

УДК 549.2/.8:548

DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-2-4

**МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЦИРКОНА  
КУМИРСКОГО ГРАНИТНОГО ШТОКА ГОРНОГО АЛТАЯ****А.И. Гусев***Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукшина,  
г. Бийск, Алтайский край, 659333 Россия; anzerg@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 14.01.2022 г., принята к печати 10.04.2022 г.

**MINERALOGICAL-GEOCHEMICAL FEATURES OF ZIRCON  
FROM THE KUMIR GRANITIC STOCK, GORNY ALTAI****A.I. Gusev***Shukshin Altai State University for Humanities and Pedagogy, Biysk, Altay krai, 659333 Russia;  
anzerg@mail.ru*

Received 14.01.2022, accepted 10.04.2022

**Аннотация.** В работе впервые приведены данные по U-Pb возрасту и составу циркона Кумирского штока гранитоидов и связанных с ними грейзенов в Горном Алтае. Выявлены закономерности изменения главных и редких элементов в магматогенных, метамиктных и пневматолито-гидротермальных цирконах. В указанной последовательности в составе минерала увеличивается содержание высокочarged элементов (U, Nb, Sc, PЗЭ) и уменьшаются соотношения Eu/Eu\* и Ce/Ce\*. В зависимости от состава и активности летучих компонентов во флюидах и фугитивности кислорода менялись соотношения PЗЭ и степень их дифференциации, что отразилось на особенностях проявления тетрадного эффекта фракционирования PЗЭ M- и W-типов.

**Ключевые слова:** циркон, высокочarged элементы, U, Nb, Sc, PЗЭ, тетрадный эффект.

**Abstract.** Data on U-Pb age and composition of zircon from the Kumor granitic stock (Gorny Altai) and related greisens are presented for the first time. The magmatic, metamictic and pneumatolytic-hydrothermal zircons exhibit specific changes in main and trace elements with an increasing content of the high-field strength elements (U, Nb, Sc, REE) and decreasing Eu/Eu\* and Ce/Ce\* ratios. Depending on the composition and activity of volatiles in fluids and O fugacity, the REE contents and their ratios varied that is reflected on the tetrad effect of REE fractionation of M- and W- types.

**Keywords:** zircon, high-field strength elements, U, Nb, Sc, REE, tetrad effect of REE fractionation.

**Для цитирования:** Гусев А.И. Минералого-геохимические особенности циркона Кумирского гранитного штока Горного Алтая. Минералогия, 8(2), 37–48. DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-2-4

**For citation:** Gusev A.I. Mineralogical-geochemical features of zircon from the Kumor granitic stock, Gorny Altai. Mineralogy, 8(2), 37–48. DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-2-4.

**Введение**

Известно, что циркон  $ZrSiO_4$  обнаруживается в широком ряду изверженных кислых пород от пералюминиевых до паралкалиновых (Dai et al., 2011;

Liu et al., 2006). Он также является химически и физически устойчивым акцессорным минералом, который также найден в метаморфических (Sláma et al., 2007; Wang, Griffen, 2004) и осадочных породах (Anthony et al., 2003; Shao et al., 2016; Zhou

et al., 2015). Циркон является ключевым минералом для понимания геологической истории Земли (Cherniak, Watson, 2003) благодаря двум важным характеристикам: 1) он содержит многочисленные геохимически индикаторные элементы, такие как высокочargedные, редкоземельные (РЗЭ) и радиоактивные (U, Th) (Fourcade, Allegre, 1981; Gromet, Silver, 1983; Harrison et al., 2006), которые обладают противоположным поведением во время магматической кристаллизации (Belousova et al., 2002); и 2) он широко используется в геохронологии, в частности, U-Th-Pb датировании (Williams, 1998).

С Кумирским штоком гранитоидов в Горном Алтае пространственно и парагенетически связано комплексное Кумирское скандий-уран-редкоземельное месторождение. По запасам Sc и РЗЭ оно относится к крупным объектам мирового класса (Гусев, Гусев, 2020). В аляскитовых эгирин-рибекитовых гранитах штока присутствуют магматические и метамиктные цирконы, а в грейзенах Кумирского месторождения фиксируется и гидротермальный циркон. В этой связи стало целесообразным исследовать состав элементов-примесей указанных цирконов и выявить закономерности их поведения в ряду от магматического процесса до пневматолито-гидротермального.

#### Аналитические методы

Магматогенный и метамиктный цирконы изучены в образцах аляскит-порфиров (КМ-1), пневматолито-гидротермальный циркон изучен в образце кварц-мусковитового грейзена с бериллом и турмалином (Км-1). Пробоподготовка и изотопно-геохронологические исследования выполнены в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург). Изотопные измерения проводились по классической методике (Williams, 1998) на вторично-ионном микрозонде SHRIMP-II. При выборе участков для анализа использовались оптические и катодолюминесцентные наблюдения. U-Pb отношения были нормированы на значение 0.0668 по стандарту Темога, что отвечает возрасту 416.75 млн лет. Погрешность измерений единичных анализов составила  $1\sigma$ , для расчетных конкордантных возрастов и их пересечений с конкордией –  $2\sigma$ . Графики были построены в программе ISOPLOT/EX. Нормирование редких элементов и РЗЭ на спайдер-диаграммах проведено по составу примитивной мантии и хондрита, CI, соответственно (McDonough, Sun, 1995). Микроэлементный со-

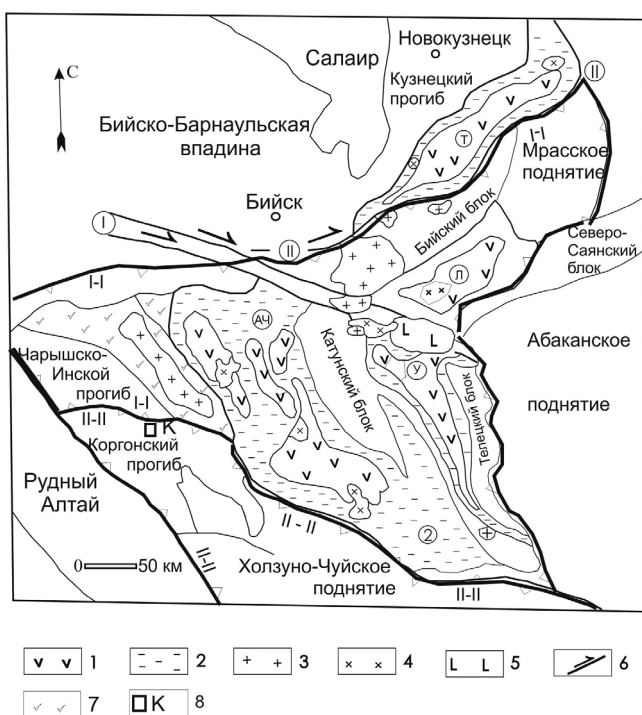
став циркона исследован методом ЛА ИСП МС с использованием масс-спектрометра ELEMENT в комплексе с лазерной приставкой UP-213, Nd:YAG фирмы New Wave Research в Аналитическом центре Института геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск). Порог обнаружения элементов, в среднем, 10 мг/г.

