитом; средне- и мелкозернистые биотит-эгириновые либнеритовые сиениты (ЛНС), сложенные темно-серыми с красно-коричневыми зернами либнерита (псевдоморфозы микрозернистого серицит-нефелинового агрегата по нефелину), К–Ва-полевым шпатом, меланитом; псевдо-лейцитовые нефелиновые сиениты (ПЛКС), светло-серого цвета пятнистой пойкилитовой структуры карбонатизированные с симплектитам и нефелин-полевошпатовыми агрегатами (рис. 1, табл. 1, 2)). Породы относятся к группе фельдшпатоидных пород основного состава, но с высокими концентрациями Al_2O_3 (20.5–23.6 мас. %), $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (12.3–17.4 мас. %), Ba, Sr, Rb, Nb, REE, с преобладанием K_2O и низкими – CaO (1.08–3.5 мас. %), MgO (0.27–0.78 мас. %) и FeO_{tot} (2.52–4.2 мас. %) (табл. 1). На диаграмме $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ породы соответствуют нефелиновым сиенитам и нефелин-содалитовым кумулатам (по [7]) (рис. 2). Присутствие содалита вместе с нефелином в ВКНС массива Богдо доказывается данными СЭМ (табл. 2). Из всех встреченных в имеющейся коллекции типов пород для целей $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования выделены калийсодержащие минералы (биотиты, нефелины, КПШ).

В возрастных $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -спектрах всех изученных образцов, за исключением КПШ Бог-1, и нефелина

Таблица 1. Содержания основных породообразующих компонентов (мас. %) и микроэлементов (г/т) в плевдолейцитовом карбонатизированном сиените (ПКЛС) – Бог-1, либнеритизированном нефелиновом сиените (ЛНС) – Бог-6 и Бог-14 и высоко-калиевом нефелиновом сиените (ВКНС) – Бог-18

№ проб.	Бог-1	Бог-6	Бог-14	Бог-18
SiO_2	52.43	49.28	50.01	49.05
TiO_2	0.65	0.45	0.44	0.61
Al_2O_3	21.22	22.74	21.26	23.18
FeO_{tot}	2.57	3.49	4.07	3.21
MnO	0.09	0.18	0.22	0.16
MgO	0.50	0.73	0.78	0.33
CaO	3.50	3.22	3.17	2.10
Na_2O	3.07	4.22	4.33	7.62
K_2O	10.15	8.23	7.93	9.80
P_2O_5	0.05	0.04	0.05	0.06
SO_3	0.08	0.07	0.10	0.67
LOI	5.68	4.56	4.82	1.33
SUM	100.23	99.21	99.23	99.02
Sc	0.35	0.54	0.72	0.81
V	100	140	168	116
Cr	5.8	6.6	13.2	22
Rb	453	113	135	588
Sr	719	394.8	2656.6	2030.1
Y	16.4	14.7	22	50
Zr	209	433	560	465
Nb	136	83	103	112
Mo	1.10	0.97	0.66	4.3
Cs	1.42	0.30	0.60	5.8
Ba	1977.1	14992.0	16103.4	5508.4
La	39	57	54	46
Ce	68	65	61	81
Pr	7.1	4.9	4.3	7.1
Nd	19.3	12.1	12.4	22
Sm	2.6	1.31	2.1	3.8
Eu	0.79	0.65	0.89	1.31
Gd	2.7	1.55	1.98	4.1
Tb	0.36	0.22	0.33	0.80
Dy	2.3	1.32	2.2	5.9
Ho	0.51	0.30	0.45	1.38
Er	1.45	0.92	1.57	4.8
Tm	0.20	0.20	0.28	0.76
Yb	1.02	1.22	1.97	4.7
Lu	0.12	0.21	0.30	0.64
Hf	3.1	5.4	6.8	6.8
Ta	4.6	1.03	1.23	2.6
Pb	4.4	9.7	9.0	10.7
Th	1.84	2.1	2.3	6.5
U	0.93	2.6	2.7	3.2

