

УДК 550.93+549.752.143 (571.53/.55)

ХИМИЧЕСКОЕ МИКРОЗОНДОВОЕ Th–U–Pb-ДАТИРОВАНИЕ МОНАЦИТА ИЗ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ ПЕГМАТИТОВ БУРПАЛИНСКОГО МАССИВА (СЕВЕРНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ)

© 2024 г. А. В. Спивак^{1,*}, И. А. Сотникова², А. А. Вирус¹, академик РАН М. И. Кузьмин²,
Е. С. Захарченко¹, Т. Б. Колотилина², Н. В. Алымова²

Поступило 03.07.2023 г.

После доработки 01.09.2023 г.

Принято к публикации 12.09.2023 г.

Методом электронно-зондового рентгеноспектрального анализа (ЭЗРСА) проведено исследование химического состава и зональности монацита из дайки редкометалльных пегматитов Бритолитовой зоны Бурпалинского массива (Северное Прибайкалье). Установлено, что монациты представлены Ce и La разновидностями. Зерна монацита-(Ce) характеризуются повышенной концентрацией Nd₂O₃ и ThO₂ по сравнению с монацитом-(La). Средневзвешенный возраст по монацитам, установленный методом U–Th–Pb СИМЕ, составил 251±31 млн лет. Возраст, рассчитанный методом изохроны, соответствует 273±69 млн лет. Полученные значения возраста монацита свидетельствуют о том, что пегматиты Бритолитовой зоны внедрялись после пегматитов северо-западного участка, и позволяют предположить существование нескольких этапов становления редкометалльных пегматитов в массиве.

Ключевые слова: монацит, редкометалльные пегматиты, Th–U–Pb-метод, Бурпалинский массив, внутриплитовый магматизм

DOI: 10.31857/S2686739724010108

Бурпалинский массив, относящийся к Северо-Байкальской щелочной провинции, является уникальным редкометалльным объектом с На-специализацией. Массив представляет собой интрузию центрального типа площадью 250 км² (рис. 1). В результате полученных геологических, петрохимических и геохимических данных последовательность формирования слагающих пород массива представляется следующим образом: шонкиниты → нефелиновые сиениты → полосчатые трахитоидные сиениты → кварцевые сиениты → жильные породы: мариуполиты, фойяиты, редкометалльные пегматиты, апатит-флюоритовые породы, карбонатиты, щелочные граниты [1]. Проведенные ранее U–Pb-геохронологические исследования Бурпалинского массива по цирконам показали, что возраст щелочных сиенитов (пуласкитов) главной фазы (2 – проба

Бур 305/10) составляет 294±1 млн лет, а редкометалльных пегматитов северо-западной зоны (3 – проба Бур 313/10) – 283±8 млн лет [2, 3]. Редкометалльные пегматиты Бритолитовой зоны (1 – проба Бур 310/9), которые внедрились по разломам в щелочных сиенитах центральной части массива (рис. 1), продатированы нами впервые методом U–Th–Pb СИМЕ по монацитам.

Данные пегматиты представлены дайками, прослеживающимися по простиранию до 50 м, мощностью до 20 м, имеют полосчатую текстуру, характеризуются среднезернистой, реже крупнозернистой структурой. Содержания REE в них варьируют в широком диапазоне от 0,1 до 10300 ppm [1, 3]. Общий химический состав пород: SiO₂ – 58.18, TiO₂ – 1.31, Al₂O₃ – 13.01, Fe₂O₃ – 6.82, FeO – 2.00, MnO – 0.68, MgO – 2.36, CaO – 2.17, Na₂O – 2.66, K₂O – 9.40, P₂O₅ – 0.14, H₂O – 1.25, сумма 99.98 мас.%. [4]. Редкометалльные пегматиты сложены микроклином, эгирином, арфведсонитом, альбитом; из акцессорных минералов присутствуют – апатит, флюорит, ильменит, циркон, бритолит, сейдозерит, ловенит, монацит.

¹Институт экспериментальной минералогии им. Д. С. Коржинского Российской Академии наук, Московская обл., Черноголовка, Россия

²Институт геохимии им. А. П. Виноградова Сибирского отделения Российской Академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: spivak@iem.ac.ru