#### Геологическое строение участка и состав Кумирского штока

Кумирский шток гранитоидов входит в одноименное рудное поле, расположенное в пределах Холзунско-Чуйского тектонического блока и приурочено к наложенной Коргонской вулканоплутонической структуре (ВТС) (Коргонский прогиб) (рис. 1).

В Коргонской ВТС вулканический разрез имеет трехчленное строение. Нижним членом разреза является ергольская свита ( $O_2$ ), сложенная доминирующими пестроцветными лавами, туфами андезитов, андезибазальтов, базальтов, редко андезидацитов и дацитов. Значительно меньшие объемы занимают пирокластические и вулканогенно-терригенные образования. Мощность свиты составляет 1550 м. Среднюю часть разреза занимают отложения кумирской свиты ( $O-S?$ ), сложенной песчаниками, алевролитами, сланцами, известняками (в том числе, микритовыми), среди которых отмечаются линзы и прослои лав и туфов андезитов, андезибазальтов, дацитов, риодацитов и риолитов. Мощность кумирской свиты варьирует от 500 до 2800 м. Верхним членом разреза является коргонская свита ( $D_{1-2}$ ), представленная пестро-окрашенными спекшими туфами и туфолавами дацитов, риодацитов и риолитов. Общая мощность коргонской свиты варьирует от 5.0 до 5.5 км. Внутреннее строение свит усложняется многочисленными телами вулканитов жерловой фации и субвулканическими телами (Коргонский, Щебнюхинский, Красноярский штоки), с которыми связаны месторождения железо-оксидного медно-золоторудного класса (IOCG) и субвулканического золото-серебряного (Холзунское, Коргонское, Красноярское, Щебнюхинское и другие месторождения).

Дискордантный по отношению к вмещающим вулканитам Кумирский шток имеет площадь около 3 км<sup>2</sup> и вытянут в северо-восточном направлении и круто погружается в западном (рис. 2). Он состоит из кварцевых порфиров и аляскит-порфиров. Породы экзоконтакта подверглись ороговикованию,



the Altay-Sayan fold region for the Early Ordovician–Early Permian, composed by the author using materials of (Shokalskii et. al., 2000).

1, 2 – Structural-compositional complexes of active continental margin: 1 – Early to Middle Devonian volcanic rocks (basalts, trachibasalts, andesites, rhyolites, their tuffs and ignimbrites); 2 – Ordovician–Early Devonian tuffaceous rocks with conglomerates, sandstones, siltstones, and claystones; 3–5 collisional complexes: 3 – Middle Devonian granites, moderate alkali granites (I type), quartz syenites; 4 – Early Silurian–Early Devonian gabbro, diorites, tonalites, granites (I type); 5 – Middle Cambrian gabbro, plagiogranites; 6 – deep faults; 7 – Upper Cambrian–Ordovician siliceous-metabasaltic oceanic rocks.

Troughs: T – Telbes, AЧ – Anuy-Chuya, Л – Lebedskoy, У – Uimen. Deep faults: I – Biya, II – Telbes (branch of the Biya Fault), III – Charvych-Terekta; 8 – location of the Kumir area.

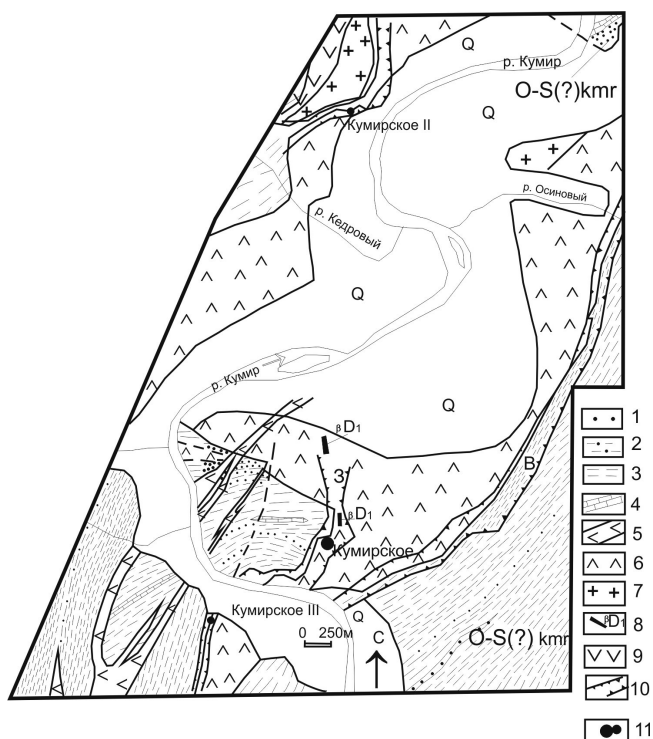


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Кумирского рудного поля.

1–5 – Кумирская свита: 1 – песчаники; 2 – алевро-песчаники; 3 – алевролиты; 4 – мраморы; 5 – дайки фельзитов; 6–8 – породы Кумирского штока: 6 – аляскит-порфиры; 7 – гранит-порфиры; 8 – андезитовые порфириты; 9 – контуры рудных зон (З – Западная, В – Восточная); 10, 11 – скандий-уран-редкоземельные месторождения и проявления.

скарнированию, грейзенизации, альбитизации и биотитизации. В эндоконтакте штока проявлена интенсивная альбитизация.

Аляскит-порфир имеет светлую окраску с розоватым оттенком, характеризуется массивной текстурой и порфировой структурой (аплитовой в цементирующей массе породы). Лейкократовые минералы, составляющие 97 % ее объема, представлены калинатовыми полевыми шпатами (альбит, ортоклаз-микропертит, санидин) (65 %) и кварцем (32 %), образующими редкие идиоморфные порфиновые вкрапленники, но преимущественно выполняющими цементирующую аплитовидную массу породы. Меланократовые минералы, составляющие порядка 1 % ее объема, представлены идиоморфными зернами эгирина и рибекита, размеры которых почти на порядок превышают размеры зерен цементирующей массы породы. Вторичные минералы представлены серицитом (2 %), развитым за счет фенокристаллов щелочных полевых шпатов и образующим неравномерно рассеянные скопления в кварц-полевошпатовой массе породы. Рудные минералы представлены лейкоксенизированным магнетитом, акцессорные – апатитом, лейкоксеном.