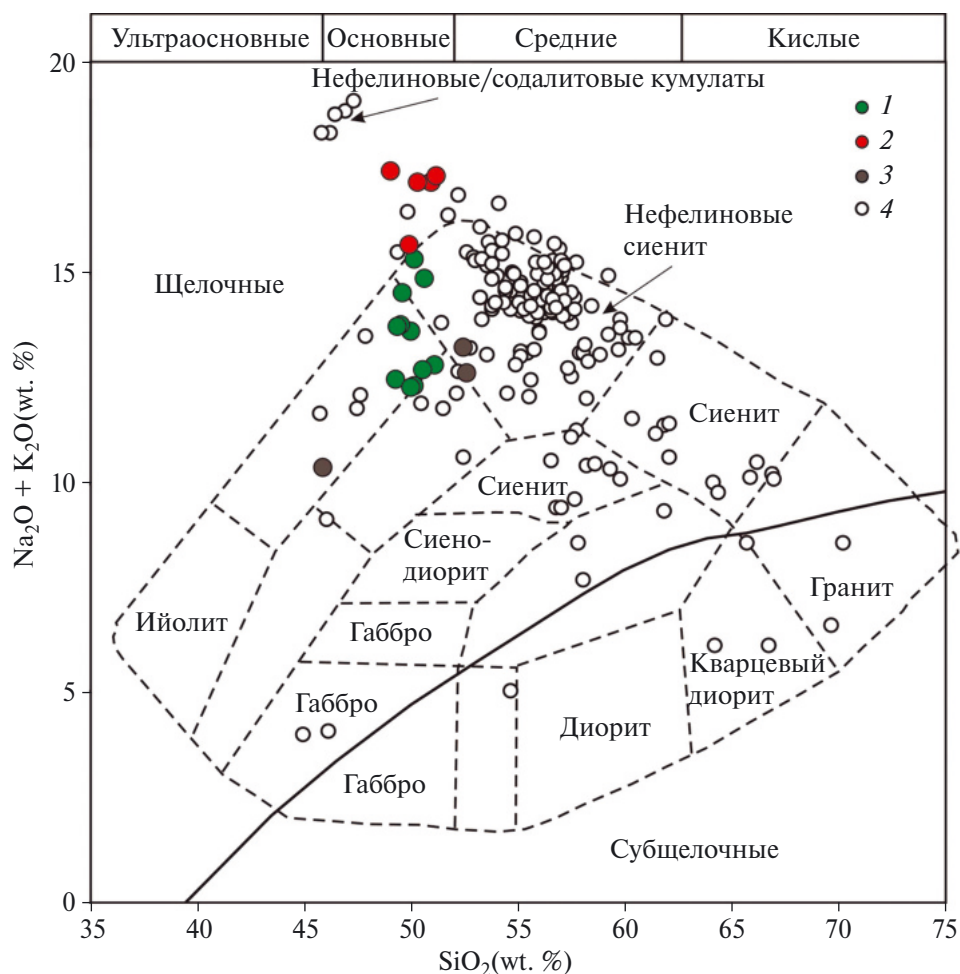


Рис. 2. Диаграмма $\text{SiO}_2\text{—Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ для пород массива Богдо (1 — ЛНС; 2 — ВКНС; 3 — ПЛКС) и 4 — Nechalacho Layered Suite, по [7].

Бог-18, наблюдается кондиционное плато (рис. 3, табл. 3). Для названных двух минералов выделяется промежуточное плато из двух ступеней, характеризующееся 78.7 и 93.2% долей выделенного ^{39}Ar соответственно. Сводка полученных датировок собрана на термохронологической диаграмме (рис. 4), где по оси ординат приведена температура закрытия соответствующей изотопной системы, рассчитанная на основе определенных в лабораторных экспериментах кинетических параметров [8]. Для нефелина данных об устойчивости K/Ar -изотопной системы в литературе не обнаружено, поэтому, исходя из имеющихся представлений о ее поведении в природных условиях, принято значение температуры закрытия, сопоставимое с полевым шпатом.

Датировки, соответствующие изотопным системам, минералам с различной степенью устойчивости формируют на диаграмме (рис. 4) три отчетливо разделяющихся возрастных кластера. По биотиту из образца псевдолейцитового сиедита Бог-1,

а также из образца высококалийного нефелинового сиедита Бог-18 получены $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датировки, согласующиеся с полученным ранее U/Pb -методом (SHRIMP-II) возрастом по титаниту [4], но при этом несколько сдвинутые в меньшую сторону. Минимальная “омоложенность” изотопной системы биотитов свидетельствует о малой интегральной интенсивности поздних наложенных воздействий. Согласованность столь различающихся устойчивостью изотопной системы датировок является дополнительным критерием достоверности и подтверждением ранее сделанного вывода о возрасте формирования щелочных магматических пород массива Богдо, равном 394 ± 3 млн лет [4]. Возраст этого этапа согласуется с возрастом девонского этапа формирования магматических пород массива Томтор (рис. 4) [3].

Следующий возрастной кластер формируется тремя $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датировками по нефелину и КПШ из трех образцов — ВКНС (образец Бог-18) и ЛС

Таблица 2. Химический состав (мас. %) биотита (Би), нефелина (Неф), калиевого полевого шпата (КПШ) и содалита (Сод) в породах массива Богдо, для которых определен возраст $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -методом

№ обр.; минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _{tot}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	BaO	V ₂ O ₃	SrO	Cl	Сумма
Бог-1; Би	30.1	0.95	23.5	31.7	0.67	0.80			9.38					97.1
Бог-1; Би	31.8	2.79	21.6	30.1	0.43	1.66			9.41					97.8
Бог-1; Би	30.6	0.68	21.8	30.6	2.03	1.86			9.18		0.26			97.0
Бог-18; Би	33.5	0.68	9.3	30.9	9.15	1.92		0.59	8.46		0.35			94.8
Бог-18; Би	35.1	1.90	10.4	28.0	3.55	6.83	0.69		8.36					94.9
Бог-6; Неф	47.8		34.6	1.14		0.35	0.54	14.8	0.76					100.0
Бог-6; Неф	48.9		32.1	0.69		1.25	1.63	14.9	0.60					100.0
Бог-14; Неф	42.0		34.3	0.93			0.24	15.8	7.46					100.7
Бог-14; Неф	51.7		30.1				0.51	17.8	0.10					100.1
Бог-18; Неф	41.9		33.8	0.96				16.2	7.53					100.4
Бог-18; Неф	41.3		33.6	0.95				16.2	7.61					99.7
Бог-18; Неф	42.0		33.8	1.22				16.0	7.48					100.4
Бог-1; КПШ	65.1		18.4	0.27					16.6					100.4
Бог-1; КПШ	62.9		19.0	0.23					15.5	2.30				99.9
Бог-1; КПШ	60.1		19.8	0.39				0.50	13.4	6.07				100.2
Бог-6; КПШ	64.7		18.8	0.44				0.55	15.6	1.05				101.0
Бог-6; КПШ	59.8		19.5	0.41				0.61	13.2	5.76				99.2
Бог-14; КПШ	63.5		18.5	0.41				0.80	14.8	1.50				99.5
Бог-14; КПШ	60.7		19.9	0.35				0.62	13.3	6.13		0.64		101.6
Бог-18; КПШ	64.3		18.6					0.26	16.4					99.5
Бог-18; КПШ	62.0		18.7						14.9	3.81				99.4
Бог-18; КПШ	57.1		20.0	0.32				0.23	12.6	8.34				98.5
Бог-18; Сод	37.0		30.9					25.21					7.35	100.5
Бог-18; Сод	36.8		31.1	0.21				25.03					7.37	99.7

Примечание: название пород см. табл. 1; № обр. – номер образца; отсутствие значений – не обнаружено.