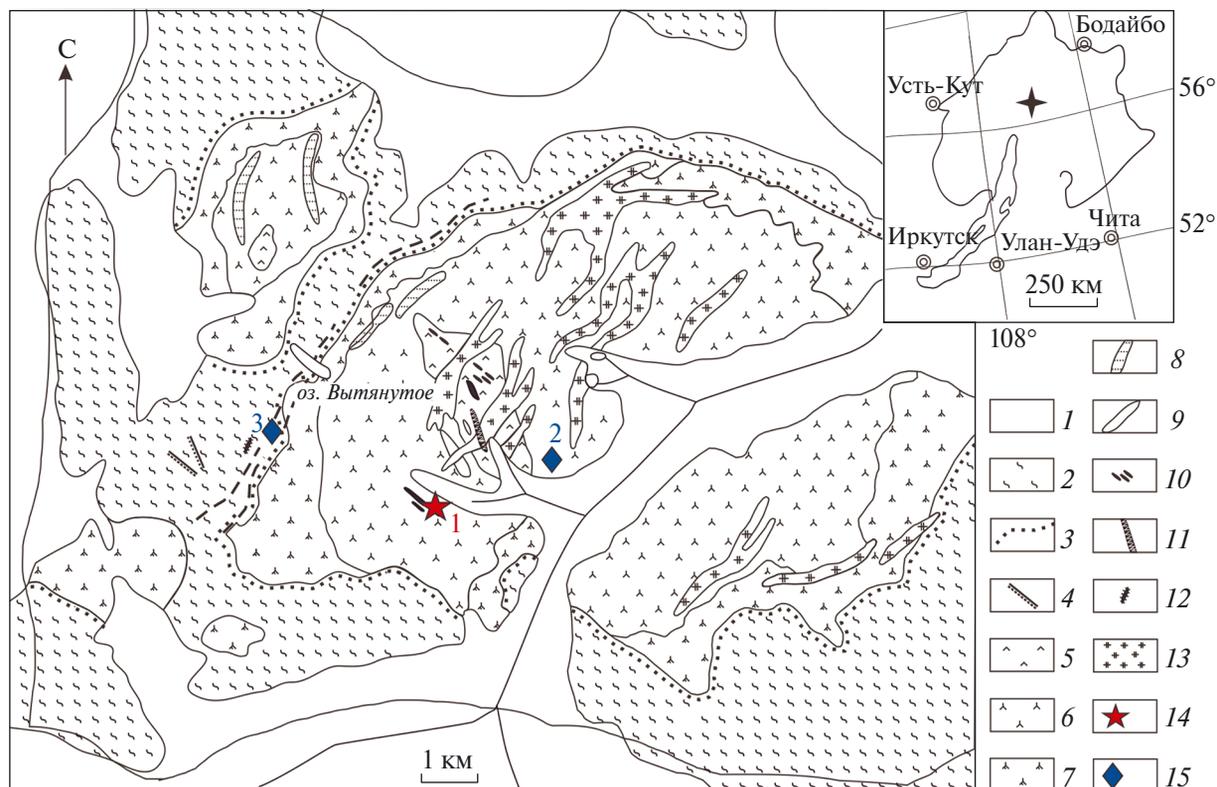


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Бурпалинского массива. 1 – четвертичные отложения; 2 – песчаники, алевролиты холоднинской свиты; 3 – роговики; 4 – шонкиниты; 5 – нефелиновые сиениты; 6 – полосчатые трахитоидные сиениты; 7 – кварцевые сиениты; 8 – мариуполиты; 9 – фойяиты; 10 – редкометалльные пегматиты; 11 – апатит-флюоритовая жила; 12 – карбонатиты; 13 – щелочные граниты; 14 – место отбора проб для геохронологических Th-U-Pb-исследований по монациту (1-Бур 310/9); 15 – места отбора проб для U-Pb-геохронологических исследований по циркону (2 – проба Бур 305/10, 3 – проба Бур 313/10 [2,3]).

Монацит относится к классу фосфатов лантаноидов с общей формулой AP_2O_7 , где A – LREE, Th, Y, Ca, Pb, U и др. [5]. При этом монацит имеет чрезвычайно переменный состав [6]. Благодаря высоким содержаниям U и Th, а также низкому исходному содержанию нерадиогенного Pb, монацит получил широкое признание как хороший *in situ* геохронометр [7–10]. Определение возраста по минералам геохронометрам, среди которых большое количество именно рудных минералов, является на сегодняшний день перспективным направлением [7–11], что позволяет расширить наши знания о времени проявления рудных процессов. Целью настоящей работы является детальное изучение состава (Ce)- и (La)-монацитов из редкометалльных пегматитов Бритолитовой зоны Бурпалинского массива (Северное Прибайкалье), их датирование методом U-Th-Pb СИМЕ для установления принадлежности пегматитов Бритолитовой зоны Бурпалинского массива к единому позднепалеозойскому этапу формирования массива.