По совокупности петрологических параметров порода лейкократовая, крайне высокоглиноземистая ( $Al' = 13.71$ ), принадлежит кислым плутоническим породам щелочного ряда калинатовой серии, относится к семейству щелочных лейкогранитов, соответствует виду щелочной аляскит, разновидности – щелочной эгирин-рибекитовый аляскит-порфир.

Скандиевое, редкоземельное и урановое оруденение представлено грейзеновым и гидротермально-метасоматическим типами среди грейзенизированных пород и пропилитов. Оруденение пространственно связано с умеренно щелочными гранитоидами штока анорогенного А-типа (в эндоэзоконтактной части штока сформировалось Кумирское месторождение и проявления Кумирское II, Спартак, Кумирское III). Детальное описание оруденения Кумирского месторождения приведено в работе (Гусев и др., 2009). Дополнительно к ранее известным типам оруденения в 2013 г. при обследовании отвалов и стенок штольни нами выявлен новый тип оруденения, ранее не привлекавший к себе внимания. Это грейзеновая минерализация по ороговикоманным песчаникам, где среди окварцованных и грейзенизированных пород совместно с вкрапленностью и гнездами пирита отмечена вкрапленность берилла, турмалина, циннвальдита,

литионита, поллуцита с содержанием  $Li_2O$  0.1–0.5 мас. % и  $Cs_2O$  0.05–0.3 мас. %. Кроме того, в этих рудах отмечаются повышенные содержания Bi, Be, Sn, Ga, Ce, Zr.

### Характеристика циркона из аляскитовых эгирин-рибекитовых гранитов

В изученных гранитоидах присутствуют два типа циркона: кристаллический прозрачный и непрозрачный метамиктный, вероятно, связанный с рудной стадией, когда формировались грейзены во вмещающих терригенно-вулканогенных образованиях кумирской свиты. Третий тип циркона развит в грейзенах, образовавшихся в ороговикоманных породах кумирской свиты в контакте с одноименным штоком.

*Морфология.* В магматогенном цирконе Кумирского массива чаще развиты грани {100} и отсутствуют грани призмы {110}, что указывает на высокую температуру расплава, из которого кристаллизовался циркон (Pupin, Turco, 1972). Метамиктный циркон образует чаще всего призматические выделения, в которых развиты грани {101}. Он часто пористый с углублениями, обязанными процессам растворения. Иногда в нем проявлена осцилляционная зональность, что характерно для метамиктных цирконов (Xu et al., 2012). Циркон из грейзенов Кумирского месторождения имеет дипирамидальный облик, как правило, эвгедральный с хорошо развитыми гранями {111}, близкими по облику к синтетическим кристаллам и гидротермальным цирконам (McNaughton et al., 2005; Schaltegger, 2007).

Состав магматогенного циркона близок к стехиометрическому по соотношению главных компонентов (табл. 1) и характеризуется повышенными концентрациями Y, Hf и пониженными – U, а также повышенной суммой РЗЭ. В некоторых зернах проявлен слабый тетрадный эффект фракционирования РЗЭ М-типа четвертой тетрады (в данном случае анализируется четвертая тетрада, т. к. минерал характеризуется аномалией Ce, что исключает возможность использования среднего значения между первой и третьей тетрадами). Этот эффект указывает на слабую активность фтор-комплексов в магматогенных флюидах (Гусев, Табакаева, 2015). На спайдер-диаграмме отчетливо фиксируются негативные аномалии по Pr и Eu (рис. 3а).

В отличие от магматогенного метамиктного циркона обладает пониженными содержаниями Zr,

Химический состав магматогенного циркона Кумирского штока

Таблица 1

Table 1

Chemical composition of igneous zircon of the Kumir stock

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO <sub>2</sub> , мас. %	33.2	33.4	33.2	33.6	33.4	33.5	33.2	33.3	32.3
ZrO <sub>2</sub>	66.2	66.1	66.2	66.1	66.1	65.8	66.1	66.1	66.8
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.031	0.032	0.031	0.042	0.033	0.031	0.042	0.035	0.031
Sc, г/т	850	108	109	119	95.0	92	96.0	96	98.0
Ti	2.50	2.60	2.30	3.1	4.20	3.3	2.90	3.0	3.20
Y	515	488	496	491	492	561	493	491	556
Nb	4.51	3.60	3.20	2.76	2.60	2.9	3.85	3.52	3.94
La	0.75	0.91	0.92	0.98	0.93	0.94	0.97	0.82	0.79
Ce	41.1	39.3	39.0	40.1	39.6	39.3	39.1	44.6	39.5
Pr	0.07	0.06	0.08	0.12	0.10	0.04	0.12	0.04	0.07
Nd	1.60	1.4	1.42	1.17	1.19	1.3	1.23	1.34	1.22
Sm	4.04	3.63	3.95	3.57	4.09	4.14	3.6	4.10	4.11
Eu	0.63	0.64	0.62	0.61	0.7	0.59	0.63	1.03	0.77
Gd	10.3	8.80	9.10	8.9	10.3	10.4	10.5	11.0	10.3
Tb	3.06	2.80	2.50	2.55	2.8	3.03	3.2	3.4	3.31
Dy	39.3	41.2	44.3	38.8	37.2	42.3	42.6	44.0	43.1
Ho	14.0	13.1	14.1	11.6	13.5	14.1	14.8	14.3	14.1
Er	82.3	72.6	77.1	72.8	72.6	86.5	87.4	91.0	89.4
Tm	19.9	17.6	17.9	17.4	18.8	22.4	22.1	22.7	23.0
Yb	205	184	193	184	182	221	223	233	225
Lu	42.3	36.1	34.0	32.9	41.1	50.3	48.2	51.2	49.2
Hf	9890	9879	9940	9880	9960	9997	9711	9975	9980
Ta	0.98	0.82	0.79	0.76	0.89	0.92	1.01	1.01	0.98
Pb	9.90	8.90	9.80	8.90	10.1	8.6	9.10	10.6	8.90
Th	190	356	531	289	248	292	191	227	193
U	546	803	805	876	886	875	801	882	880
ΣРЗЭ	549.3	457.6	546.9	534.5	519.9	588.3	593.4	618.5	601.9
Th/U	0.35	0.44	0.66	0.33	0.28	0.33	0.24	0.26	0.22
(La/Yb) <sub>N</sub>	0.0025	0.0033	0.0032	0.0031	0.0023	0.0019	0.002	0.0024	0.0017
Eu/Eu*	0.28	0.33	0.304	0.31	0.31	0.26	0.29	0.44	0.34
Ce/Ce*	34.38	28.6	26.7	23.7	25.6	29.1	23.9	37.1	31.7
Y/Ho	36.8	37.2	35.2	42.3	36.7	39.8	33.3	34.3	39.4
TE <sub>4</sub>	1.01	1.11	1.14	1.15	1.07	1.06	1.08	1.06	1.08

Примечание. Здесь и в табл. 2, 3 содержания элементов нормализованы по хондриту CI (McDonough, Sun, 1995). Eu\* = (Sm<sub>N</sub> + Gd<sub>N</sub>) / 2, нормализовано по (McDonough, Sun, 1995); TE<sub>4</sub> – тетрадный эффект фракционирования РЗЭ четвертой тетрады по (Irber, 1999).