Таблица 3. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования минералов из пород щелочного массива Богдо

$T, ^\circ\text{C}$	$t, \text{мин}$	$^{40}\text{Ar}(\text{СТР})$	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	Ca/K	$\Sigma^{39}\text{Ar} (\%)$	Возраст, млн лет $\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$
Образец Бог-1 биотит, навеска 12.26 мг, $J = 0.004464 \pm 0.000052^*$; возраст плато (600–900 $^\circ\text{C}$) = 392.0 $\pm$ 4.1 млн лет, включает 78.7% выделенного ^{39}Ar ; интегральный возраст = 391.4 $\pm$ 4.2 млн лет													
500	10	7.6^*e^{-9}	139.85	6.09	0.0081	0.0042	0.145	0.4055	0.101	0.521	0.5	154.4	52.5
600	10	11.8^*e^{-9}	75.17	0.66	0.0308	0.0188	0.147	0.0675	0.114	0.529	1.8	397.6	23.8
750	10	241.7^*e^{-9}	57.12	0.12	0.0158	0.0018	0.010	0.0099	0.008	0.035	38.3	390.9	4.3
800	10	89.7^*e^{-9}	59.53	0.10	0.0120	0.0039	0.025	0.0224	0.023	0.090	51.3	382.5	7.0
900	10	75.9^*e^{-9}	63.19	0.14	0.0241	0.0045	0.032	0.0364	0.030	0.117	61.7	379.5	4.1
1015	10	102.6^*e^{-9}	60.03	0.10	0.0110	0.0027	0.001	0.0141	0.008	0.003	76.4	401.7	5.0
1100	10	41.1^*e^{-9}	61.17	0.21	0.0151	0.0015	0.000	0.0190	0.012	0.001	82.2	399.8	6.6
1175	10	122.3^*e^{-9}	59.32	0.11	0.0188	0.0013	0.002	0.0126	0.005	0.005	100.0	400.0	4.2
Образец Бог-1, калиевый полевой шпат, навеска 3.96 мг, $J = 0.004469 \pm 0.000052^*$; возраст плато (800–1130 $^\circ\text{C}$) = 334.0 $\pm$ 3.8 млн лет, включает 78.7% выделенного ^{39}Ar ; интегральный возраст = 309.5 $\pm$ 3.7 млн лет													
500	10	18.6^*e^{-9}	33.2	0.092	0.027	0.00191	—	0.0400	0.00508	—	10.3	164.8	11.2
600	10	24.2^*e^{-9}	40.6	0.136	0.038	0.00281	—	0.0184	0.00217	—	21.3	263.2	5.4
800	10	79.6^*e^{-9}	51.7	0.059	0.024	0.00090	—	0.0182	0.00167	—	49.6	339.1	4.9
1130	10	129.8^*e^{-9}	47.3	0.011	0.019	0.00029	—	0.0075	0.00065	—	100.0	331.1	3.8
Образец Бог-6, нефелин, навеска 13.79 мг, $J = 0.004479 \pm 0.000053^*$; возраст плато (700–1050 $^\circ\text{C}$) = 361.2 $\pm$ 4.4 млн лет, включает 80.7% выделенного ^{39}Ar ; интегральный возраст = 353.3 $\pm$ 3.8 млн лет													
500	10	44.3^*e^{-9}	55.6	0.147	0.052	0.00181	—	0.0895	0.00232	—	3.7	221.4	5.5
600	10	57.5^*e^{-9}	56.2	0.097	0.030	0.00166	—	0.0440	0.00275	—	8.5	318.8	6.5
700	10	156.8^*e^{-9}	56.9	0.041	0.026	0.00055	—	0.0259	0.00062	—	21.3	359.7	4.1
800	10	192.2^*e^{-9}	55.0	0.032	0.020	0.00046	—	0.0145	0.00084	—	37.6	369.2	4.3
900	10	311.8^*e^{-9}	52.8	0.021	0.017	0.00030	—	0.0087	0.00031	—	65.1	365.9	4.0
950	10	112.3^*e^{-9}	50.5	0.047	0.028	0.00109	—	0.0096	0.00176	—	75.5	349.3	5.1
1000	10	83.6^*e^{-9}	51.2	0.049	0.021	0.00084	—	0.0092	0.00075	—	83.1	354.6	4.1
1050	10	66.6^*e^{-9}	50.3	0.071	0.031	0.00116	—	0.0055	0.00132	—	89.2	355.5	4.6
1130	10	122.3^*e^{-9}	52.9	0.022	0.023	0.00052	—	0.0173	0.00054	—	100.0	350.0	3.9
Образец Бог-6, калиевый полевой шпат, навеска 3.5 мг, $J = 0.004459 \pm 0.000052^*$; возраст плато (700–1050 $^\circ\text{C}$) = 363.5 $\pm$ 4.0 млн лет, включает 86.5% выделенного ^{39}Ar ; интегральный возраст = 351.7 $\pm$ 3.8 млн лет													
500	10	95.6^*e^{-9}	44.2	0.021	0.027	0.00061	—	0.0193	0.00104	—	13.5	285.6	3.7
700	10	174.1^*e^{-9}	53.6	0.011	0.022	0.00044	—	0.0082	0.00049	—	33.8	370.8	4.0
900	10	210.5^*e^{-9}	52.1	0.026	0.018	0.00028	—	0.0060	0.00055	—	59.0	365.5	4.0
1130	10	324.7^*e^{-9}	49.3	0.015	0.017	0.00015	—	0.0019	0.00035	—	100.0	355.1	3.8

