

Раздел 2

ГЕОЛОГИЯ

Section 2

GEOLOGY

УДК 549.2/.8:548

**НЕКОТОРЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОНАЦИТА
ДАНИЛОВСКОГО ПЕГМАТИТОВОГО ПРОЯВЛЕНИЯ
ГОРНОГО АЛТАЯ**

А.И. Гусев, В.В. Дудина, Т.А. Зацепин

Алтайский государственный педагогический университет, г. Бийск,

E-mail: anzerg@mail.ru

В статье приведены первые данные о геохимических особенностях редкоземельного минерала монацита из пегматитов Даниловского проявления. Даниловское пегматитовое проявление локализуется в северной части Белокурихинского плутона, где отмечаются значительные рои редкометалльно-редкоземельных пегматитов, представляющих значительные перспективы в расширении сырьевой базы стратегических металлов региона. По современной классификации пегматиты Даниловского проявления относятся к семейству Nb>Ta-Y-F (NYF). Монацит встречается в дифференцированных пегматитах в крупно-блоковой зоне и микропегматитовой оторочке. По составу выделены две разновидности: более высокотемпературный монацит – (Ce), приуроченный к микропегматитовой оторочке и низкотемпературный монацит – (La), локализованный в крупно-блоковой зоне. Монацит – (Ce) в отличие от монацита – (La) характеризуется более высокими концентрациями Y, величинами Eu/Eu^ , Ce/Ce^* , Y/No и пониженными отношениями лёгких к средним и лёгких к тяжёлым редкоземельными элементами (РЗЭ). Он также имеет более высокие концентрации Be, V, Mn, Ga, W. В обеих разновидностях монацита проявлен тетрадный эффект фракционирования (ТЭФ) РЗЭ М-типа. Его величины значительно выше в монаците – (Ce). Последний кристаллизовался в условиях повышенной кислотности среды и в более окисленной обстановке. Отмечена высокая активность фтор-комплексов в пегматитовых флюидах.*

Ключевые слова: Горный Алтай; монацит; редкометалльные пегматиты; геохимические аспекты; редко-земельные элементы; рений; тетрадный эффект фракционирования М-типа.

DOI: 10.24412/2410-1192-2024-17303

Дата поступления: 25.05.2024. Принята к печати: 5.06.2024

Монацит является фосфатом редких ксенотим и титанит используются для земель (Ce, La, Pr, Nd, Th, Y)PO₄. Он определения абсолютного возраста также относится к концентраторам то- геологических образований [Asami et al., 2002; Liet al., 2013; Макеев et al., 2020; рия. Монацит, как циркон, алланит,

Jiao et al., 2020; Warr, 2021]. Монацит совместно с цирконом используются для расшифровки термометрических данных и термодинамического моделирования магматических образований [Krenn et al., 2012; Volante et al., 2020]. Высокая степень химической ёмкости монацита делает его прекрасным накопителем и регистратором рассеянных элементов в специфических магматических, метаморфических и рудоформирующих процессах. Накопление тяжёлых редкоземельных элементов и иттрия в монаците обусловлена коэффициентами распределения в расплавах между монацитом и гранатом [Jiao et al., 2021]. На некоторых месторождениях монацит является минералом, вмещающим значительные количества извлекаемых лёгких редкоземельных элементов [Bassona et al., 2016; Jonsson et al., 2016; Alves et al., 2019; Broom-Fendley et al., 2020]. Обычно монацит содержит в своём составе (%) около 45–48 церия, около 24 лантана, 17 неодима, 5 празеодима, европия 0.05 и небольшие количества самария, гадолиния и иттрия. Кроме того, он может содержать от 20 до 30% тория [Williams et al., 2007]. Такой обширный спектр элементов делает монацит одним из главных минералов – концентраторов редкоземельных элементов, которые извлекаются из него. В отечественной литературе публикации по монациту весьма редки.

В Горном Алтае монацит встречается в пегматитах Даниловского, Ручья Крутенького, Ручья Слепого (Белокурихинский плутон площадью более 320 км²), Ортиновой Сопки (Саввушинский массив), Башелака и его притоков (Талицкий массив гранитоидов

боровлянского комплекса), Челюшского и Тузуктинского (Прителечье) и других пегматитовых объектах региона. Актуальность изучения геохимических особенностей редкоземельных и редких элементов в монаците обусловлена тем, что в северной краевой части Белокурихинского плутона проявлены целые рой редкометалльно-редкоземельных пегматитов, в состав которых входят монацит, алланит, тортвейтит а по некоторым рекам отмечены россыпи монацита совместно с алланитом (реки Берёзовая, Черновая, Спирина, Даниловка).

Методы исследований

Определение химических элементов в монаците проводилось методом ICP-MS и ICP-AES в лаборатории ВСГЕИ (г. Санкт-Петербург). Термобарогеохимия рудообразования изучалась в двусторонне-полированных пластинках с рудообразующим кварцем методом гомогенизации газовой-жидких включений в Лаборатории ИМГРЭ (г. Москва).

Результаты и их обсуждение

Геологическая характеристика Даниловского проявления. Даниловское пегматитовое проявление расположено в истоках ручья Спирина, правого притока р. Даниловки. Оно приурочено к экзоконтактовой части лейкогранитов Осокинского массива, входящего в состав крупного Белокурихинского плутона (рис. 1), где отмечаются жилообразные тела альбит-микроклин-кварцевых пегматитов с мусковитом и аплит-пегматитов мощностью от 0.5 до 12 м и протяжённо-

стью от нескольких десятков метров до 150 м. Пегматиты локализуются в амфиболитах белокурихинского полиметаморфического комплекса. В мощных телах пегматитов проявлена зональность с кварцевым ядром, крупно-блоковой переходной частью и микропегматитовой оторочкой. Даниловские пегматиты отнесены к гранитным пегматитам, а по составу – к семейству Nb>Ta-Y-F (NYF) и алланит (ортит)-монацитовому типу, обогащённому лёгкими редкоземельными элементами (РЗЭ) [Гусев, Гусев, 2016].

Минералого-геохимическая характеристика монацита. Монацит в пегматитах Даниловского проявления встречается в хорошо дифференцированных зональных пегматитах. Он приурочен к двум зонам: 1 – блоковой зоне (шириной 1–1.5 м), сложенной микроклином с мусковитом, пиритом, алланитом, цоизитом и 2-микропегматитовой оторочке шириной 0.5–0.8 м. В крупно-блоковой части он образует отдельные кристаллы и гнёзда размером от 0.5 до 1.2 см. Здесь он ассоциирует с гранатом.