Note. Here and in Tables 2, 3, the contents of elements are normalized to chondrites CI (McDonough, Sun, 1995). Eu\* = (Sm<sub>N</sub> + Gd<sub>N</sub>) / 2, normalized after (McDonough, Sun, 1995); TE<sub>4</sub> – tetrad effect of REE fractionation of the forth tetrad after (Irber, 1999).

Y и Hf и повышенными – U, а также суммарными содержаниями РЗЭ и отношения Ce/Ce\* (табл. 2). Спектры распределения РЗЭ свидетельствуют об отрицательных аномалиях Pr и Eu и положительной – Sm (рис. 3б). Тетрадный эффект фракционирования РЗЭ М-типа четвертой тетрады значительно выше в отдельных зернах минерала, что указывает на значительно более высокую активность фтор-комплексов в перераспределении РЗЭ в условиях

воздействия гидротермальных флюидов на магматогенный циркон.

Циркон из грейзенов характеризуется резким увеличением концентраций U, Nb, Sc, ΣРЗЭ и уменьшением отношений Eu/Eu\* и Ce/Ce\* (табл. 3). В отдельных индивидах циркона проявлен тетрадный эффект фракционирования РЗЭ М- и W-типов, что указывает на активную роль таких летучих компонентов, как H<sub>2</sub>O и F. В спектре распре-

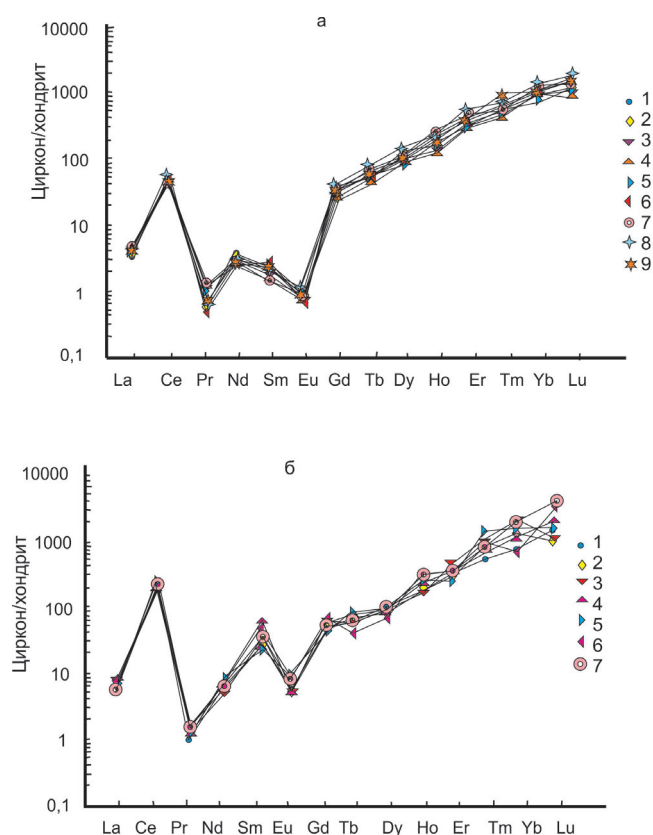


Рис. 3. Хондрит-нормализованные спектры распределения РЗЭ в магматогенном (а) и метамиктном (б) цирконах Кумирского штока.

Условные обозначения соответствуют номерам проб в табл. 1 и 2.

Fig. 3. Chondrite-normalized REE patterns of igneous (a) and metamict (b) zircons of the Kumir stock.

Numbers correspond to those in Tables 1 and 2.

деления РЗЭ наблюдается отрицательная аномалия Eu, но исчезает положительная аномалия Ce за счет относительного увеличения концентраций легких РЗЭ и их перераспределения (рис. 4).

**Возраст.** Чистые зерна магматического циркона (точки КМ-1.1.1, 1.6.1, 1.7.1, 1.8.1, 1.9.1, рис. 5) показали конкордантный возраст  $421 \pm 16$  млн лет (MSWD = 0.037, рис. 6).

### Обсуждение

Ярко проявленная положительная аномалия Ce в магматогенном цирконе указывает на окислительные условия его кристаллизации (Hinton, Upton, 1991), связанные с тем, что коэффициенты распределения ионов  $\text{Ce}^{4+}$  и  $\text{Ce}^{3+}$  в системе циркон-расплав оптимальны в условиях повышенной фугитивности кислорода. При повышенной фугитивности кислорода Ce окисляется до  $\text{Ce}^{4+}$  и входит в решетку циркона изоморфно. В то же время,  $\text{Ce}^{3+}$  некогерентен в кислом расплаве и требует дополнительных замещений в структуре циркона, что энергетически не выгодно. Европий не когерентен и потому концентрируется в расплаве. В итоге возникает положительная Ce и отрицательная Eu ано-

малии в цирконе. Это подтверждается также и отрицательной аномалией Eu в цирконе Кумирского штока, которая оптимальна при повышенных значениях  $f\text{O}_2$  (Burnham, Berry, 2012).

Из высокочarged элементов в различных типах циркона чаще всего анализируется поведение РЗЭ, Nb, Ta, U, Th, Rb, Sr, Hf и Re (Belousova et al., 2002; Hinton, Upton, 1991; Zhou et al., 2015). Скандий, также входящий в группу высокочarged элементов, анализируется реже. В отличие от других объектов, связанных с анорогенными гранитоидами, Кумирское месторождение с комплексными рудами имеет повышенные концентрации Sc, которые коррелируют с РЗЭ, поэтому логично оценить особенности поведения Sc в магматогенном цирконе. Известно, что поведение Sc, как и многих других редких и редкоземельных элементов в магматогенных флюидах, тесно связано с поведением летучих компонентов, таких как F, B, Li. Поскольку в цирконах Кумира проявлен тетрадный эффект фракционирования РЗЭ М-типа, обусловленный активностью фтор-комплексов, нами проанализировано поведение Sc в зависимости от величин тетрадного эффекта (рис. 7). Тренд увеличения концентраций Sc в цирконе прямо зависит от величи-