*J — параметр, характеризующий величину нейтронного потока

Продолжение табл. 3. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования минералов из пород щелочного массива Богдо

$T, ^\circ\text{C}$	$t, \text{мин}$	$^{40}\text{Ar}(\text{СТР})$	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$\Sigma ^{39}\text{Ar} (\%)$	Возраст, млн лет $\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$
Образец Бог-14 нефелин, навеска 14.96 мг, $J = 0.004487 \pm 0.000053^*$; возраст плато ($850-1130^\circ\text{C}$) = 361.0 ± 4.6 млн лет, включает 80.6% выделенного ^{39}Ar ; интегральный возраст = 358.2 ± 3.9 млн лет													
500	10	$70.4 \cdot 10^{-9}$	83.67	0.16	0.0594	0.0023	24.05	4.06	0.1231	0.0029	86.6	347.2	6.9
700	10	$119.3 \cdot 10^{-9}$	57.99	0.04	0.0286	0.0004	8.29	1.22	0.0363	0.0008	29.9	347.0	4.1
850	10	$160.7 \cdot 10^{-9}$	57.23	0.03	0.0255	0.0002	7.36	0.37	0.0274	0.0008	26.5	359.5	4.1
950	10	$204.0 \cdot 10^{-9}$	53.09	0.03	0.0212	0.0003	4.27	0.42	0.0108	0.0005	15.4	364.4	4.0
1130	10	$283.3 \cdot 10^{-9}$	52.77	0.03	0.0213	0.0003	4.18	0.42	0.0125	0.0005	15.0	359.2	4.0
Образец Бог-14, калиевый полевой шпат, навеска 7.09 мг, $J = 0.004497 \pm 0.000052^*$; возраст плато ($800-1175^\circ\text{C}$) = 334.0 ± 3.8 млн лет, включает 80.6% выделенного ^{39}Ar ; интегральный возраст = 352.7 ± 4.3 млн лет													
550	10	$17.5 \cdot 10^{-9}$	68.62	0.57	0.0025	0.0058	0.009	0.021	0.0635	0.0071	0.032	364.9	14.7
700	10	$21.4 \cdot 10^{-9}$	65.33	0.25	0.0261	0.0040	0.126	0.018	0.0649	0.0076	0.453	340.3	15.5
800	10	$45.2 \cdot 10^{-9}$	63.12	0.14	0.0141	0.0063	0.032	0.024	0.0514	0.0026	0.117	352.2	6.3
900	10	$41.3 \cdot 10^{-9}$	59.08	0.17	0.0145	0.0019	0.043	0.012	0.0399	0.0019	0.155	347.9	5.4
1000	10	$34.3 \cdot 10^{-9}$	56.03	0.11	0.0128	0.0008	0.023	0.009	0.0245	0.0023	0.083	357.9	5.9
1100	10	$32.7 \cdot 10^{-9}$	56.90	0.25	0.0320	0.0013	0.008	0.012	0.0317	0.0019	0.030	349.5	5.5
1175	10	$46.2 \cdot 10^{-9}$	55.19	0.16	0.0205	0.0023	0.010	0.010	0.0224	0.0017	0.035	356.5	5.2
Образец Бог-18, нефелин, навеска 3.02 мг, $J = 0.004491 \pm 0.000053^*$; возраст плато ($700-1130^\circ\text{C}$) = 363.7 ± 4.1 млн лет, включает 93.2% выделенного ^{39}Ar ; интегральный возраст = 353.3 ± 3.8 млн лет													
500	10	$7.0 \cdot 10^{-9}$	27.6	0.200	0.069	0.00573	—	—	0.0640	0.00383	—	68.8	8.8
700	10	$62.7 \cdot 10^{-9}$	52.4	0.058	0.018	0.00147	—	—	0.0103	0.00161	—	361.2	5.0
1130	10	$125.2 \cdot 10^{-9}$	54.9	0.032	0.027	0.00061	—	—	0.0165	0.00069	—	365.4	4.1
Образец Бог-18, биотит, навеска 28.79 мг, $J = 0.004500 \pm 0.000052^*$; возраст плато ($750-1130^\circ\text{C}$) = 388.2 ± 4.7 млн лет, включает 86.5% выделенного ^{39}Ar ; интегральный возраст = 383.0 ± 4.1 млн лет													
500	10	$9.4 \cdot 10^{-9}$	18.91	1.05	0.0393	0.0038	0.171	0.021	0.0613	0.0105	0.614	6.6	26.2
650	10	$33.9 \cdot 10^{-9}$	62.48	0.27	0.0036	0.0052	0.060	0.034	0.0410	0.0033	0.217	368.6	7.7
750	10	$343.3 \cdot 10^{-9}$	55.32	0.06	0.0129	0.0009	0.008	0.006	0.0028	0.0008	0.028	395.7	4.4
810	10	$455.4 \cdot 10^{-9}$	54.53	0.08	0.0142	0.0014	0.008	0.004	0.0022	0.0007	0.030	391.7	4.3
860	10	$116.5 \cdot 10^{-9}$	55.20	0.03	0.0107	0.0002	0.021	0.016	0.0057	0.0010	0.077	389.3	4.5
950	10	$259.9 \cdot 10^{-9}$	54.94	0.10	0.0157	0.0017	0.009	0.005	0.0073	0.0007	0.031	384.4	4.3
1030	10	$173.0 \cdot 10^{-9}$	55.34	0.06	0.0197	0.0014	0.024	0.014	0.0088	0.0011	0.088	384.2	4.5
1130	10	$217.5 \cdot 10^{-9}$	55.45	0.06	0.0153	0.0006	0.009	0.006	0.0094	0.0009	0.033	383.8	4.4

*J — параметр, характеризующий величину нейтронного потока.