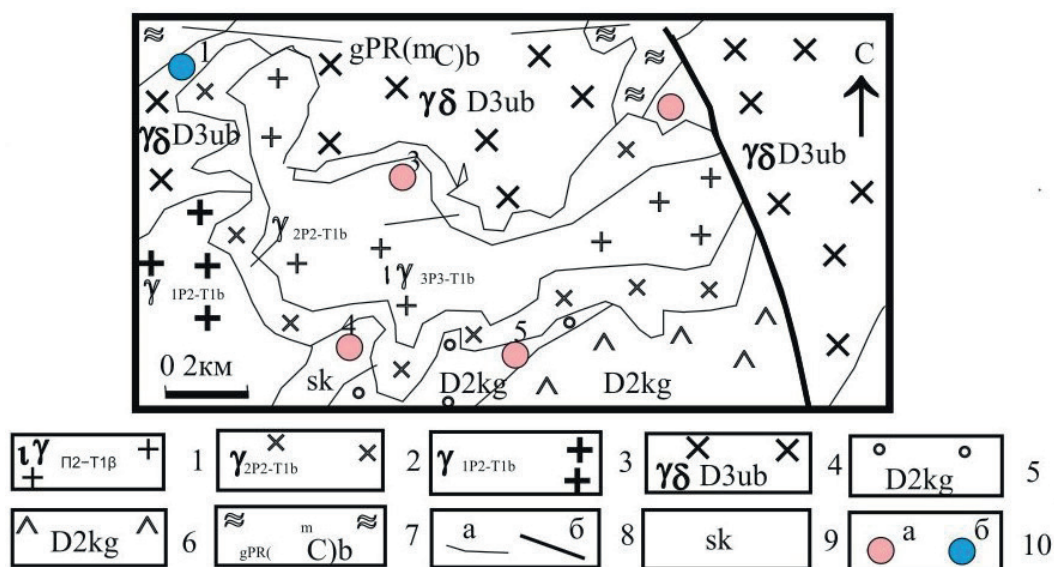


Рис. 1. Схематическая геологическая карта и полезные ископаемые района Осокинского штока (составлена автором с учётом данных В.А. Кривчикова).

Белокурихинский интрузивный комплекс: 1 – лейкограниты 3 фазы, 2 – граниты биотитовые и двуслюдяные 2 фазы, 3 – порфировидные граниты и гранодиориты 1 фазы; 4 – гранодиориты и кварцевые диориты усть-беловского комплекса; кужанская свита: 5 – конгломераты, песчаники, алевролиты; 6 – лавы андезитов, андезибазальтов, базальтов, дацитов, риолитов, туфов и туфолов среднего и кислого составов; 7 – гнейсы, кристаллические сланцы, амфиболиты белокурихинского полиметаморфического комплекса эпидот-амфиболитовой фации; 8 а – геологические границы, б – тектонические нарушения; 9 – скарны; 10 – месторождения и проявления полезных ископаемых: а – грейзеновые молибден-вольфрамовые (2 – Батунковское, 3 – Осинское, 4 – Щемилоское 1, 5 – Щемилоское 2); б – Даниловское тантал-ниобиевое пегматитовое

Fig. 1. Schematic geological map and useful minerals of district Osokin stock (it compiled by author with registration data V.A. Krivchikov).

Belokurikha intrusive complex: 1 – leucogranites of 3 phase, 2 – granites biotite and tow micas of 2 phase, 3 – porphyritic granites and granodiorites of first phase; 4 – granodiorites and quartz diorites of Ust-Belov complex; Kujagan suite: 5 – conglomerates, sandstones, aleurolites; 6 – lavas andecites, andeci-basalts, basalts, dacites rhyolites, tuffs and tuff-lavas of middle and acid compositions; 7 – gneiss, crystal slates, amphibolites of Belokurikha polymetamorphic complex of epidot-amphibolites facies; 8 a- geological boundary line, b – tectonic disturbances; 9 – skarns; 10 – deposits and manifestations of useful minerals: a – greizens molibden-tungsten (2 – Batunkov, 3 – Osinov, 4 – Schemilov 1, 5 – Schemilov 2); b – Danilov tantalium-niobium pegmatite

Чаще отмечается и в пределах микропегматитовой оторочки в виде вкрапленности размерами от 0.4 до 0.8 см. Такие крупные выделения монацита являются редкостью для пегматитов Горного Алтая. Минерал имеет коричневый цвет (рис. 2). В микропегматитовой оторочке монацит несколько темнее. Состав элементов-примесей в минерале показан в таблице.

На основании химизма кристаллов монацита разработана классификация разновидностей минерала с выделением [Ni et al., 1995]: монацита – (Ce) $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Th})\text{PO}_4$, монацита – (La) $(\text{La}, \text{Ce}, \text{Nd})\text{PO}_4$, монацита – (Nd), $(\text{Nd}, \text{La}, \text{Ce})\text{PO}_4$, монацита – (Sm), $(\text{Sm}, \text{Gd}, \text{Ce}, \text{Th})\text{PO}_4$, монацита – (Pr), $(\text{Pr}, \text{Ce}, \text{Nd}, \text{Th})\text{PO}_4$. По соотношениям редких земель составы монацита Даниловского проявления отнесены к двум разновидностям: монациту – (La) из крупно-блоковой части и монациту – (Ce) из краевой микропегматитовой оторочки. Характерной геохимической особенностью монацита Даниловского проявления являются очень высокие содержания сум-

мы редких земель – от 279529 до 362610 г/т при резком преобладании лёгких РЗЭ над средними и тяжёлыми. В спектр элементов повышенных концентраций входят также Y, Zr, Nb, Ta, Th, Pb. При этом монацит – (Ce) от монацита – (La) отличается в сторону несколько повышенных концентраций Y, а также более высоких величин Eu/Eu^* , Ce/Ce^* , Y/No и пониженных отношений лёгких к средним и лёгких к тяжёлым РЗЭ. Кроме того, монацит – (Ce) имеет более высокие концентрации Be, V, Mn, Ga, W, Re. Во всех пробах проявлен тетрадный эффект фракционирования (ТЭФ) РЗЭ М-типа. Его величины несколько выше в монаците – (Ce).

Обе разновидности монацита находятся в тесной ассоциации с кварцем. Более ранний монацит – (Ce) находится в парагенезисе с кварцем белым, гомогенизация газовой-жидких включений в котором происходила при более высоких температурах (610–590°C), чем дымчатого кварца крупно-блоковой части (560–570°C), с которым ассоциирует монацит – (La).