Таблица 2

Химический состав метамиктного циркона Кумирского штока

Table 2

Chemical composition of metamict zircon of the Kumor stock

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7
SiO <sub>2</sub> , мас. %	31.2	31.4	31.8	32.6	32.4	32.5	32.2
ZrO <sub>2</sub>	64.2	64.1	64.2	63.1	63.1	63.8	63.1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.033	0.03	0.033	0.043	0.03	0.033	0.042
Sc, г/т	135	163	161	150	155	105	104
Ti	12.5	12.6	12.3	13.1	14.2	13.3	12.9
Y	51.0	48.0	49.6	49.3	49.2	36.1	49.5
Nb	14.5	13.1	13.2	12.7	12.6	12.1	13.8
La	1.75	1.91	1.92	1.98	1.93	1.94	1.7
Ce	141.1	139.1	139.0	140.1	159.6	139.3	159.1
Pr	0.10	0.16	0.13	0.12	0.11	0.14	0.15
Nd	3.60	3.40	3.20	3.70	3.90	3.30	3.25
Sm	6.64	6.65	6.90	6.70	6.50	6.40	6.6
Eu	0.53	0.50	0.52	0.51	0.57	0.50	0.53
Gd	12.3	12.8	15.1	18.9	15.3	15.4	15.5
Tb	3.60	3.80	3.50	3.55	3.8	3.3	3.5
Dy	45.3	41.5	45.3	44.8	44.2	42.4	42.4
Ho	11.0	11.1	10.1	11.0	12.4	14.1	14.2
Er	92.3	92.6	97.1	92.8	72.9	86.9	87.9
Tm	29.9	27.6	27.9	27.4	28.8	22.4	22.5
Yb	225	284	293	282	284	224	225
Lu	40.3	30.1	30.5	42.9	41.4	54.3	58.2
Hf	890	979	994	880	960	897	978
Ta	5.98	5.20	3.70	3.60	3.80	3.90	3.10
Pb	19.9	18.9	11.8	11.9	10.1	18.6	19.1
Th	290	255	231	229	228	222	251
U	956	1009	1155	1156	1136	1172	1101
ΣРЗЭ	664.4	703.2	723.8	725.7	724.6	650.5	690.03
Th/U	0.303	0.25	0.2	0.198	0.2	0.189	0.23
(La/Yb) <sub>N</sub>	0.0053	0.0045	0.0044	0.0047	0.0046	0.0059	0.0051
Eu/Eu*	0.176	0.162	0.15	0.129	0.147	0.147	0.154
Ce/Ce*	54.2	49.76	47.7	47.7	56.0	46.8	59.0
Y/Ho	4.64	4.32	4.9	4.48	3.97	2.56	3.48
TE <sub>4</sub>	1.16	1.67	1.65	1.38	1.64	1.03	0.99

ны тетрадного эффекта М-типа. На диаграмме Eu/Eu\*–TE<sub>4</sub> также наблюдается увеличение значений Eu/Eu\* с повышением величин тетрадного эффекта (рис. 8). Согласно ряду кислотности-щелочности Sm, Gd и Eu в растворах при стандартных условиях это увеличение отвечает повышению кислотности среды (Маракушев, 1976). Следовательно, среда при кристаллизации циркона, при которой происходило увеличение содержания Sc в цирконе Кумирского штока, помимо высокой окисленности характеризовалась и увеличением кислотности. По-

следующие процессы перехода от магматической к пневматолито-гидротермальной фазе приводили к метамиктизации циркона. Его кристаллизация в грейзенах связана с флюидами, в которых помимо фтора важную роль играла водная составляющая.

В совокупности с геологическими данными конкордантный возраст 421 ± 16 млн лет свидетельствует о правомерности отнесения Кумирского штока, наряду с другими многочисленными субвулканическими телами в северной периферической полосе Коргонского прогиба, к лудловскому ярусу

Таблица 3

## Химический состав циркона из грейзенов Кумирского месторождения

Table 3

## Chemical composition of zircon from greisens of the Kumir deposit

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO <sub>2</sub>	33.4	33.6	33.5	33.1	33.3	33.1	33.8	33.4
ZrO <sub>2</sub>	65.8	65.3	65.8	66.4	66.2	66.3	65.9	65.5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.02
Sc	155	157	146	153	168	155	151	159
Ti	435	485	458	370	396	303	408	407
Y	57.4	57.3	53.4	43.8	44.7	53.1	52.4	51.3
Nb	42.1	42.8	43.0	43.3	52.1	53.2	54.1	54.0
La	29.9	39.1	52.8	49.7	63.0	54.3	44.4	68.7
Ce	381.6	454.4	521.9	630.7	659.3	534.7	446.8	528.0
Pr	66.1	63.2	63.3	101.4	93.8	59.3	96.3	87.1
Nd	141.6	244.8	221.5	149.3	218.4	217.1	163.9	145.4
Sm	42.4	50.6	41.9	61.7	52.9	62.4	61.9	72.7
Eu	0.73	0.75	0.67	0.77	0.87	0.65	0.88	1.10
Gd	54.1	58.3	48.0	67.6	88.5	101.6	102.1	190.1
Tb	34.8	41.5	52.3	52.1	52.4	53.2	53.8	53.7
Dy	449.2	434.7	356.1	326.8	248.3	243.1	345.8	443.1
Ho	113.0	210.1	211.8	212.1	213.9	216.1	147.6	217.5
Er	395.8	452.8	378.4	262.5	364.5	389.1	396.3	492.1
Tm	129.1	115.8	136.4	135.7	148.1	213.7	212.2	221.8
Yb	493.7	359.7	476.8	358.5	389.7	240.7	328.3	330.8
Lu	140.8	142.4	134.1	136.1	140.3	149.3	148.1	150.7
Hf	4894	4891	4983	4995	4993	4894	4991	4894
Ta	39.1	29.2	28.8	19.2	19.7	19.6	18.3	16.5
Pb	29.9	36.2	91.7	67.4	60.9	59.2	58.8	51.3
Th	191.8	186.6	215.8	186.9	240.5	182.9	190.2	234.8
U	1218	1120	1315	1365	1382	1401	1424	1441
ΣPЗЭ	2530.2	2725.4	2749.4	2588.8	2778.7	2588.3	2600.8	3054.1
Th/U	0.157	0.167	0.164	0.137	0.174	0.13	0.133	0.163
(La/Yb) <sub>N</sub>	0.046	0.074	0.075	0.094	0.109	0.249	0.092	0.141
Eu/Eu*	0.041	0.042	0.045	0.036	0.038	0.025	0.033	0.027
Ce/Ce*	1.48	1.75	1.88	1.2	1.68	2.0	0.75	1.4
Y/Ho	0.51	0.27	0.25	0.21	0.21	0.24	0.36	0.27
TE <sub>4</sub>	1.06	0.8	1.13	1.16	1.06	0.73	1.08	0.99

позднего силура и более позднему раннему девону, связанному с наложенным коргонским вулканическим комплексом. Отдельные зерна прозрачного зонального циркона магматического облика с древними значениями возраста на уровне палеопротерозоя и даже неогархея являются ксеногенными и свидетельствуют о наличии докембрийских пород в области магмогенерации Кумирского штока.