Окончание табл. 3. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования минералов из пород щелочного массива Богдо

$T, ^\circ\text{C}$	t , мин	$^{40}\text{Ar}(\text{СТР})$	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	Ca/K	$\Sigma^{39}\text{Ar}$ (%)	Возраст, млн лет $\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$
Образец Бог-18, калиевый полевой шпат, навеска 4.84 мг, $J = 0.004483 \pm 0.000053^*$; возраст плато ($750-1130^\circ\text{C}$) = 369.3 ± 4.4 млн лет, включает 93.2% выделенного ^{39}Ar ; интегральный возраст = 369.0 ± 4.0 млн лет														
500	10	$46.2 \cdot 10^{-9}$	55.1	0.086	0.057	0.00158	—	—	0.0399	0.00232	—	2.4	320.3	5.8
600	10	$133.2 \cdot 10^{-9}$	51.5	0.028	0.021	0.00063	—	—	0.0063	0.00079	—	9.7	362.3	4.2
700	10	$445.3 \cdot 10^{-9}$	52.0	0.018	0.017	0.00013	—	—	0.0038	0.00034	—	34.1	370.6	4.0
800	10	$351.9 \cdot 10^{-9}$	52.2	0.017	0.018	0.00008	—	—	0.0049	0.00036	—	53.3	369.5	4.0
900	10	$252.8 \cdot 10^{-9}$	51.8	0.015	0.019	0.00026	—	—	0.0019	0.00054	—	67.2	372.7	4.1
1000	10	$268.9 \cdot 10^{-9}$	51.6	0.013	0.019	0.00019	—	—	0.0036	0.00056	—	82.0	368.3	4.1
1130	10	$325.8 \cdot 10^{-9}$	51.3	0.011	0.018	0.00018	—	—	0.0009	0.00036	—	100.0	372.0	4.0

*J — параметр, характеризующий величину нейтронного потока.

(образцы Бог-6, Бог-14). С полученными по нефелину значениями возраста согласуются датировки по трем КПШ из этих же трех образцов.

Согласованность 6 перечисленных датировок из разных пород свидетельствует в пользу достоверно зафиксированного этапа в истории формирования массива Богдо с возрастом 362 ± 4 млн лет (среднее взвешенное для 6 датировок). По всей видимости, данный этап, учитывая характер исследованных минеральных парагенезисов, соответствует метасоматической проработке магматических пород массива. Сохранность изотопной системы биотита свидетельствует в пользу кратковременности наложенного воздействия. Возраст этого этапа согласуется с возрастом кимберлит-карбонатитового магматизма Сибирской платформы и формирования алмазоносных трубок [9]. Для КПШ из образца псевдолейцитового сиенита Бог-1 (рис. 3, 4) получена $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датировка, значительно меньшая по сравнению с U/Pb-датировкой по титаниту, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датировкой по биотиту из этого же образца, а также — по сравнению с датировками по всем изученным образцам.

Учитывая сохранность изотопной системы биотита из этого же образца, а также — калиевых шпатов из образцов Бог-18, Бог-6, Бог-14, наложенное позднее гидротермально-термическое воздействие должно было характеризоваться невысокой интенсивностью. Достоверность фиксации этого события подтверждается и результатами $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования КПШ из ультракалиевых пород массива Томтор (рис. 3) [10].

Таким образом, изотопными данными фиксируется сложная, как минимум, трехэтапная история становления пород массива Богдо. Девонский период формирования массивов Томтор и Богдо связывается с воздействием Вилуйского плюма на восточный край Сибирского кратона. Этап 369–360 млн лет, установленный U/Pb-методом по цирконам и рутилам (трубки Мир и Интернациональная) [11, 12], характерен для кимберлитового магматизма Сибирской платформы. Важно отметить, что близкий возрастной интервал 380–360 млн лет [13] фиксируется для пород Кольской щелочной провинции, с выделением главных магматических и постмагматических этапов формирования щелочных комплексов: 388 ± 6 ; 388–371; 371–362; 367–366; 363–362; 347 ± 8 млн лет [14, 15]. Минеральный состав высококалиевых нефелиновых сиенитов массива Богдо во многом сопоставляется с уникальной минералогией аналогичных пород Хибинского массива [16, 17]. В частности, в щелочных породах массива Богдо встречаются: вадейт — $\text{K}_2\text{Zr}(\text{Si}_3\text{O}_9)$, катаплеит — $\text{Na}_2\text{Zr}(\text{Si}_3\text{O}_9) \cdot \text{H}_2\text{O}$,