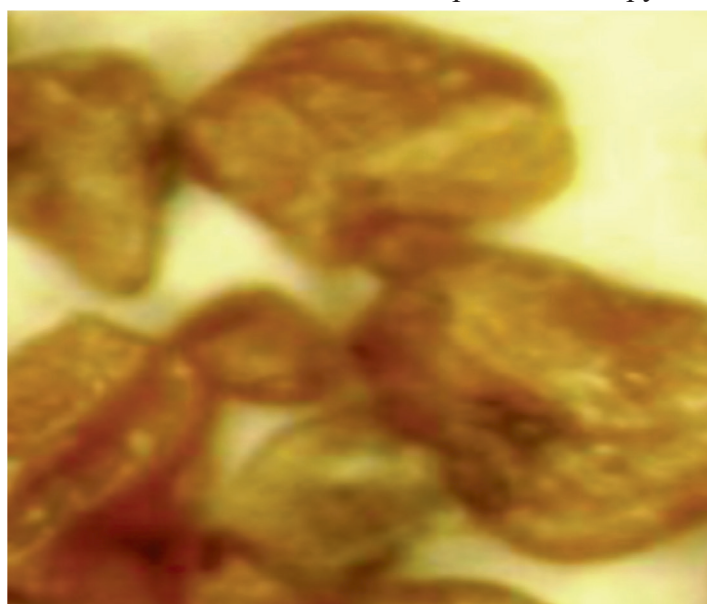


Рис. 2. Зёрна монацита: из микропегматитовой оторочки
Fig 2. Grains of monazites: from micro-pegmatite fringe

Таблица

Химический состав монацита (г/т) проявления Даниловское в Горном Алтае

Table

Chemical composition of monazite manifestation Danilov of Altay (ppm)

Компоненты	Номера проб								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Be	23.5	34.7	15.6	18.9	3.7	1.4	1.6	1.6	2.1
Ti	12.5	15.2	11.5	9.5	10.3	12	9.6	9.7	9.8
V	11.7	12.6	6.7	4.1	3.1	2.5	4.7	4.5	4.4
Cr	3.5	2.5	1.4	2.5	4.2	3.1	1.7	1.5	1.8
Mn	112	131	23.5	19.2	11.3	10	9.6	9.4	9.8
Co	2.7	3.1	1.6	1.2	1.3	1.5	1.8	1.6	1.9
Ni	0.8	2.6	0.7	0.5	0.9	1.0	1.4	1.3	1.2
Cu	13.6	11.4	4.6	5.0	3.1	2	4.9	5.2	5.4
Zn	11.8	13.1	8.4	8.1	10.3	5	6.4	6.1	6.0
Ga	43.7	45.1	55.1	51.7	36.1	25	25.5	25.2	24.9
Ge	6.5	8.7	8.4	5.7	3.7	2.4	3.7	3.5	4.0
Rb	10.2	6.8	7.1	9.2	5.3	3.1	4.3	4.1	4.4
Sr	9.5	5.1	5.2	7.5	8.3	5.5	6.3	6.1	6.2
Y	1926	1994	1892	1798	906	876	789	790	785
Zr	431.3	532.7	356	328	1326.7	1224	1156	1158	1160
Nb	501	497	365	341	458.6	346.5	487	487	490
Mo	6.2	8.1	7.1	6.2	4.5	2.6	3.0	3.0	3.3
Cs	11.6	13.7	4.2	2.2	4.7	0.3	4.4	4.2	4.3
Ba	9.3	10.1	7.1	6.1	6.3	3.7	4.2	4.2	5.0
La	55980	56103	57733	55638	56806	56798	123450	123490	125500
Ce	233107	235690	233670	233780	221327	221345	234560	234570	234640
Pr	545	555	345	302	206	210	306	315	318
Nd	867	903	783	773	465	453	689	685	690
Sm	131	120	127	130	119	121	135	140	142
Eu	82.3	81.4	79.5	78.1	85.3	87.6	67.5	65.5	66.3
Gd	176.3	177.2	178.3	181.7	265.8	256.7	199.5	200.0	202
Tb	20.1	19.5	22.6	21.8	19.4	18.6	25.2	26.2	27.1
Dy	132.1	134.6	118.8	119.2	121.6	119.4	123.7	124.7	125.6
Ho	12.5	12.2	13.6	13.3	11.1	10.5	12.5	11.5	11.9
Er	45.1	44.6	45.2	44.8	45.7	42.7	45.7	44.5	46.3
Tm	9.3	9.2	8.9	8.6	11.4	10.6	9.5	9.7	9.6
Yb	156.8	172.1	98.5	88.6	35.3	32.7	33.1	35.1	36.1
Lu	16.2	16.9	15.7	14.8	10.3	9.9	10.2	10.5	10.4
Hf	20.1	17.3	13.7	14.1	15.1	14.7	14.6	14.5	14.7
Ta	55.1	54.2	56.3	54.8	55.8	53.8	52.1	52.4	52.6
W	33.1	54.8	23.7	18.3	31.6	26	15.7	15.7	16.1
Pb	291	345	124.7	127.7	165	156.8	134.5	135.5	141.2
Th	893	945	867	880	332	325	455	453	460
U	20.1	22.6	21.5	25.7	16.0	15.5	17.5	19.5	20.3
Ag	1.2	1.4	2.0	1.5	1.6	1.0	1.4	1.4	1.6

Компоненты	Номера проб								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Sn	6.2	5.0	6.2	7.2	3.4	2.6	6.3	6.3	6.2
Sc	8.4	6.7	7.1	7.6	11.5	10.7	6.1	8.1	9.0
Re	18.3	22.1	17.8	19.3	21.4	22.8	11.2	9.3	8.8
$\Sigma P3Э$	291281	294039	293239	291193	279529	280392	359667	359728	362610
La/Sm _N	266.9	291.9	283.9	267.4	298.1	292.9	571.1	550.8	552.2
La/Yb _N	242.5	221.4	398.0	426.8	1094.4	1180.6	2528.6	2390.2	2364
Eu/Eu*	1.64	1.7	1.61	1.55	1.42	1.48	1.25	1.19	1.16
Ce/Ce*	3.14	3.17	3.08	3.2	2.97	2.98	1.46	1.46	1.32
TE _{1.3}	1.72	1.72	1.5	1.46	1.6	1.44	1.26	1.31	1.16
Y/Ho	154.1	163.4	139.1	135.2	81.6	83.4	63.1	68.6	65.9
Zr/Hf	21.4	30.8	26.0	23.3	87.9	83.3	79.2	79.9	82.8

Примечание. *Нормализация относительно хондрита проведена по [Mc Donough, Sun, 1995]. TE_{1.3} – тетрадный эффект фракционирования РЗЭ (среднее между первой и третьей тетрадами) по В. Ирбер [Irber, 1999]; Eu* = (SmN+GdN)/2; Ce* = (LaN+PrN)/2. Номера проб: 1–6 – монацит (Ce), 7–9 – монацит (La).