### Заключение

В результате исследований минеральных особенностей и распределения редких и редкоземельных элементов установлено, что в аляскит-порфирах Кумирского штока в Горном Алтае присутствуют два типа цирконов, один из которых, вероятно, синхронен образованию породы: он прозрачный, призматический и практически стехиометричен по составу. Второй тип характеризуется другой морфологией, непрозрачен и содержит повышенные концентрации U, из-за чего становится метамикт-

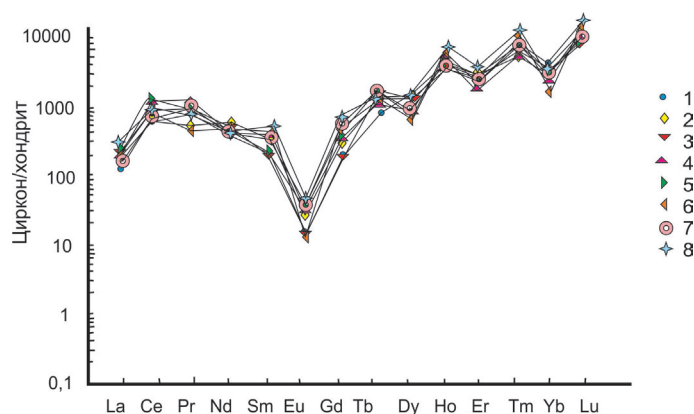


Рис. 4. Хондрит-нормализованные спектры распределения РЗЭ в цирконах из грейзенов Кумирского месторождения.

Условные обозначения соответствуют номерам проб в табл. 3.

Fig. 4. Chondrite-normalized REE patterns of zircons from greisens of the Kumor deposit.

Numbers correspond to those in Table 3.

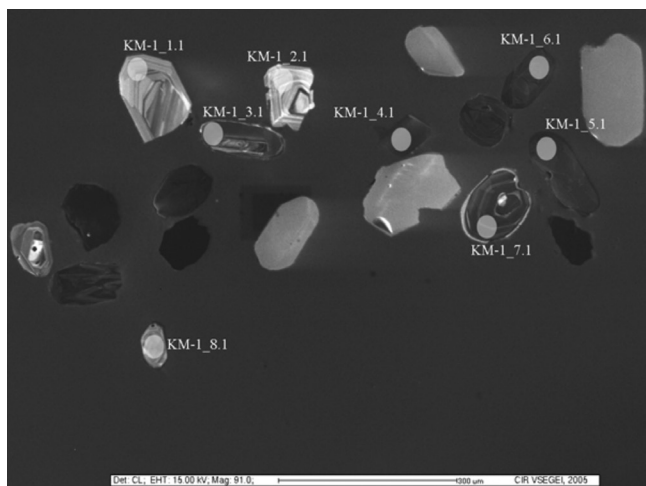


Рис. 5. Католюминесцентное изображение цирконов из эгирин-рибекитовых аляскит-порфиров Кумирского штока (проба КМ-1).

Fig. 5. Cathodoluminescent images of zircons from aegirine-riebeckite porphyritic alaskite of the Kumor stock (sample KM-1).

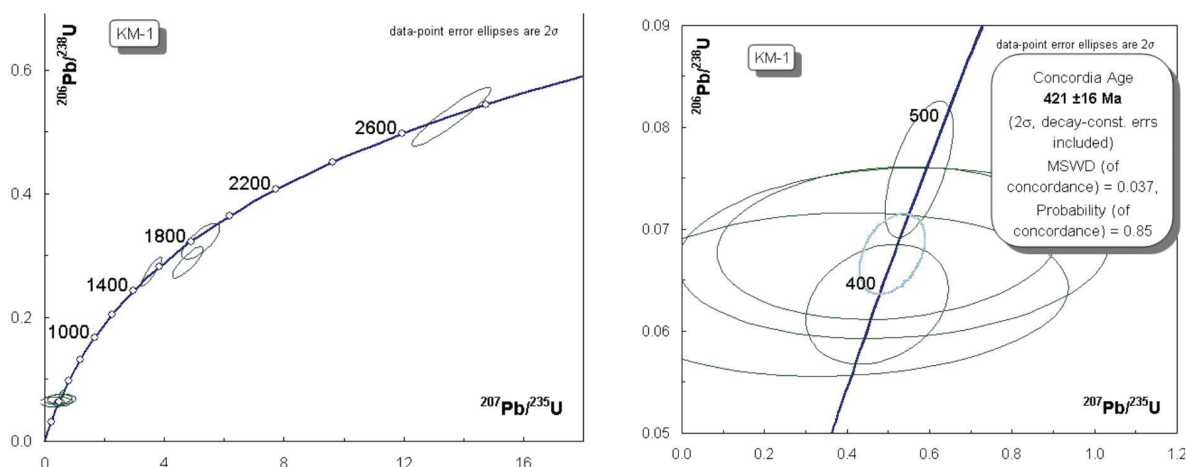


Рис. 6. Диаграммы с конкордией для цирконов из пробы КМ-1.

Fig. 6. Concordia diagrams for zircon from sample KM-1.

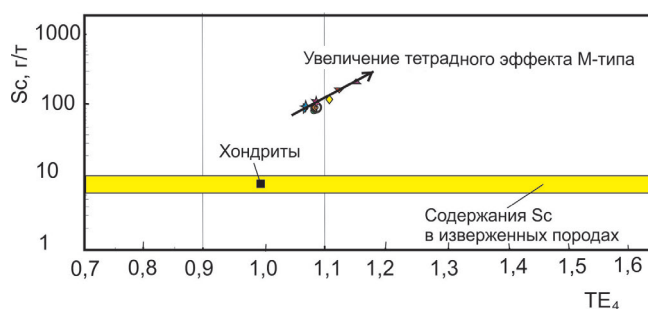


Рис. 7. Диаграмма Sc–TE<sub>4</sub> для магматогенного циркона Кумирского штока.

Содержание Sc в углистых хондритах по (Wasson, Kallemeyn, 1988), средние содержания Sc в изверженных породах по (Виноградов, 1962).

Здесь и на рис. 8, условные обозначения соответствуют номерам проб в табл. 1.

Fig. 7. Sc–TE<sub>4</sub> diagram for igneous zircons of the Kumir stock.

The Sc contents in carbonaceous chondrites after (Wasson, Kallemeyn, 1988); the average Sc contents of igneous rocks after (Vinogradov, 1962).

Here and in Fig. 8, numbers correspond to those in Table 1.