Определение элементного состава монацитов выполняли методом электронно-зондового рентгеноспектрального анализа (ЭЗРСА) на растровом электронном микроскопе (РЭМ) “Tescan Vega” II ХМУ с энергодисперсионным (ЭДС) (INCAx-sight) и волновым (ВДС) (INCA wave 700) рентгеновскими спектрометрами в ИЭМ РАН. Содержания Th, U и Pb определяли с помощью ВДС, используя кристалл-анализатор РЕТ. В качестве аналитических линий были выбраны для Th – $ThM\alpha_{1,2}$, для U – $UM\alpha_{1,2}$, для Pb – $PbM\alpha_{1,2}$. Фон измеряли симметрично с двух сторон от аналитических линий. Время набора интенсивности на аналитической линии $ThM\alpha_{1,2}$ составляло 20 с, фон по 10 с, на линии $UM\alpha_{1,2}$ – 40 с, фон по 20 с, на линии $PbM\alpha_{1,2}$ – 80 с, фон по 40 с. В качестве стандартов для определения содержания Th использовали ThO_2 , для определения содержания U – UO_2 , для определения содержания Pb – $PbTe$. Остальные элементы входящие в состав монацитов определяли с помощью ЭДС. В качестве эталонов для количественного определения следующих элементов

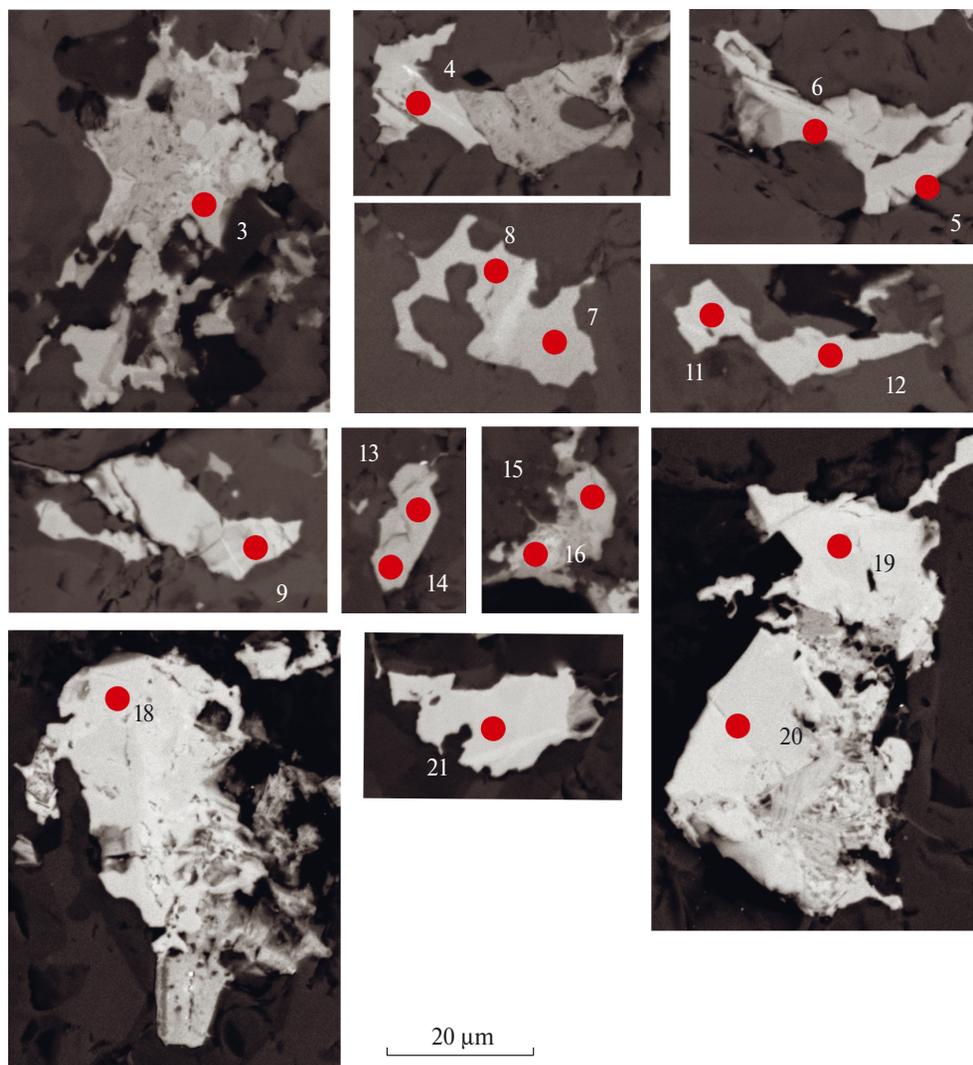


Рис. 2. BSE изображения зерен монацита пробы 310-9 (в отраженных электронах) с обозначением точек анализа (цифры – порядковый номер анализа).

использовали: Si – SiO₂, Ca – волластонит, Fe – Fe (металл), Sr – SrF₂, La – LaPO₄, Ce и P – CePO₄, Pr – PrPO₄, Nd – NdPO₄. Время набора энергодисперсионного спектра составляло 100 с. Измерения на ВДС и ЭДС выполняли одновременно при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе поглощенных электронов 50 нА, размере зонда 2 мкм и рабочем расстоянии 25 мм. Результаты ЭЗРСА монацитов представлены в табл. 1, где также приведены используемые при количественном анализе эталоны. Пределы обнаружения по 2σ-критерию составляли для Th – 0.09 мас.%, для U – 0.02 мас.%, для Pb – 0.03 мас.%. Для определения возраста в пробе 310–9 было отобрано 11 зерен монацита размером 20–50 мкм (рис. 2).