На хондрит-нормализованной диаграмме РЗЭ видны: 1 – согласованность распределения РЗЭ в обоих разновидностях монацита, 2 – слабо-проявленные позитивная европиевая и иттербиевая аномалии и отрицательная по гольмию, 3 – выпуклый характер кривых распределения, указывающих на ТЭФ РЗЭ М- типа (рис. 3).

Интерпретация результатов

Микроструктура монацита представлена полиэдрическим видом, где крупные ионы (Y, REE) скоординированы с 9 ионами кислорода, которые формируют иррегулярные полиэдры (рис. 4). Указанная микроструктура и определяет главные особенности изоморфизма в кристаллах монацита и количества редких земель и других элементов в монаците.

Экспериментальные исследования показали, что растворимость монацита и ксенотима сильно увеличивается с пералкалиновостью магматического расплава. Этот эффект обязан увеличению растворимости в ионной форме, которая

вероятно стабилизирует не мостоподобную форму атомов кислорода в расплаве. Фтор не является главным эффектом в растворимости монацита и ксенотима. Фактически растворимость указанных минералов слабо уменьшается с увеличением содержаний фтора. Растворимость редкоземельных фосфатов (монацита и ксенотима) не является простой функцией атомного номера или ионного радиуса редких земель. Растворимость показывает «тетрад»-подобную модель с несколькими локальными максимумами индивидуальных редких земель [Engi, 2017]. Известно, что лантанидный тетрадный эффект в некоторых высоко эволюционированных гранитах и пегматитах может быть результатом фракционирования монацита и ксенотима. Растворимость монацита и ксенотима в силикатных расплавах возможно показывает тетрадный эффект потому, что наблюдается очень необычная координация редкоземельных элементов в этих фосфатных минералах.

Однако в монаците пегматитов проявление тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ М-типа обусловлено наличием и активностью фтор-комплексных соединений в пегматитовых флюидах [Duc-Tin, Kerpler, 2015; Wu et al., 2002]. Способность редкоземельных элементов к комплексообразованию проявляется в случае не до конца заполненной электронной f -оболочки химических элементов. В присутствии ионов фтора и хлора происходят реакции обмена между ними и аква-комплексами, при этом в результате замещения молекулы воды в аква-комплексе ионом галогена могут образоваться комплексные ионы вида $\{Ln(H_2O)_x(F, Cl)_y\}^{(3-y)+}$ [Yurimoto et al., 1990], что и способствует проявлению ТЭФ РЗЭ М-типа.

Ярко проявленная положительная аномалия Се в монаците указывает на окислительные условия его кристаллизации [Коттон, Уилкинсон, 1969], связанные с тем, что коэффициенты распределения ионов Ce^{4+} и Ce^{3+} в системе «монацит-пегматитовый расплав» оптимальны в условиях повышенной фугитивности кислорода.

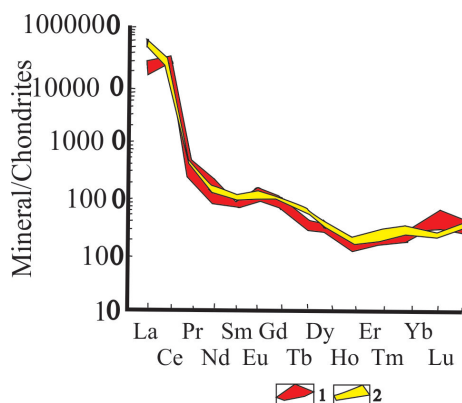


Рис. 3. Хондрит-нормализованное распределение РЗЭ в монацитах Даниловского проявления: 1 – для монацита – (Ce), 2 – для монацита – (La)
Fig. 3. Chondrite-normalized distribution of REE in monazite of Danilov manifestation: 1 – for monazite – (Ce), 2 – for monazite – (La)

При повышенной окислительной обстановке церий окисляется до Ce^{4+} и входит в решётку монацита изоморфно. В то же время Ce^{3+} некогерентен в кислом расплаве и требует дополнительных замещений в структуре монацита, что энергетически не выгодно.

Пегматиты Даниловки относятся к семейству Nb>Ta-Y-F (NYF), то есть они существенно ниобиевые. В этой связи возникает вопрос как соотносятся содержания Nb и величины ТЭФ РЗЭ в монаците. С этой целью построена диаграмма Nb – $TE_{1,3}$ (рис. 5).

На диаграмме виден тренд увеличения концентраций ниобия с возрастанием значений ТЭФ РЗЭ М-типа. Последний же обусловлен высокой активностью фтор-комплексов в пегматитовых флюидах.

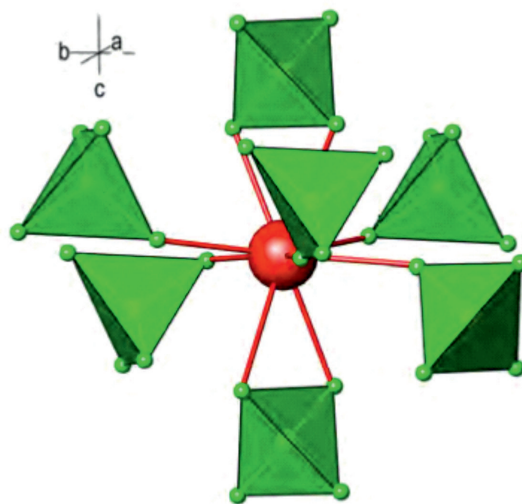


Рис. 4. Микроструктура монацита по [Engi, 2017]. Локальные микроструктуры REE – положений в монаците и тетраэдры фосфатов (PO4 – зелёные); крупные трёхвалентные ионы (Y, REE) показаны красным кружком и занимают иррегулярные (REE) O9 полиэдры, которые предпочтительно вмещают тяжёлые, лёгкие и средние редкие земли и Th4.
Fig. 4. Micro-structure of monazite after [Engi, 2017]. Local structure of REE-sites in monazite and (B). Phosphate (PO4) tetrahedral shown in green. The large trivalent ion (red sphere) in monazite occupies an irregular (REE)O9 polyhedron that preferentially accommodates the larger, light to middle REE and Th4.