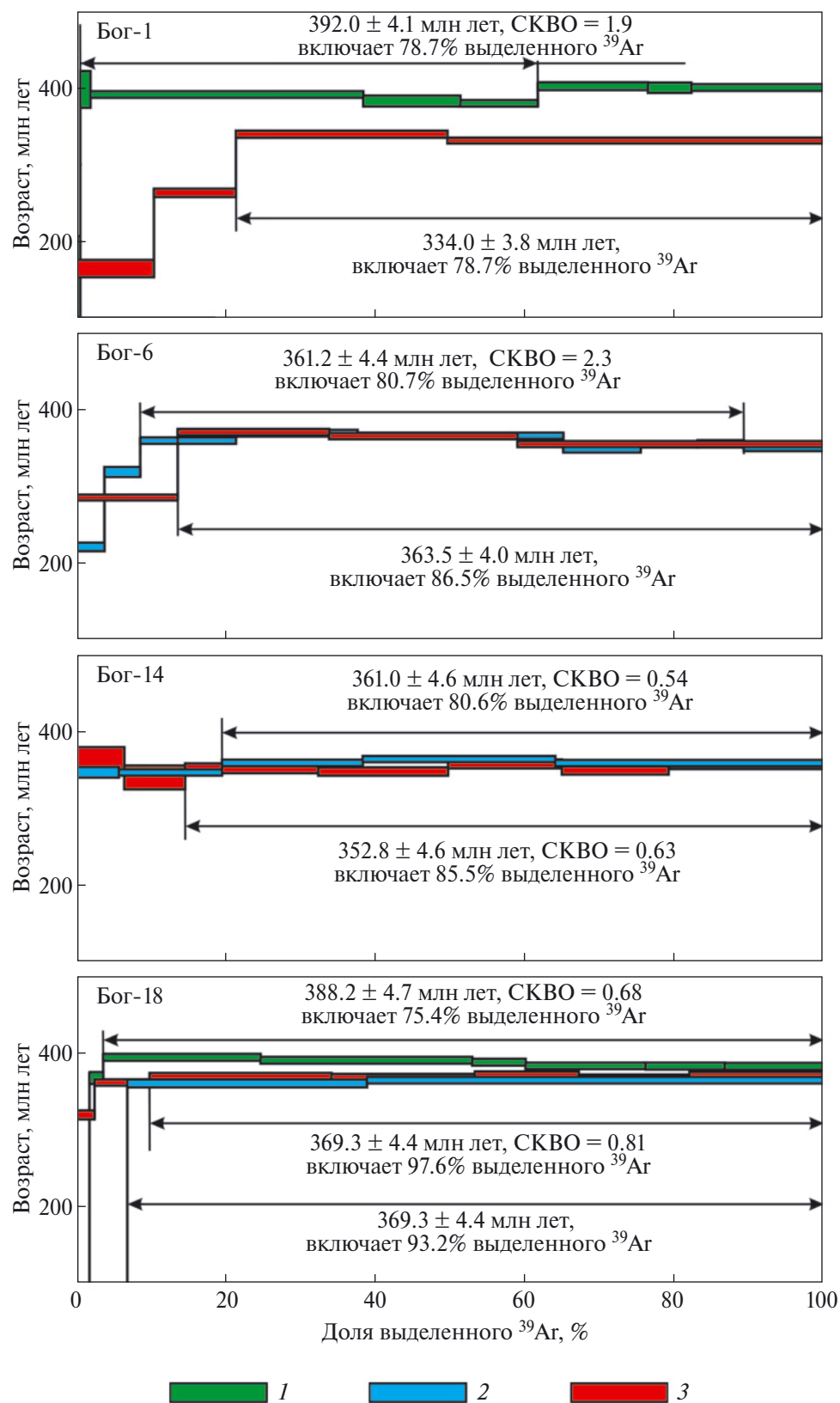


Рис. 3. Возрастные $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -спектры для минералов из щелочных пород массива Богдо. Цветом показаны минеральные фракции: 1 – биотита, 2 – нефелина, 3 – КПШ. Бог-1, Бог-6, Бог-14, Бог-18 – см. табл. 1.

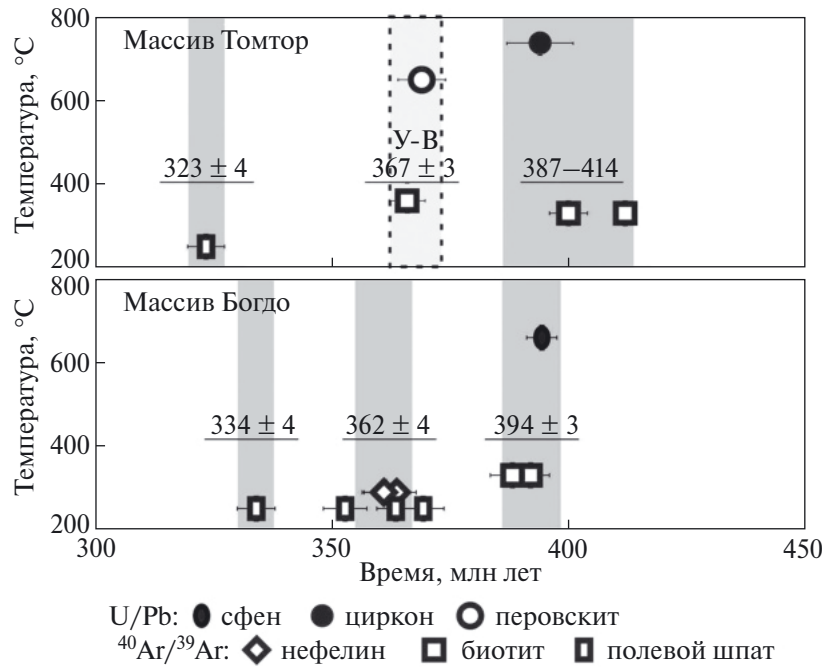


Рис. 4. Сводная термохронологическая диаграмма (палеозойский этап) для минералов из пород массива Томтор [3, 4] и кимберлитовой трубки Удачная-Восточная (У-В со светлым фоном) [9] (сверху); для щелочных пород массива Богдо (снизу). U/Pb-датировка титанита дана по [4].