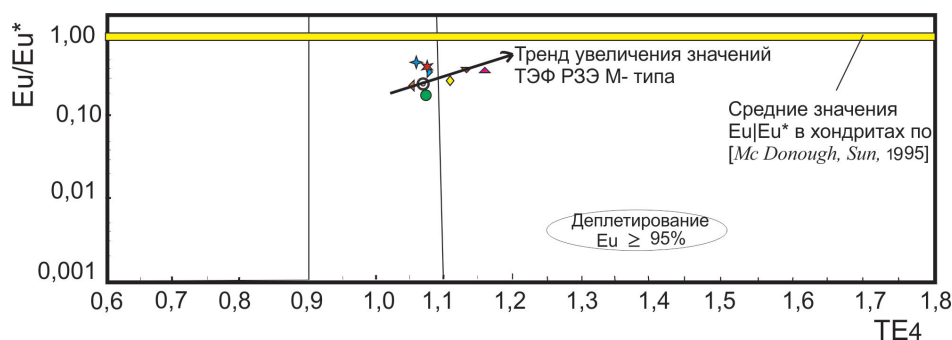


Рис. 8. Диаграмма Eu/Eu\*–TE<sub>4</sub> для магматогенного циркона Кумирского штока.

Fig. 8. Eu/Eu\*–TE<sub>4</sub> diagram for igneous zircon of the Kumir stock.

ным, и должен быть отнесен к пневматолито-гидротермальному этапу становления штока. По направлению от магматогенного к пневматолито-гидротермальному циркону установлены закономерные изменения его составов в зависимости от физико-химических изменений среды кристаллизации, а также флюидного режима процессов. В этом же направлении наблюдается увеличение концентраций высоkozарядных элементов, в том числе и Sc, на фоне увеличения активности водных флюидов. Накопление Sc и других высоkozарядных элементов в цирконе происходило при повышении кислотности среды и фугитивности кислорода.

### Литература

**Виноградов А.П.** (1962) Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры. *Геохимия*, (7), 555–572.

**Гусев А.И., Гусев Н.И.** (2020) Редкоземельное оруденение Коргонского прогиба. *Природные ресурсы Горного Алтая: геология, геофизика, экология, минеральные, водные и лесные ресурсы Алтая*, (1–2), 5–12.

**Гусев А.И., Гусев Н.И., Ефимова И.В.** (2009) Магматизм и оруденение Кумирского рудного поля, Горный Алтай. *Руды и металлы*, (6), 21–28.

**Гусев А.И., Табакаева Е.М.** (2015) Петрология, геохимия и генезис анорогенных гранитоидов. Hamburg, Palmarium Academic Publishing, 261 с.

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

**Шокальский С.П., Бабин Г.А., Владимиров А.Г., Борисов С.М.** (2000) Корреляция магматических и метаморфических комплексов западной части Алтае-Саянской складчатой области. Новосибирск, СО РАН, филиал «Гео», 187 с.

**Anthony J.W., Bideaux R.A., Bladh K.W., Nichols M.C.** (2003) Handbook of mineralogy. Mineralogical Society of America, Chantilly, 565 p.

**Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I.** (2002) Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, **143**(3), 602–622.

**Burnham A.D., Berry A.J.** (2012) An experimental study of trace element partitioning between zircon and melt as function of oxygen fugacity. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **95**(10), 196–212.

**Cherniak D.J., Watson E.B.** (2003) Diffusion in zircon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **53**(1), 113–143.

**Dai J.G., Wang C.S., Hébert R., Li Y.L., Zhong H.T., Guillaume R., Bezard R., Wei Y.S.** (2011) Late Devonian OIB alkaline gabbro in the Yarlung Zangbo Suture Zone: Remnants of the Paleo-Tethys? *Gondwana Research*, **19**(1), 232–243.

**Fourcade S., Allegre C.J.** (1981) Trace elements behavior in granite genesis: a case study. The calc-alkaline plutonic association from the Querigut complex (Pyrenees, France). *Contribution to Mineralogy and Petrology*, **76**(2), 177–195.

**Gromet L.P., Silver L.T.** (1983) Rare earth element distributions among minerals in a granodiorite and their petrogenetic implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **47**(5), 925–939.

**Harrison T.M., Watson E.B., Rapp R.P.** (2006) Does anatexis deplete the lower crust in heat producing elements? Implications from experimental studies. *Trans American Geophysical Union (EOS)*, **67**(5), 386.

**Hinton R.W., Upton G.J.** (1991) The chemistry of zircon: variation within and between large crystals from syenite and alkali basalt xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **55**(2), 3287–3302.

**Irber W.** (1999) 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*, **63**(2), 489–508.

**Liu Y.C., Li S.G., Gu X.F., Hou Z.H.** (2006) Zircon SHRIMP U-Pb dating for olivine gabbro at Wangmuguan in the Beihuaiyang zone and its geological significance. *China Science Bulletin*, **51**(11), 2500–2506.

**McDonough W.F., Sun S.** (1995) The composition of the Earth. *Chemical Geology*, **120**, (3–4), 223–253.

**McNaughton N.J., Mueller A.G., Groves D.I.** (2005) The age of the giant Golden Mile deposit, Kalgoorlie, Western Australia: ion-microprobe zircon and monazite U-Pb geochronology of a synmineralization lamprophyre dike. *Economic Geology*, **100**(7), 1427–1440.

**Pupin J.P., Turco G.** (1972) Unetypologie originale du zircon accessoire. *Bulletin de la Société Française de Minéralogie et de Cristallographie*, **95**(3), 348–359.

**Shao T., Cheng N., Song M.** (2016) Provenance and tectonic-paleogeographic evolution: Constraints from detrital zircon U-Pb ages of Late Triassic-Early Jurassic deposits in the northern Sichuan basin, central China. *Journal of Asian Earth Sciences*, **127**(1), 12–31.

**Schaltegger U.** (2007) Hydrothermal zircon. *Elements*, **3**(1), 51–68.

**Sláma J., Košler J., Pedersen R.B.** (2007) Behaviour of zircon in high-grade metamorphic rocks: evidence from Hf isotopes, trace elements and textural studies. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, **154**(3), 335–356.

**Wang X., Griffin W.L.** (2004) Unusual Hf contents in metamorphic zircon from coesite-bearing eclogites of the Dabie Mountains, east-central China: implications for the dating of ultrahigh pressure metamorphism. *Journal of Metamorphic Geology*, **22**(7), 629–637.

**Wasson J.T., Kallemeyn G.W.** (1988) Mean composition of the chondrite groups. *Philosophy Transactions Royal Society London*, **5**(7), 535–544.

**Williams I.S.** (1998) U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. *Reviews in Economic Geology*, **7**(1), 1–35.