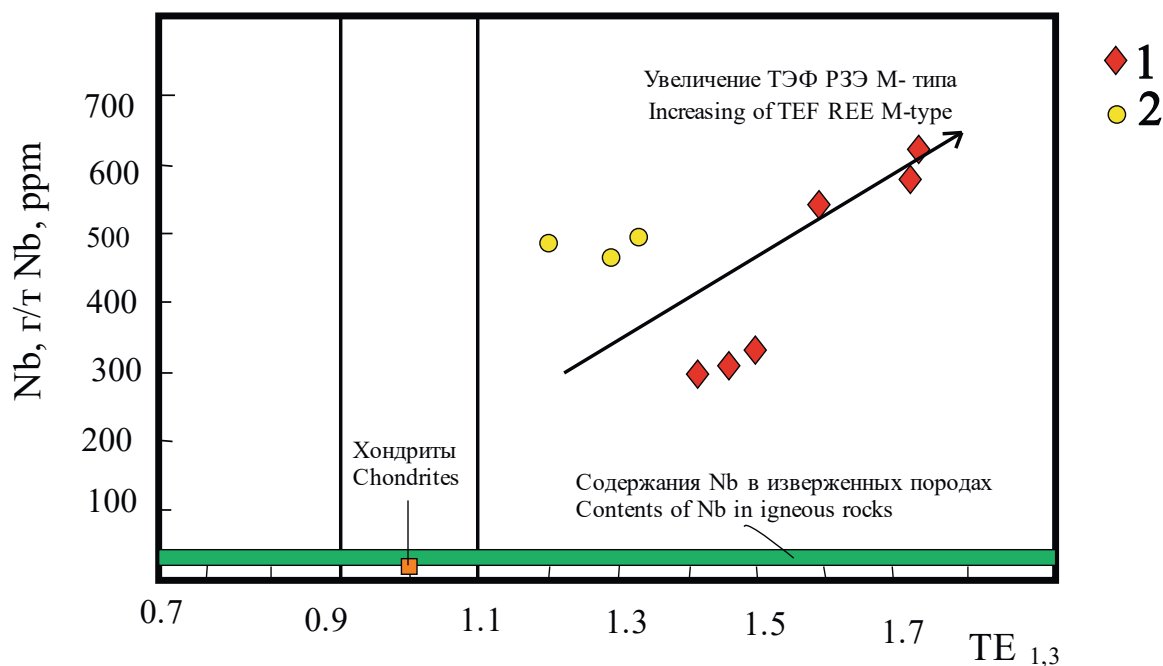


Рис. 5. Диаграмма Nb – TE_{1,3} для монацитов Даниловского проявления. Содержания Nb в изверженных породах по [Hinton, Upton, 1991]. Среднее содержание Nb в хондритах по [Виноградов, 1962].

1 – пробы монацита – (Ce), 2 – пробы монацита – (La)

Fig. 5. Plot Nb – TE_{1,3} for monazites of Danilov manifestation. Contents of Nb in an igneous rocks after [Hinton, Upton, 1991]. Average concentration of Nb in chondrites after [Виноградов, 1962].

1 – probes of monazite – (Ce), 2 – probes of monazite – (La)

По соотношениям Y/No – Zr/Hf все пробы монацита попадают в поле неподчинения заряд-радиус – поведения химических элементов (рис. 6), что связано с проявлением очень высоких значений ТЭФ РЗЭ М-типа.

На диаграмме Eu/Eu* – TE_{1,3} наблюдается также увеличение значений Eu/Eu* с повышением величин ТЭФ РЗЭ М-типа (рис. 7).

Установлено, что увеличение значений Eu/Eu* при проявлении ТЭФ РЗЭ М-типа согласно рядам кислотности-щелочности элементов по [Bau, Dulski, 1995] спектра элементов Sm, Gd, Eu в водно-сероводородных растворах при стандартных условиях отвечает повышению кислотности среды. Следовательно, среда при кристаллизации монацита, при которой происходило

увеличение содержаний ниобия в монаците пегматитов Даниловского проявления, помимо, высокой окисленности обстановки, характеризовалась и увеличением кислотности среды.

Снижение концентраций Y в монаците-La, кристаллизовавшемся при значительно более низких температурах, отвечают и уменьшению величин ТЭФ РЗЭ, что указывает на снижение активности фтор-комплексов на стадии кристаллизации крупно-блоковых пегматитов. Установлено, что с падением температуры выделения монацита и снижения концентраций иттрия происходило в результате кристаллизации ксенотима, а также за счёт высвобождения Y в породо-образующие силикаты (гранат и другие) [Маракушев, 1976].

Заключение

По минералого-геохимическим особенностям монацит пегматитов Даниловского проявления находится в 2 разновидности: 1 – ранней и более высокотемпературной разновидности монаците – (Ce), сформировавшейся в микропегматитовой оторочке и 2-поздней разновидности (монаците – (La), представленной в крупно-блоковой части зональных пегматитов, тесно ассоциирующим с дымчатым кварцем с более низкой температурой кристаллизации.

Монацит - (Ce) отличается от монацита – (La) несколько повышенными концентрациями Y, а также более высокими величинами Eu/Eu*, Ce/Ce*, Y/No и

пониженными отношениями лёгких к средним и лёгких к тяжёлым РЗЭ. Кроме того, монацит – (Ce) имеет более высокие концентрации Be, V, Mn, Ga, W, Re. В редкоземельном фосфате проявлен тетрадный эффект фракционирования (ТЭФ) РЗЭ М-типа. Его величины несколько выше в монаците – (Ce). Наблюдается положительная корреляция концентраций Nb и ТЭФ РЗЭ М-типа, свидетельствующая о высокой активности фтор-комплексов в пегматитовых флюидах. Физико-химические условия кристаллизации монацита характеризовались высокой окисленностью обстановки и увеличением кислотности среды, особенно при отложении монацита – (Ce).

Конфликт интересов. Авторы заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interests.