Монациты представлены удлинёнными или изометричными кристаллами. Они находятся

в сростках с апатитом, флюоритом, кварцем (рис. 3 в), (Ce)-бастнезитом и кальцитом (рис. 3 в-г). В ассоциации также идентифицированы альбит, арфведсонит, K-полевой шпат, циркон, (рис. 3 а-г). Химический состав монацитов достаточно вариативен как по главным компонентам, так и по примесям (табл. 1). Среди монацитов данных редкометалльных пегматитов Бурпалинского массива выделены монациты-(Ce) и монациты-(La). Химический состав минералов, ассоциирующих с монацитами приведен в табл. 2 и 3.

Для монацитов (Ce)-группы характерно содержание Ce₂O₃ в диапазоне 28.10–35.60 и La₂O₃ 22.19–27.85 мас.% (табл. 1). В качестве примесей присутствуют Nd₂O₃ – 5.13, ThO₂ – 6.32, SiO₂ – 2.67, Pr₂O₃ – 1.66, CaO – 1.39 PbO – 0.07, UO₂ – 0.21 мас.% (приведены средние значения по результатам

Таблица 1. Химический состав монацитов из редкометаллических пегматитов Бритологитовой зоны Бурлалинского массива.

№ обр. № ан.точки	Монацит-(Ce)												Монацит-(La)			
	310-9-02						310-9-06						310-9-03	310-9-02		
	3	4	6	7	8	9	13	14	15	16	18	19	20	5	11	12
Компонент	Содержание, мас. %															
PbO	0.07	0.10	0.07	0.16	0.05	0.11	0.06	0.04	0.05	0.05	0.07	0.07	0.02	0.05	0.09	0.07
ThO ₂	5.29	7.29	6.25	11.97	6.48	10.39	4.28	4.16	3.29	6.74	6.58	4.92	4.44	4.26	5.01	4.98
UO ₂	0.09	0.29	0.19	0.35	0.21	0.21	0.22	0.24	0.10	0.15	0.23	0.28	0.22	0.13	0.08	0.10
SiO ₂	1.82	2.70	2.86	3.94	2.96	3.73	1.76	1.91	2.10	2.76	2.74	2.88	2.49	2.28	2.07	2.63
CaO	3.83	1.26	0.87	0.63	0.64	2.71	0.91	0.84	4.13	4.18	0.19	0.27	0.38	0.68	2.51	0.80
FeO	1.96	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	1.05	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0.33	н.п.о.
SrO	н.п.о.	0.87	1.21	0.89	1.00	1.45	1.26	1.12	1.27	н.п.о.	0.81	1.12	1.25	1.12	1.35	1.18
La ₂ O ₃	27.85	25.48	27.33	24.61	25.70	22.78	23.95	23.43	25.79	24.84	22.19	23.77	23.51	33.66	29.02	32.66
Ce ₂ O ₃	35.60	29.78	30.45	28.10	31.20	28.25	32.33	32.44	29.72	33.46	32.41	31.98	32.95	28.72	27.73	28.41
Pr ₂ O ₃	1.62	1.56	1.33	1.53	1.77	1.00	1.70	2.62	1.56	2.00	1.87	1.80	1.25	0.93	1.11	0.54
Nd ₂ O ₃	5.94	4.41	3.71	3.91	4.18	3.77	5.68	5.71	3.87	7.72	6.20	5.71	5.85	2.09	3.01	2.29
P ₂ O ₅	15.88	25.70	25.61	23.81	25.92	25.35	27.84	27.74	28.12	16.77	25.94	26.91	27.75	25.73	27.23	26.83
Сумма	99.96	99.45	99.87	99.91	100.09	99.74	99.98	100.25	99.99	99.73	99.24	99.71	100.10	99.64	99.53	100.48
Формульные коэффициенты (расчет на 4 кислорода) для общей формулы АХО ₄																
Pb	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001
Th	0.057	0.067	0.057	0.112	0.059	0.094	0.039	0.037	0.029	0.076	0.061	0.044	0.040	0.039	0.045	0.045
U	0.001	0.003	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001
Ca	0.194	0.055	0.037	0.028	0.027	0.116	0.039	0.036	0.170	0.541	0.008	0.011	0.016	0.030	0.106	0.034
Fe	0.078	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.044	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.000
Sr	0.000	0.020	0.028	0.021	0.023	0.033	0.029	0.026	0.028	0.000	0.019	0.026	0.029	0.026	0.031	0.027
La	0.486	0.381	0.407	0.374	0.380	0.335	0.349	0.341	0.366	0.455	0.332	0.348	0.340	0.505	0.422	0.477
Ce	0.617	0.441	0.450	0.424	0.458	0.412	0.468	0.469	0.419	0.608	0.481	0.465	0.473	0.427	0.400	0.411
Pr	0.028	0.023	0.020	0.023	0.026	0.014	0.025	0.038	0.022	0.036	0.028	0.026	0.018	0.014	0.016	0.008
Nd	0.101	0.064	0.053	0.058	0.060	0.054	0.080	0.081	0.053	0.137	0.090	0.081	0.082	0.030	0.042	0.032
ΣA	1.563	1.055	1.056	1.044	1.037	1.061	1.030	1.029	1.088	1.899	1.022	1.004	1.000	1.073	1.076	1.035
P	0.636	0.881	0.876	0.830	0.881	0.855	0.932	0.927	0.916	0.453	0.891	0.904	0.923	0.885	0.910	0.899
Si	0.086	0.109	0.115	0.162	0.119	0.149	0.069	0.075	0.081	0.137	0.111	0.114	0.098	0.093	0.082	0.104
ΣX	0.723	0.990	0.991	0.993	1.000	1.004	1.001	1.002	0.997	0.590	1.002	1.019	1.020	0.978	0.991	1.003
La/Ce	0.79	0.86	0.90	0.88	0.83	0.81	0.75	0.73	0.87	0.75	0.69	0.75	0.72	1.18	1.05	1.16