**Xu X.-S., Zhang M., Zhu K.-Y., Chen X.-M., He Z.-Y.** (2012) Reverse age zonation of zircon formed by metamictisation and hydrothermal fluid leaching. *Lithos*, **150**(4), 256–267.

**Zhou Y., Liang X.Q., Liang X.R., Jiang Y., Wang C., Fu J.G., Shao T.** (2015) U-Pb geochronology and Hf-isotopes on detrital zircons of Lower Paleozoic strata from Hainan Island: new clues for the early crustal evolution of southeastern South China. *Gondwana Research*, **27**(4), 1586–1598.

## References

**Anthony J.W., Bideaux R.A., Bladh K.W., Nichols M.C.** (2003) Handbook of mineralogy. Mineralogical Society of America, Chantilly, 565 p.

**Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I.** (2002) Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, **143**(3), 602–622.

**Burnham A.D., Berry A.J.** (2012) An experimental study of trace element partitioning between zircon and melt as function of oxygen fugacity. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **95**(10), 196–212.

**Cherniak D.J., Watson E.B.** (2003) Diffusion in zircon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **53**(1), 113–143.

**Dai J.G., Wang C.S., Hébert R., Li Y.L., Zhong H.T., Guillaume R., Bezard R., Wei Y.S.** (2011) Late Devonian OIB alkaline gabbro in the Yarlung Zangbo Suture Zone: Remnants of the Paleo-Tethys? *Gondwana Research*, **19** (1), 232–243.

**Fourcade S., Allegre C.J.** (1981) Trace elements behavior in granite genesis: a case study. The calc-alkaline

plutonic association from the Querigut complex (Pyrenees, France). *Contribution to Mineralogy and Petrology*, **76**(2), 177–195.

**Gromet L.P., Silver L.T.** (1983) Rare earth element distributions among minerals in a granodiorite and their petrogenetic implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **47**(5), 925–939.

**Gusev A.I., Gusev N.I.** (2020) [REE mineralization of the Korgon Trough]. *Prirodnye resursy Gornogo Altaya: geologiya, geofizika, ekologiya, mineral'nye, vodnye i lesnye resursy Altaya* [Natural Resources of Gorny Altai: Geology, Geophysics, Ecology, Mineral, Water and Forest Resources of Altai], (1–2), 5–12 (in Russian).

**Gusev A.I., Gusev N.I., Efimova I.V.** (2009) [Magmatism and ore mineralization of Kumir ore field, Gorny Altai]. *Rudy i metally* [Ores and Metals], (6), 21–28 (in Russian).

**Gusev A.I., Tabakaeva E.M.** (2015) [Petrology, geochemistry and genesis of anorogenic granitoids]. Hamburg: Palmarium Academic Publishing, 261 p. (in Russian).

**Harrison T.M., Watson E.B., Rapp R.P.** (2006) Does anatexis deplete the lower crust in heat producing elements? Implications from experimental studies. *Trans American Geophysical Union (EOS)*, **67**(5), 386.

**Hinton R.W., Upton G.J.** (1991) The chemistry of zircon: variation within and between large crystals from syenite and alkali basalt xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **55**(2), 3287–3302.

**Irber W.** (1999) 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*, **63**(2), 489–508.

**Liu Y.C., Li S.G., Gu X.F., Hou Z.H.** (2006) Zircon SHRIMP U-Pb dating for olivine gabbro at Wangmuguan in the Beihuaiyang zone and its geological significance. *China Science Bulletin*, **51**(11), 2500–2506.

**Marakushev A.A.** (1976) [Thermodynamic factors of formation of ore zoning]. In: *Termodinamicheskie faktory obrazovaniya rudnoi zonalnosti skrytogo orudeneniya na osnove zonalnosti gidrotermalnykh mestorozhdeniy* [Thermodynamic Factors of Formation of Blind Ore Zonation on the Basis of Zonation of Hydrothermal Deposits]. Moscow, Nauka, 36–51 (in Russian).

**McDonough W.F., Sun S.** (1995) The composition of the Earth. *Chemical Geology*, **120**(3–4), 223–253.

**McNaughton N.J., Mueller A.G., Groves D.I.** (2005) The age of the giant Golden Mile deposit, Kalgoorlie, Western Australia: ion-microprobe zircon and monazite U-Pb geochronology of a synmineralization lamprophyre dike. *Economic Geology*, **100**(7), 1427–1440.

**Pupin J.P., Turco G.** (1972) Unetypologie originale du zircon accessoire. *Bulletin de la Société Française de Minéralogie et de Cristallographie*, **95**(3), 348–359.

**Shao T., Cheng N., Song M.** (2016) Provenance and tectonic-paleogeographic evolution: Constraints from detrital

zircon U-Pb ages of Late Triassic-Early Jurassic deposits in the northern Sichuan basin, central China. *Journal of Asian Earth Sciences*, **127**(1), 12–31.

**Schaltegger U.** (2007) Hydrothermal zircon. *Elements*, **3**(1), 51–68.

**Shokalskii S.P., Babin G.A., Vladimirov A.G., Borisov S.M.** (2000) [Correlation of igneous and metamorphic complexes of the western part of the Altai-Sayan fold region]. Novosibirsk, SO RAN, filial «Geo», 187 p. (in Russian).

**Sláma J., Košler J., Pedersen R.B.** (2007) Behaviour of zircon in high-grade metamorphic rocks: evidence from Hf isotopes, trace elements and textural studies. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, **154**(3), 335–356.

**Vinogradov A.P.** (1962) [Average contents of chemical elements in main types of igneous rocks of the Earth's crust]. *Geokhimiya* [Geochemistry], (7), 555–572. (in Russian).

**Wang X., Griffen W.L.** (2004) Unusual Hf contents in metamorphic zircon from coesite-bearing eclogites of the Dabie Mountains, east-central China: implications for the dating of ultrahigh pressure metamorphism. *Journal of Metamorphic Geology*, **22**(7), 629–637.

**Wasson J.T., Kallemeyn G.W.** (1988) Mean composition of the chondrite groups. *Philosophy Transactions Royal Society London*, **5**(7), 535–544.

**Williams I.S.** (1998) U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. *Reviews in Economic Geology*, **7**(1), 1–35.

**Xu X-S., Zhang M., Zhu K-Y., Chen X-M., He Z-Y.** (2012) Reverse age zonation of zircon formed by metamictisation and hydrothermal fluid leaching. *Lithos*, **150**(4), 256–267.

**Zhou Y., Liang X.Q., Liang X.R., Jiang Y., Wang C., Fu J.G., Shao T.** (2015) U-Pb geochronology and Hf-isotopes on detrital zircons of Lower Paleozoic strata from Hainan Island: new clues for the early crustal evolution of southeastern South China. *Gondwana Research*, **27**(4), 1586–1598.