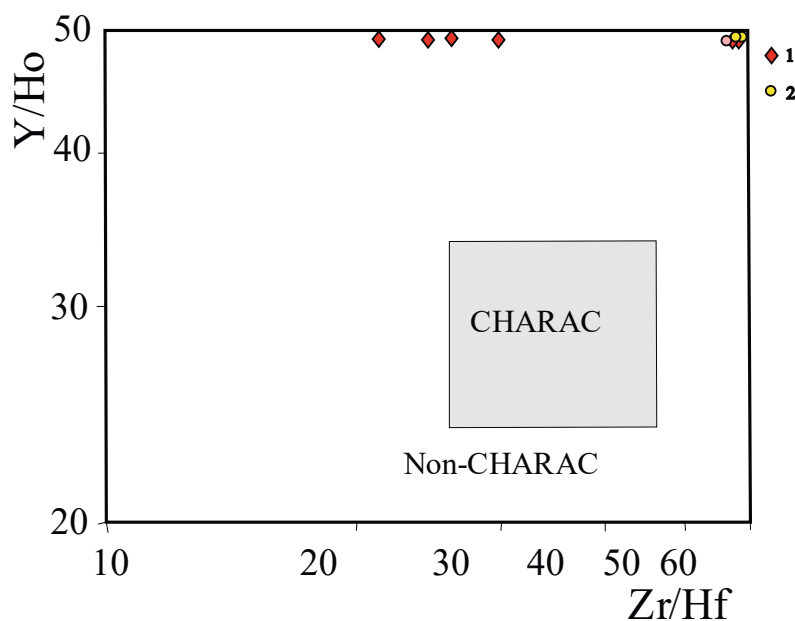
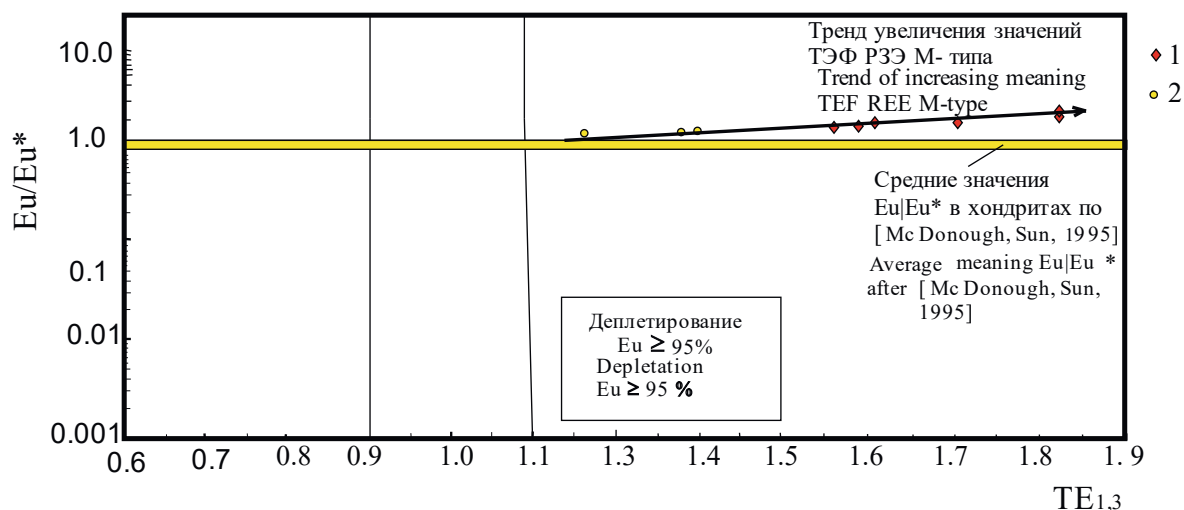


Рис. 6. Диаграмма Y/No – Zr/Hf по [Wasson, Kallemeyn, 1988] для монацитов Даниловского проявления. CHARAC – поле заряд-радиус – контролируемое поведение элементов; Non-CHARAC – поле не подчинения заряд-радиус-контролируемого поведения элементов. Условные обозначения как на рис. 5.

Fig.6. Plot Y/No – Zr/Hf after [Wasson, Kallemeyn, 1988] for monazite of Danilov manifestation. CHARAC – field of charge-radius behavior of elements; Non-CHARAC- field of non -charge-radius behavior of elements.

Legend is on fig. 5.

Рис. 7. Диаграмма Eu/Eu* – TE_{1,3} для монацитов Даниловского проявления.

Уловные обозначения как на рис. 5.

Fig. 7. Plot Eu/Eu* – TE_{1,3} for monazite of Danilov manifestations. Legend is on fig. 5.

Список литературы

Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–572.

Гусев А.И., Гусев Н.И. Геохимия руд и минералов пегматитового проявления Даниловского (Горный Алтай) // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. №.10, вып.1. С.102–107.

Коттон Ф., Уилкинсон Дж. Современная неорганическая химия. Общая теория. М.: Мир, 1969. 224 с.

Макеев А.Б., Скублов С.Г., Красоткина А.О., Борисовский С.Е., Томсен Т.Б., Серре С.Х. Возраст монацита из рудопроявления Ичетью // Записки РМО. 2020. Ч. CXLIX. № 1. С. 76–95. doi: 10.31857/S0869605520010086

Маракушев А.А. Термодинамические факторы образования рудной зональности // Термодинамические факторы образования рудной зональности скрытого оруденения на основе зональности гидротермальных месторождений. М.: Наука, 1976. Р. 36–51.

Alves F.E.A., Ávila C.A., Neumann R., Faulstich F. Monacite (Ce) and xenotime - (Y) microinclusions in fluorapatite of the pegmatites from Volta Grande mine, Minas Gerais, Southern Brazil, as witness of the dissolution-reprecipitation process // Mineralogical magazine. 2019. Vol. 83. P. 595–606. doi: 10.1180/mgm.2019.43

Asami A., Suzuki K., Grew E. Chemical Th–U–total Pb dating by electron microprobe analysis of monazite, xenotime and zircon from the Archean Napier Complex, East Antarctica: evidence for ultra-high-temperature metamorphism at 2400 Ma // Precambrian Research. 2002. Vol. 114. P. 249–275.

Bassona J., Muntingh J.A., Jellicoe B.C., Anthonissen C.J. Structural interpretation of the Steenkampskraal monazite deposit, Western Cape, South Africa // Journal of African Earth Sciences, 2016. Vol. 121. P. 301–315. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2016.05.027

Bau M., Dulski P. Comparative study of yttrium and rare-element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1995. Vol. 119. P. 213–223.

Broom-Fendley S., Loye E., Pickles J.R., Wall F., Smith M.P., Ray S., Andrade M.B., Banks D.A., Atencio D. Sulfur-bearing monazite (Ce) from the Eureka carbonatite, Namibia: oxidation state, substitution mechanism, and formation conditions // *Mineralogical magazine*. 2020. Vol. 84. P. 35–48. doi: 10.1180/mgm.2019.79

Duc-Tin Q., Keppler H. Monazite and xenotime solubility in granitic melts and the origin of the lanthanide tetrad effect // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2015. Vol. 169. P. 8–25. doi: 10.1007/s00410-014-1100-9

Engi M. Petrochronology Based on REE-Minerals: Monazite, Allanite, Xenotime, Apatite // *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. 2017. Vol. 83. P. 365–418.

Hinton R.W. Upton G.J. The chemistry of zircon: variation within and between large crystals from syenite and alkali basalt xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991. Vol. 55. P. 3287–3302.

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. Vol. 63. P. 489–508.