н.п.о. – ниже предела обнаружения.

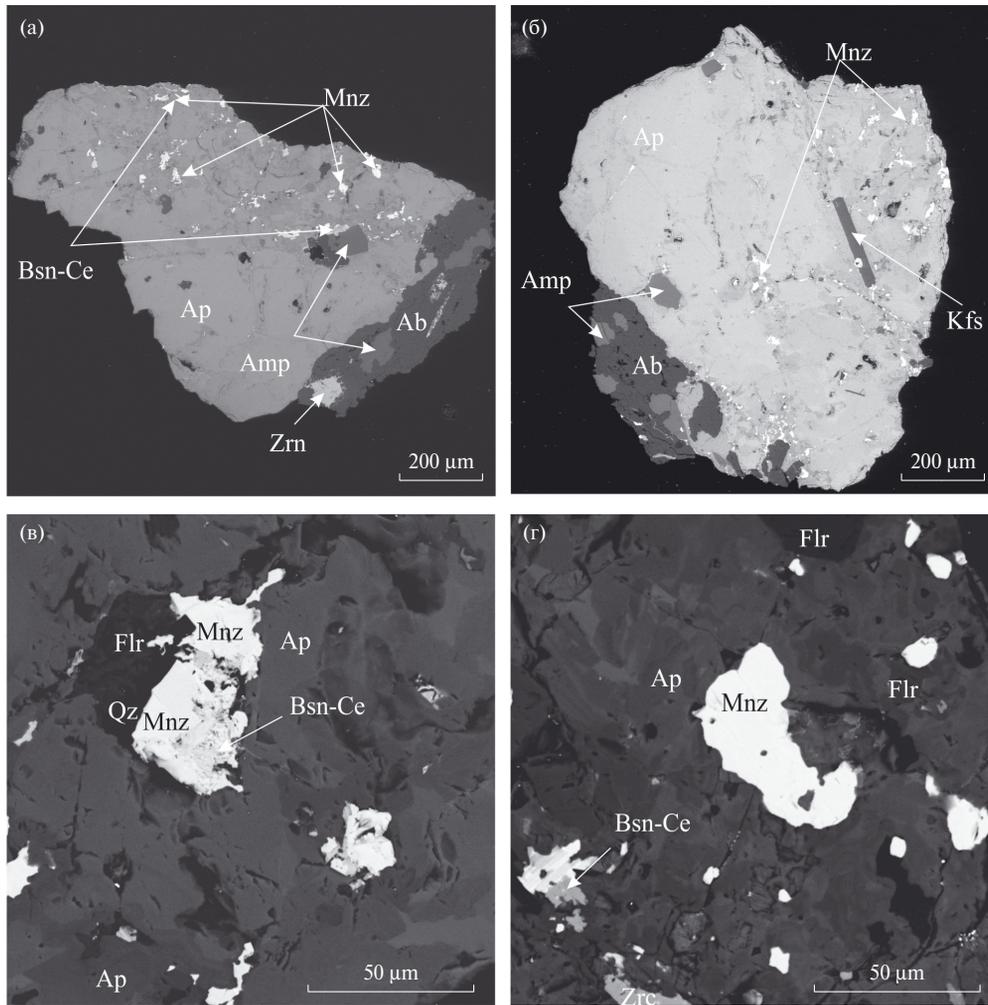


Рис. 3. Изображение BSE (в отраженных электронах). Включения монацита и других минералов в зернах апатита из редкометалльных пегматитов центральной части Бурпалинского массива. (а) – основное зерно апатита с включениями монацита; Се-бастнезита, амфибола, альбита с включением циркона; (б) – зерно апатита с включениями монацита, амфибола, К-полевым шпатом, альбитом; (в) – монацит в ассоциации с Се-бастнезитом, флюоритом и кварцем в апатите; (г) – монацит в апатите в ассоциации с Се-бастнезитом, флюоритом, цирконом и кварцем. Обозначения: Ab – альбит, Amp – амфибол, Ap – апатит, Bsn-Ce – бастнезит-(Ce), Flr – флюорит, Kfs – К-полевым шпат, Mnz – монацит, Qz – кварц, Zrn – циркон.