велерит – $\text{Na}_2\text{Ca}_4(\text{Nb}, \text{Zr})_2(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{O}, \text{F})_4$, анкилит – $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Ca}, \text{Sr})\text{CO}_3(\text{OH}, \text{H}_2\text{O})$, La-кордилит (Cordylite-(La)) – $(\text{Na}, \text{Ca})\text{Ba}(\text{La}, \text{Ce}, \text{Sr})_2(\text{CO}_3)_2\text{F}$, (Nb, Zr)-рутил, (Sr, Ce, La)-фторапатит, (Zr, Nb) -титанит, бастнезит, синхизит, монацит, пироксены, ильменит, марганецильменит и железистый пироксенит, меланит, флюорит, скаполит и другие. В распределении главных и примесных элементов в составе минералов, встречающихся в различных

типах пород массива Богдо, прослеживается неоднородность, которая может быть объяснена стадийностью минералообразования.

Кроме минералогических признаков полистадийности установлены вариации степени тетрадного эффекта редкоземельных элементов [18] в щелочных породах массива Богдо (рис. 5), которые свидетельствуют о проявлении автотасоматических и гидротермальных процессов,

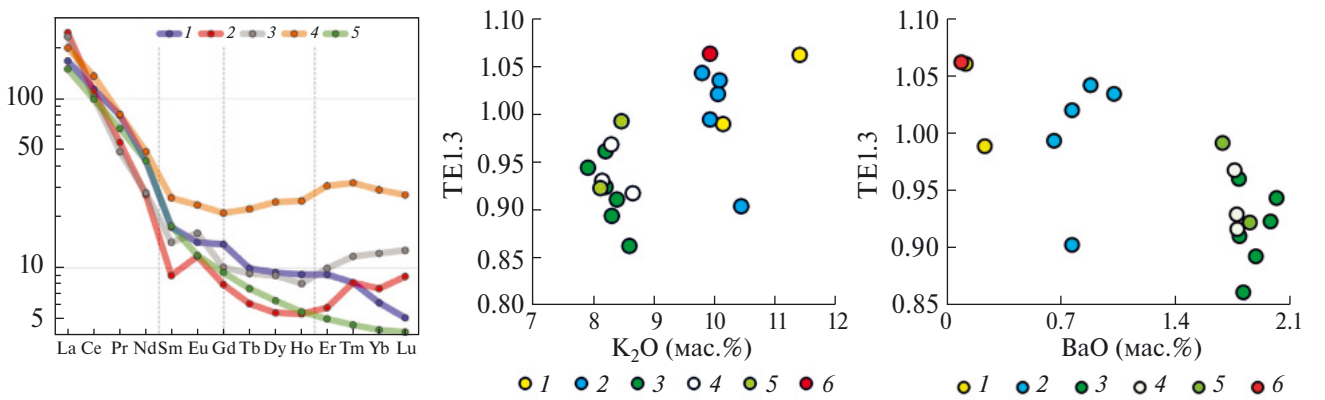


Рис. 5. Диаграммы, демонстрирующие зависимости вариаций степени тетрадного эффекта: REE, нормированные по хондриту C1 [19] (1 – Бог-1; 2 – Бог-6; 3 – Бог-14; 4 – Бог-18; 5 – ВКНС (среднее по обр. 455/890 и 818/637) Хибинского массива, по [20]); TE3 – Gd-Ho) и La_n/Nd_n ; K_2O (мас. %); BaO (мас. %) для пород массива Богдо. 1 – псевдолейцитовые сиениты; 2 – ВКНС; 3–6 – ЛС; 6 – ПЛКС.