Jiao S., Evans N., Mitchell R.N., Fitzsimons I.C.W. Heavy rare-earth element and Y partitioning between monazite and garnet in aluminous granulites // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2021. Vol. 176. P. 7–29. doi: 10.1007/s00410-021-01808-2

Jiao Sh., Fitzsimons I.C.W., Zi J.W., Evans N.J., McDonald B.J. Texturally Controlled U–Th–Pb Monazite Geochronology Reveals Paleoproterozoic UHT Metamorphic Evolution in the Khondalite Belt, North China Craton // *Journal of Petrology*, 2020. Vol. 61. Ega023. doi: 10.1093/petrology/egaa023

Jonsson E., Harlov D.E., Majka J., Högdahl K., Persson-Nilsson K. Fluorapatite-monazite-allanite relations in the Grängesberg apatite-iron oxide ore district, Bergslagen, Sweden // *American Mineralogist*. 2016. Vol. 101. P. 1769–1782.

Krenn E., Harlov D.E., Finger F., Wunder B. LREE-redistribution among fluorapatite, monazite, and allanite at high pressures and temperatures // *American Mineralogist*, 2012. Vol. 97. P. 1881–1890. doi: 10.2138/am.2012.40051881

Li Q.L., Li X.H., Lan Z.W., Guo C.L. et al. Monazite and xenotime U–Th–Pb geochronology by ion microprobe: dating highly fractionated granites at Xihuashan tungsten mine, SE China // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2013. Vol. 166. P. 65–80.

Mc Donough W.F., Sun S. The composition of the Earth // *Chem. Geol.* 1995. Vol. 120. P. 223–253.

Ni Yu., Hucges J., Mariano A.M. Crystal chemistry of the monazite and xenotime structures // *American Mineralogist*. 1995. Vol. 80. P. 21–26.

Volante S., Collins W.J., Blereau E., Pourteau A., Spencer C., Evans N.J., Barroto V., Nordsvan A.R., Li Z.-X., Li J. Reassessing zirconmonazite thermometry with thermodynamic

modelling: insights from the Georgetown igneous complex, NE Australia // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2020. Vol. 175. P. 110–142. doi: 10.1007/s00410-020-01752-7

Warr L.N. IMA–CNMNC approved mineral symbols // *Mineralogical Magazine*. 2021. Vol. 85. P. 291–320. doi: 10.1180/mgm.2021.43.

Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Mean composition of the chondrite groups // *Phil. Trans. R. Soc. London*. 1988 Vol. 5. P. 535–544.

Williams M., Jercinovic M., Hetherington C. Microprobe Monazite Geochronology: Understanding Geologic Processes by Integrating Composition and Chronology // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2007. Vol. 35. P. 137–175. doi: 10.1146/annurev.earth.35.031306.140228

Wu F., Sun D., Li H et al. Tetrad effect in pattern of REE in pegmatite and granite of S. Dakota // *Chem. Geol.* 2002. Vol. 187. P. 143–173.

Yurimoto H., Duke E.F., Oparike J.J., Shearer C.K. Are discontinuous chondrite-normalized REE patterns in pegmatic granite systems the results of monazite fractionation? // *Geochim Comochim Acta*. 1990. Vol. 54. P. 2141–2145.

References

Vinogradov A.P. Srednie sodержaniya himicheskikh elementov v glavnykh tipah izverzhennykh porod zemnoj kory [Average contents of chemical elements in the main types of eruptive rocks of the Earth's crust] // *Geohimiya [Geochemistry]*. 1962. No. 7. P. 555–572. (in Russian).

Gusev A.I., Gusev N.I. Geohimiya rud i mineralov pegmatitovogo proyavleniya Danilovskogo (Gornyy Altaj) [Geochemistry of ores and minerals of the Danilovsky pegmatite occurrence (Gorny Altai)] // *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanij [International Journal of Applied and Fundamental Research]*. 2016. No. 10, is. 1. P. 102–107. (in Russian).

Kotton F., Uilkinson Dzh. Sovremennaya neorganicheskaya himiya. Obshchaya teoriya [Modern inorganic chemistry. General theory]. M.: Mir, 1969. 224 p. (in Russian).

Makeev A.B., Skublov S.G., Krasotkina A.O., Borisovskij S.E., Tomsen T.B., Serre S.H. Vozrast monacita iz rudoproyavleniya Ichet'yu [Age of monazite from the Ichetyu ore occurrence] // *Zapiski RMO [Notes RMO]*. 2020. Is. CXLIX. No. 1. C. 76–95. doi: 10.31857/S0869605520010086. (in Russian).

Marakushev A.A. Termodinamicheskie faktory obrazovaniya rudnoj zonal'nosti [Thermodynamic factors of ore zonality formation] // *Termodinamicheskie faktory obrazovaniya rudnoj zonal'nosti skrytogo orudeneniya na osnove zonal'nosti gidrotermal'nykh mestorozhdenij [Thermodynamic factors of ore zonality formation of hidden mineralisation on the basis of zonality of hydrothermal deposits]*. M.: Nauka, 1976. P. 36–51. (in Russian).

Alves F.E.A., Ávila C.A., Neumann R., Faulstich F. Monacite (Ce) and xenotime – (Y) microinclusions in fluorapatite of the pegmatites from Volta Grande mine, Minas Gerais, Southern Brazil, as witness of the dissolution-reprecipitation process // *Mineralogical magazine*. 2019.

Vol. 83. P. 595–606. doi: 10.1180/mgm.2019.43

Asami A., Suzuki K., Grew E. Chemical Th–U–total Pb dating by electron microprobe analysis of monazite, xenotime and zircon from the Archean Napier Complex, East Antarctica: evidence for ultra-high-temperature metamorphism at 2400 Ma // *Precambrian Research*. 2002. Vol. 114. P. 249–275.

Bassona J., Muntingh J.A., Jellicoe B.C., Anthonissen C.J. Structural interpretation of the Steenkampskraal monazite deposit, Western Cape, South Africa // *Journal of African Earth Sciences*, 2016. Vol. 121. P. 301–315. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2016.05.027

Bau M., Dulski P. Comparative study of yttrium and rare-element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1995. Vol. 119. P. 213–223.

Broom-Fendley S., Loye E., Pickles J.R., Wall F., Smith M.P., Ray S., Andrade M.B., Banks D.A., Atencio D. Sulfur-bearing monazite (Ce) from the Eureka carbonayie, Namibia: oxidation state, substitution mechanism, and formation conditions // *Mineralogical magazine*. 2020. Vol. 84. P. 35–48. doi: 10.1180/mgm.2019.79

Duc-Tin Q., Keppler H. Monazite and xenotime solubility in granitic melts and the origin of the lanthanide tetrad effect // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2015. Vol. 169. P. 8–25. doi: 10.1007/s00410-014-1100-9

Engi M. Petrochronology Based on REE-Minerals: Monazite, Allanite, Xenotime, Apatite // *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. 2017. Vol. 83. P. 365–418.

Hinton R.W. Upton G.J. The chemistry of zircon: variation within and between large crystals from syenite and alkali basalt xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991. Vol. 55. P. 3287–3302.