Таблица 2. Химический состав минералов, ассоциирующих с монацитами.

Минеральная фаза	Ab(5)*	Kfs(4)	Zrn(7)	Amp(5)	Qz (1)	Ap (8)	Cal(3)	Bsn-Ce (5)
Компонент	Содержание, мас.%							
SiO ₂	68.87	64.49	33.40	42.04	99.41	1.67	0.00	1.80
TiO ₂	0.00	н.п.о.	0.00	1.36	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0.00
Al ₂ O ₃	19.70	18.39	н.п.о.	5.68	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0.00
FeO	н.п.о.	н.п.о.	0.69	33.61	н.п.о.	н.п.о.	0.78	1.67
MnO	0.00	н.п.о.	0.00	1.43	0.00	0.06	1.26	н.п.о.
MgO	0.00	0.00	н.п.о.	5.86	0.00	н.п.о.	н.п.о.	0.00
CaO	0.00	н.п.о.	0.56	1.20	н.п.о.	37.43	41.29	4.53
Na ₂ O	11.13	1.05	н.п.о.	4.17	н.п.о.	1.03	н.п.о.	н.п.о.
K ₂ O	н.п.о.	14.97	0.00	1.55	н.п.о.	н.п.о.	0.00	н.п.о.
P ₂ O ₅	–	н.п.о.	–	0.00	–	35.80	н.п.о.	2.00

Окончание таблицы 2

Минеральная фаза	Ab(5)*	Kfs(4)	Zrn(7)	Amp(5)	Qz (1)	Ap (8)	Cal(3)	Bsn-Ce (5)
Компонент	Содержание, мас. %							
F	—	—	—	—	—	3.72	—	3.31
SrO	н.п.о.	н.п.о.	0.00	0.00	н.п.о.	9.41	н.п.о.	1.00
ZrO ₂	0.00	0.00	61.72	0.93	0.00	н.п.о.	н.п.о.	0.00
Y ₂ O ₃	н.п.о.	н.п.о.	0.00	н.п.о.	—	0.57	н.п.о.	1.64
La ₂ O ₃	н.п.о.	н.п.о.	0.00	н.п.о.	—	3.04	3.04	20.50
Ce ₂ O ₃	н.п.о.	н.п.о.	1.91	н.п.о.	—	4.32	2.77	25.83
Pr ₂ O ₃	н.п.о.	н.п.о.	0.62	н.п.о.	—	н.п.о.	н.п.о.	2.27
Nd ₂ O ₃	н.п.о.	н.п.о.	0.73	н.п.о.	—	1.71	н.п.о.	5.31
Gd ₂ O ₃	н.п.о.	н.п.о.	0.00	н.п.о.	—	н.п.о.	0.00	1.09
ThO ₂	н.п.о.	н.п.о.	0.00	н.п.о.	—	н.п.о.	0.00	1.14
Сумма	99.70	98.90	99.63	97.82	99.41	98.77	49.14	72.08

*приведено среднее значение, в скобках указано количество точек анализа; н.п.о. — ниже предела обнаружения; «—» — не определяли.

Таблица 3. Химический состав флюоритов в ассоциации с монацитами.

№ обр.	310-9-03	310-9-03	310-9-06	1-310-9
Компонент	Содержание, мас. %			
Ca	51.90	53.22	51.46	53.12
F	46.62	45.09	45.29	44.50
Sr	1.07	1.43	2.94	1.70
Сумма	99.58	99.74	99.69	99.32

Таблица 4. Рассчитанный возраст монацитов редкометалльных пегматитов Бритолитовой зоны Бурпалинского массива.

№	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	18	19
ThO ₂ *	4,48	7,81	4,38	6,55	13,57	7,16	10,97	5,21	5,30	4,90	4,94	3,45	5,20	7,02	5,68
T, млн лет	283±96	293±89	247±103	256±93	291±50	179±77	235±60	379±100	298±90	307±109	211±111	341±97	182±44	236±90	250±81
Средневзвешенное значение возраста монацитов, млн лет															
251±31															
Возраст, полученный методом изохроны, млн лет															
273±69															

16 анализов). Следует отметить, что большинство монацитов данной группы находится в тесном сростании с карбонатами (кальцитом и Се-паризитом), а также в контакте с флюоритом и кварцем.