а также о взаимодействии с более поздними процессами карбонатизации. В целом полученные данные доказывают полихронность формирования щелочного массива Богдо. Порода, сформированные в наиболее поздние стадии, сопоставляются со временем возникновения наиболее продуктивных на редкие и редкоземельные элементы образований Томторского месторождения. Эти данные позволяют прогнозировать наличие подобных руд и на массиве Богдо.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ (проект № 23-63-10017). Определение: U-Pb-возраста титанитов методом SHRIMP-II проведено при финансовой поддержке РФФИ (грант 05-18-70109_Арктика); возраста минералов кимберлитов и Томторского массива при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (гос. задание ИГМ СО РАН № 122041400193-7, 122041400171-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эрлих Э.Н. Новая провинция щелочных пород на севере Сибирской платформы // ЗВМИ. 1964. Ч. ХСIII. Вып. 6. С. 682–693.
2. Зайцев А.И., Энтин А.Р., Ненашев Н.И., Лазебник К.А., Тян О.А. Геохронология и изотопная геология Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1992. 248 с.
3. Владыкин Н.В., Котов А.Б., Борисенко А.С., Ярмолюк В.В., Похиленко Н.П., Сальникова Е.Б., Травин А.В., Яковлева С.З. Возрастные рубежи формирования щелочно-ультраосновного массива Томтор: результаты геохронологических U-Pb- и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -исследований // ДАН. 2014. Т. 454. № 2. С. 195–199.
4. Dobretsov N.L., Zhmodik S.M., Lazareva E.V., Tolstov A.V., Belyanin D.K., Surkov O.N., Dobretsov N.N., Rodionov N.V., Sergeev S.A. U–Pb Age of Sphene and the Petrochemical, Mineralogical, and Geochemical Features of Alkaline Rocks of the Bogdo Complex (Arctic Siberia) // Doklady Earth Sciences. 2019. V. 489. Part 1. P. 1352–1357.
5. Травин А.В., Юдин Д.С., Владимиров А.Г., Хромых С.В., Волкова Н.И., Мехоношин А.С., Колотилина Т.Б. Термохронология Чернорудской гранулитовой зоны (Ольхонский регион, Западное Прибайкалье) // Геохимия. 2009. Т. 11. С. 1181–1199.
6. Ludwig K.R. ISOPLOT/Ex A geochronological toolkit for Microsoft Excel, Version 3.6 // Berkeley Geochronology Center Special Publication. № 4. 2008. 76 p.
7. Moller W., Williams-Jones A.E. Petrogenesis of the Nechalacho Layered Suite, Canada: Magmatic Evolution of a REE–Nb-rich Nepheline Syenite Intrusion // Journal of Petrology. 2016. V. 57. No 2. P. 229–276.
8. Hodges K.V. Geochronology and Thermochronology in Orogenic Systems // In: Treatise on Geochemistry. Oxford: Elsevier, 2004. P. 263–292.
9. Юдин Д. С., Томиленко А. А., Травин А. В., Агашев А. М., Похиленко Н. П., Оришаши Ю. Возраст внедрения кимберлитовой трубки Удачная-Восточная: U/Pb- и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -данные // ДАН. 2014. Т. 455. № 1. С. 91–93.
10. Добрецов Н.Л., Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Пономарчук В.А., Травин А.В., Мякая И.Н., Толстов А.В., Карманов Н.С. Ультракалийевая порода Томторского комплекса щелочных пород и карбонатитов (Арктическая Сибирь) // ДАН. 2020. Т. 495. № 2. С. 23–27.
11. Spetsius Z.V., Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Pearson N.J. Archean sulfide inclusions in Paleozoic zircon megacrysts from the Mir kimberlite, Yakutia: implications for the dating of diamonds // Earth and Planetary Science Letters. 2002. V. 199. № 1–2. P. 111–126.
12. Резвухин Д.И. Гранаты с минеральными включениями оксидов и сульфидов из кимберлитовой трубки Интернациональная: минералогия, геохимия и связь с процессами мантийного метасоматоза в литосферной мантии Мирнинского поля, Сибирский кратон. Дисс.к.г.-м.н. Новосибирск: ИГМ СО РАН. 2016. 173 с.
13. Kramm U., Kogarko L.N. Nd and Sr isotope signatures of the Khibina and Lovozero agpaitic centres, Kola Alkaline Province, Russia // Lithos. 1994. V. 32. P. 225–242.
14. Арзамасцев А.А., Арзамасцева Л.В., Травин А.В., Беляцкий Б.В., Шаматрина А.М., Антонов А.В., Ларионов А.Н., Родионов Н.В., Сергеев С.А. Длительность формирования палеозойской магматической системы в центральной части Кольского полуострова: U-Pb-, Rb-Sr-, Ar-Ar-данные // ДАН. 2007. Т. 417. № 5. С. 666–670.
15. Стифеева М.В., Сальникова Е.Б., Арзамасцев А.А., Котов А.Б., Гроздев В.Ю. Кальциевые гранаты как источник информации о возрасте щелочно-ультраосновных интрузий Кольской магматической провинции // Петрология. 2020. Т. 28. № 1. С. 72–84.
16. Bulakh A.G., Le Bas M.J., Wall F., Zaitsev A.N. Ancylyte-bearing carbonatites of the Sebyavt massif, Kola peninsula, Russia // Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte. 1998. 171–192.

17. *Агеева О.А.* Типоморфизм акцессорных минералов и эволюция минералообразования в породах комплекса речкоритов: Хибинский массив. Дисс.к.г.-м.н. 2002. М.: ИГЕМ. 187 с.
18. *Irber W.* The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // *Geochim. Cosmochim. Acta* 1999. V. 63. No. 3. P. 489–508.
19. *McDonough W.F., Sun S.-s.* The composition of the Earth // *Chemical Geology*. 1995.V. 120. P. 223–253.
20. *Arzamastsev A.A., Bea F., Glaznev V.N., Arzamastseva L.V., Montero L.V.* Kola alkaline province in the Paleozoic evaluation of primary mantle magma composition and magma generation conditions // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2002. V. 3. No 1. P. 1–32.

PALEOZOIC STAGE FORMATION OF THE ALKALINE ROCKS MASSIF BOGDO, ARCTIC SIBERIA (BY $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ DATING)

**S. M. Zhmodik^{a, #}, A. V. Travin^a, E. V. Lazareva^a, D. S. Yudin^a, D. K. Belyanin^a,
A. V. Tolstov^a, N. N. Dobretsov^a**

^a*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: zhmodik@igm.nsc.ru*

The age of potassium-bearing minerals from high-K nepheline syenites, libeneritized and carbonatized nepheline syenites, as well as pseudoleucite syenites of the Bogdo alkaline massif (Arctic Siberia) was determined by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method. As a result of generalization and analysis of the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating data, on the summary thermochronological diagram for minerals from the rocks of the Tomtor massif, the Udachnaya-Vostochnaya kimberlite pipe, and alkaline rocks of the Bogdo massif, the polychronicity of the formation of alkaline complexes of the Tomtor type at the Paleozoic stage was revealed. Based on isotopic data, a complex, three-stage history of the formation of the rocks of the Bogdo massif is reconstructed, with the manifestation of the Late Devonian-Early Carboniferous stage – the most productive for rare-metal-rare-earth mineralization. The Devonian period of the formation of the Tomtor and Bogdo massifs is associated with the impact of the Vilyui plume on the eastern edge of the Siberian craton. A close age interval is fixed during the formation of the rocks of the Kola alkaline province.

Keywords: rocks and minerals of the Bogdo alkaline massif, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, thermochronology