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 Comochim Acta*. 1999. Vol. 63. P. 489–508.

Jiao S., Evans N., Mitchell R.N., Fitzsimons I.C.W. Heavy rare-earth element and Y partitioning between monazite and garnet in aluminous granulites // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2021. Vol. 176. P. 7–29. doi: 10.1007/s00410-021-01808-2

Jiao Sh., Fitzsimons I.C.W., Zi J.W., Evans N.J., Mcdonald B.J. Texturally Controlled U–Th–Pb Monazite Geochronology Reveals Paleoproterozoic UHT Metamorphic Evolution in the Khondalite Belt, North China Craton // *Journal of Petrology*, 2020. Vol. 61. Egaa023. doi: 10.1093/petrology/egaa023

Jonsson E., Harlov D.E., Majka J., Högdahl K., Persson-Nilsson K. Fluorapatite-monazite-allanite relations in the Grängesberg apatite-iron oxide ore district, Bergslagen, Sweden // *American Mineralogist*. 2016. Vol. 101. P. 1769–1782.

Krenn E., Harlov D.E., Finger F., Wunder B. LREE-redistribution among fluorapatite, monazite, and allanite at high pressures and temperatures // *American Mineralogist*, 2012. Vol. 97. P. 1881–1890. doi: 10.2138/am.2012.4005 1881

Li Q.L., Li X.H., Lan Z.W., Guo C.L. et al. Monazite and xenotime U–Th–Pb geochro-

nology by ion microprobe: dating highly fractionated granites at Xihuashan tungsten mine, SE China // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2013. Vol. 166. P. 65–80.

Mc Donough W.F., Sun S. The composition of the Earth // Chem. Geol. 1995. Vol. 120. P. 223–253.

Ni Yu., Huges J., Mariano A.M. Crystal chemistry of the monazite and xenotime structures // American Mineralogist. 1995. Vol. 80. P. 21–26.

Volante S., Collins W.J., Blereau E., Pourteau A., Spencer C., Evans N.J., Barrote V., Nordsvan A.R., Li Z.-X., Li J. Reassessing zirconmonazite thermometry with thermodynamic modelling: insights from the Georgetown igneous complex, NE Australia // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2020. Vol. 175. P. 110–142. doi: 10.1007/s00410-020-01752-7

Warr L.N. IMA–CNMNC approved mineral symbols // Mineralogical Magazine/ 2021. Vol. 85. P. 291–320. doi: 10.1180/mgm.2021.43.

Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Mean composition of the chondrite groups // Phil. Trans. R. Soc. London. 1988 Vol. 5. P. 535–544.

Williams M., Jercinovic M., Hetherington C. Microprobe Monazite Geochronology: Understanding Geologic Processes by Integrating Composition and Chronology // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2007. Vol. 35. P. 137–175. doi: 10.1146/annurev.earth.35.031306.140228

Wu F., Sun D., Li H et al. Tetrad effect in pattern of REE in pegmatite and granite of S. Dakota // Chem. Geol. 2002. Vol. 187. P. 143–173.

Yurimoto H., Duke E.F., Opapike J.J., Shearer C.K. Are discontinuous chondrite-normalized REE patterns in pegmatic granite systems the results of monazite fractionation? // Geochim Comochim Acta. 1990. Vol. 54. P. 2141–2145.

SOME GEOCHEMICAL ASPECTS OF MONAZITE DANILOV PEGMATITE MANIFESTATION OF GORNY ALTAI

A.I. Gusev, V.V. Dudina, T.A. Zatsepin

Altai State Pedagogical University, Biisk,

E-mail: anzerg@mail.ru

The new first data on geochemical peculiarities rare earth elements mineral of monazite from pegmatites of Danilov manifestation lead in paper. Danilov's pegmatite manifestation localized in the north of part Belokurikha pluton/ where mark considerable swarms rare elements - rare earth elements pegmatites, occurring large perspective in enlargement of raw materials strategic metals of region. On the modern classification pegmatites of Danilov manifestation refer to family Nb>Ta-Y-F (NYF). Monazite meet in differentiated pegmatites in large-block zone and micro-pegmatite girdle. On the composition detached two variety: more high temperature monazite – (Ce), accustomed to micro-pegmatite girdle and low temperature monazite – (La), localized in large-block zone. Monazite – (Ce) in distinction from monazite – (La) charac-

terized more by high concentrations Y, by sizes Eu/Eu^* , Ce/Ce^* , Y/Ho and decrease ratio light to middle and light to heavy REE. It has so more high concentrations of Be, V, Mn, Ga, W, Re. Tetrad effect fractionation (TEF) REE M-type display in in both varieties of monazite. Sizes of TEF is considerable high in monazite – (Ce). Last crystallized in conditions high acidity and in more oxidized situation. High activity of F-complex in pegmatite fluids marked.

Key words: Gorny Altai; monazite; rare metal pegmatites; geochemical aspects; rare earth elements; rhenium; tetrad effect fractionation REE M-type.

Received May 25, 2024. Accepted: June 5, 2024

Сведения об авторах

Гусев Анатолий Иванович – доктор геолого-минералогических наук, профессор Алтайского государственного педагогического университета. Бийский филиал им. В.М. Шукшина. Россия, 659300, г. Бийск, ул. Советская, д. 5. ORCID: 0000-0001-7840-0272. E-mail: anzerg@mail.ru.

Дудина Валерия Вячеславовна – научный работник Лаборатории петрологии и металлогении золота Алтайского государственного педагогического университета. Бийский филиал им. В.М. Шукшина. Россия, 659300, г. Бийск, ул. Советская, д. 5.

Зацепин Тимофей Алексеевич – научный работник Лаборатории петрологии и металлогении золота Алтайского государственного педагогического университета. Бийский филиал им. В.М. Шукшина. Россия, 659300, г. Бийск, ул. Советская, д. 5.

Information about the author

Gusev Anatolij Ivanovich – Doctor geology-mineralogical sciences, professor of Altai State Pedagogical University. Biysk branch named after V.M. Shukshin. 5, Sovetskaya St., 659300 Biisk, Russia. ORCID: 0000-0001-7840-0272. E-mail: anzerg@mail.ru.

Dudina Valeriya Vyacheslavovna – science worker of Laboratory petrology and metallogeny of gold of Altai State Pedagogical University. Biysk branch named after V.M. Shukshin. 11, Sovetskaya St., 659300 Biisk, Russia.

Zatsepin Timofey Alekseevich – science worker of Laboratory petrology and metallogeny of gold of Altai State Pedagogical University. Biysk branch named after V.M. Shukshin. 11, Sovetskaya St., 659300 Biisk, Russia.