В монацитах (La)-группы содержания Ce₂O₃ варьируются в пределах 27.73–28.72, при этом содержания La₂O₃ составляют 29.02–33.66 мас.% (табл. 1). Содержание примесных элементов по сравнению с (Ce)-разновидностью меньше и составляет в среднем Nd₂O₃ – 2.46, ThO₂ – 4.75, SiO₂ – 2.33, Pr₂O₃ – 0.86, CaO – 1.33 PbO – 0.07, UO₂

– 0.10 мас.%. Большой частью кристаллы монацита-(La) представляют собой отдельные кристаллы в контакте с апатитом, реже с флюоритом.

Возраст монацитов рассчитывали методом CHIME (chemical Th-U-total Pb isochron method: [7]). Использование данного метода обусловлено возможностью экспрессно решать задачи геохронологии, датируя акцессорные минералы непосредственно в шлифах. По полученным в 15 точках содержаниям Th, U и Pb были рассчитаны точечные возраста и значения ThO₂* (табл. 2),

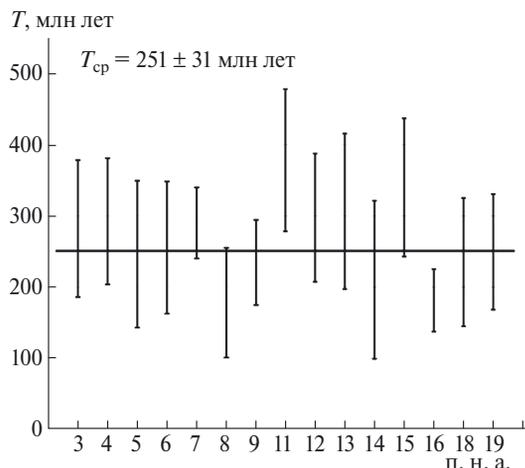


Рис. 4. Разброс точечных возрастов относительно средневзвешенного значения возраста исследуемых монацитов; п.н.а. — порядковый номер анализа, соответствующий табл. 4 (СКВО = 2,2; ошибка рассчитана по 2σ-критерию).

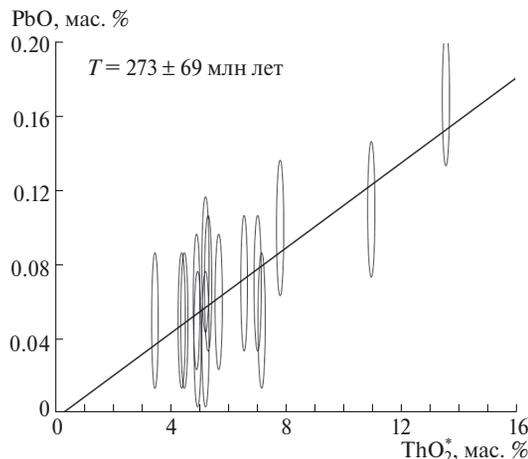


Рис. 5. Изохрона ThO_2^* -PbO, построенная методом СИМЕ, по результатам анализа монацитов методом ЭЗРСА (СКВО = 1; ошибка рассчитана по 2σ-критерию).

включающие в себя содержания ThO_2 и UO_2 , необходимые для построения изохроны. Результаты представлены в табл. 4. Разброс точечных возрастов относительно средневзвешенного значения возраста 251 ± 31 млн лет небольшой, значимых отклонений не наблюдается (рис. 4). Несмотря на то, что монациты неоднородны по составу, их точечные возраста близки. На основе рассчитанных значений ThO_2^* и PbO была построена изохрона в программе Isoplot 3.66 [12] с учетом ошибок определения ThO_2^* и PbO. Как видно на рис. 5, через все точки можно построить изохрону, которая описывается прямой линией. Возраст, рассчитанный методом изохроны, составил 273 ± 69 млн лет.

В геологическом строении Бурпалинского массива выделяется три фазы [3, 4]: ранняя (шонкиниты и меланократовые сиениты), главная (нефелиновые сиениты, пуласкиты и кварцевые сиениты) и жильная, в которую объединяют в том числе и редкометалльные пегматиты. Ранее были датированы породы главной фазы и один из представителей жильной [2, 3]. Редкометалльные пегматиты локализованы в массиве на трех участках и различаются по минеральному и химическому составу [3]. Одной из особенностей минерального состава изученных пегматитов является присутствие бритолита, который иногда образует крупные мономинеральные обособления. Интересно, что повышенные содержания бритолитового минала в апатитах характерно для брестеритовых карбонатитов массива, которые совместно с кварц-карбонатными

карбонатитами и апатит-флюоритовыми породами объединяются нами в отдельную фазу [13]. Таким образом, впервые полученный изохронный возраст 273 ± 69 млн лет по монациту из пегматитов Бритолитовой зоны Бурпалинского массива свидетельствует о том, что они внедрялись после редкометалльных пегматитов северо-западного участка и позволяет с определенной долей осторожности предположить существование нескольких этапов становления редкометалльных пегматитов в массиве.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают особую благодарность рецензентам статьи за советы и ценные научные рекомендации.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках тем НИР ИЭМ РАН № FMUF-2022-0001 и НИР ИГХ СО РАН № 0284-2021-008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vladykin N.V., Sotnikova I.A.* Geoscience Frontiers Petrology, geochemistry and source characteristics of the Burpala alkaline massif, North Baikal // *Geosci. Front.* 8 (2017) 711–719. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.04.006>.

2. *Котов А.Б., Владыкин Н.В., Ярмолюк В.В., Сальникова Е.Б., Сотникова И.А., Яковлева С.З.* Пермский возраст Бурпалинского щелочного массива (Северное Прибайкалье): геодинамические следствия // ДАН. 453 (2013) 295–299. <https://doi.org/10.7868/s0869565213330165>.
3. *Vladykin N.V., Sotnikova I.A., Kotov A.B., Yarmolyuk V.V., Sal'nikova E.B., Yakovleva S.Z.* Structure, age, and ore potential of the Burpala rare-metal alkaline massif, northern Baikal region // *Geol. Ore Depos.* 56 (2014) 239–256. <https://doi.org/10.1134/S1075701514040060>.
4. *Сотникова И.А.* Минералого-геохимические особенности редкометалльных щелочных пород Северного Прибайкалья / Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. Иркутск: ИГХ РАН, 2009.
5. *Clavier N., Podor R., Dacheux N.* Crystal chemistry of the monazite structure, *J. Eur. Ceram. Soc.* 31 (2011) 941–976. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.12.019>.
6. *Williams M.L., Jercinovic M.J., Hetherington C.J.* Microprobe monazite geochronology: Understanding geologic processes by integrating composition and chronology // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 35 (2007) 137–175. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140228>.
7. *Suzuki K., Adachi M., Kajizuka I.* Electron microprobe observations of Pb diffusion in metamorphosed detrital monazites // *Earth Planet. Sci. Lett.* 128 (1994) 391–405. <https://doi.org/10.1139/e90-152>.
8. *Montel J., Foret S., Veschambre M., Nicollet C., Provost A.* CHEMICAL Electron microprobe dating of monazite, 1 (1996).
9. *Parrish R.* U-Pb dating of monazite and its application to geological problems // *Can. J. Earth Sci.* 24 (1990) 1431–1450. <https://doi.org/10.1139/e90-152>.
10. *Meldrum A., Boatner L.A., Weber W.J., Ewing R.C.* Radiation damage in zircon and monazite // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 62 (1998) 2509–2520.
11. *Belyanin D.K., Karmanov N.S., Airiyants E.V., Zhmodik S.M.* The Application of Scanning Electron Microscopy Using Energy- and Wavelength Dispersive Spectrometers for Chemical Dating of Uranium Mineralization on the Example of Carbonaceous Shales of the Dabanzhalga Suite (East Sayan) // *Geodyn. Tectonophys.* 13 (2022) 1–7. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0604>.
12. *Ludwig K.R.* ISOPLOT/ A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkley Geochronology Center Sp. Publ., (1999) 1a. 49.
13. *Sotnikova I.A., Alymova N.V., Scherbakov Y.D.* Mineralogical and Geochemical Features of Apatite-Fluorite Rocks of the Burpala Massif in the Northern Baikal Region // *Geodyn. Tectonophys.* 13 (2022) 1–10. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-4-0657>.

CHEMICAL MICROPROBE Th-U-Pb AGE DATING OF MONAZITE FROM RARE-METAL PEGMATITES OF THE BURPALA MASSIF (NORTH BAIKAL)

A. V. Spivak^{a,#}, I. A. Sotnikova^b, A. A. Viryus^a, Academician of the RAS M. I. Kuzmin^b,
E. S. Zakharchenko^a, T. B. Kolotilina^b, N. V. Alymova^b

^aD.S. Korzhinsky Institute of Experimental Mineralogy, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russian Federation

^bA.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Irkutsk,
Russian Federation

[#]E-mail: spivak@iem.ac.ru

The chemical composition and zoning of monazite from a dike of rare-metal pegmatites of the Britholite zone of the Burpala massif (Northern Baikal region) was studied by electron probe microanalysis (EPMA). It has been established that monazites are represented by Ce and La varieties. Grains of monazite-(Ce) are characterized by an increased concentration of Nd₂O₃ and ThO₂ compared to monazite-(La). The weighted average age for monazites, determined by the U-Th-Pb CHIME method, was 251 ± 31 Ma. The age calculated by the isochrone method corresponds to 273 ± 69 Ma. The obtained age values of monazite indicate that the pegmatites of the Britholite zone were intruded after the pegmatites of the northwestern area and suggest the existence of several stages in the formation of rare-metal pegmatites in the massif.

Keywords: monazite, rare-metal pegmatites, Th-U-Pb method, Burpala massif, intraplate magmatism