
**МИНЕРАЛЫ
И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ**

**ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ О БАДДЕЛЕИТ-ЦИРКОНОВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ
В ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ ИНТРУЗИЯХ
БАШКИРСКОГО МЕГАНТИКЛИНОРИЯ**

© 2020 г. д. чл. С. Г. Ковалев^{1, *}, д. чл. В. Н. Пучков²,
д. чл. С. С. Ковалев¹, д. чл. С. И. Высоцкий¹

¹*Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН,
ул. К. Маркса, 16/2, Уфа, 450077 Россия*

²*Институт геологии и геохимии УрО РАН,
ул. Акад. Вонсовского, 15, Екатеринбург, 620016 Россия*

**e-mail: kovalev@ufaras.ru*

Поступила в редакцию 27.04.2020 г.

После доработки 04.05.2020 г.

Принята к публикации 17.06.2020 г.

В статье приводится первое описание бадделеит-цирконовой минерализации в дифференцированных интрузиях Башкирского мегантиклинория (Южный Урал). Установлено, что бадделеит распространен по всему разрезу интрузивного тела, а циркон встречается только в габбровом горизонте, где детально описано замещение бадделеита цирконом. Делается вывод о том, что это замещение обусловлено процессом магматической дифференциации расплава в промежуточной камере, когда в ходе кристаллизационно-гравитационной дифференциации силикатов ранней генерации остаточный расплав обогащается кремнеземом и формируются породы габбрового горизонта.

Ключевые слова: Башкирский мегантиклинорий, тараташский комплекс, циркон, бадделеит, пикриты, габбро, магматическая дифференциация

DOI: 10.31857/S0869605520040024

ВВЕДЕНИЕ

Циркон и бадделеит – два главных минерала циркония, которые широко используются в геохронологии для оценки времени проявления магматизма, метаморфизма, связанных с ними процессов метасоматоза, рудогенеза и определения источников вещества при петролого-геохимических исследованиях. В настоящее время, особенно в зарубежной литературе, накоплен огромный объем данных, касающихся условий формирования метаморфогенного (Hanchar, Hoskin, 2003 и ссылки там же; Каулина, 2010,) и магматического (Wingate, 2001; Баянова, 2006; Анфилогов и др., 2013; Аранович и др., 2013; Аранович и др., 2017; Добрецов и др., 2018) циркона. В отличие от циркона, присутствующего практически во всех типах пород, бадделеит кристаллизуется в породах, недосыщенных кремнеземом. В последнее время появился ряд публикаций, в которых рассматриваются вопросы генетических взаимоотношений между цирконом и бадделеитом (Wingate, 2001; Баянова, 2006; Кузнецов, Мукатова, 2013; Скублов и др., 2013; Скублов и др., 2018; Harlov, 2015; Добрецов и др., 2018). Считается, что ситуация, когда бадделеит замещается цирконом, проявляется при метаморфизме

и воздействию на породы флюидов, привносящих кремнезем, что описывается реакцией $ZrO_2 + SiO_2 = ZrSiO_4$.

Нами был получен новый материал, характеризующий взаимоотношения между этими минералами в процессе дифференциации расплава пикродолеритового состава (средневзвешенное количество MgO – 14–16 мас. %) в промежуточной камере, что практически не освещено в литературе.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Минералы изучены на растровом электронном микроскопе РЭММА-202М с рентгеновским энерго-дисперсионным спектрометром LZ-5, детекторами вторичных и отраженных электронов в Институте минералогии УрО РАН (г. Миасс, аналитик В.А. Котляров).

Содержания петрогенных оксидов определены рентгенофлуоресцентным методом в ИГ УФИЦ РАН (г. Уфа) на спектрометре VRA-30 (“Карл Цейсс”, Германия) с использованием рентгеновской трубки с W-анодом (30 кВ, 40 мА). Пределы обнаружения для SiO_2 и Al_2O_3 составляли 0.1%, TiO_2 , Fe_2O_3 , MnO , CaO , K_2O , P_2O_5 и $S_{общ}$ – 0.01%, MgO – 0.2%.

Концентрации редких и рассеянных элементов (Li, Be, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, PЗЭ, Hf, Ta, W, Tl, Pb, Bi, Th, U) определены методом ICP-MS на приборах “ELAN-6100 DRC” и “Agilent 7700” с использованием компьютерной программы обработки данных “TOTALQUANT” в ЦИИ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург).

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Расслоенные (дифференцированные) тела мисаелгинского комплекса были выявлены при геологосъемочных работах в конце 1970-х годов среди мигматитов тараташского комплекса на северо-востоке Башкирского мегантиклинория (рис. 1). Комплекс состоит из 2 тел мощностью 45 (верхнее тело) и более 216 м (нижнее тело). При проведении детального петрографического изучения нижнего тела были выделены следующие горизонты (снизу вверх): нижняя эндоконтактовая зона (466.5–464.5 м), ультраосновной горизонт (464.5–344 м) и габбровый горизонт (341–254 м) (Ковалев, 1996; Алексеев и др., 2000).

Нижняя эндоконтактовая зона сложена пикритами и пикродолеритами с переменным количеством основных породообразующих минералов. По внешнему облику это темно-зеленые (до черных) породы со среднезернистой порфиоровидной структурой и массивной текстурой. Их минеральный состав: оливин (69–75% Fo), ортопироксен (клиноэнстатит, #Mg 0.77–0.80), клинопироксен (авгит, #Mg 0.80), плагиоклаз (14–42 An), амфибол (эдинит, магнезиогастингсит), биотит, магнетит, титаномагнетит, ильменит, сульфиды, апатит, титанит. В состав нижнего (пикритового) горизонта входят оливин (форстерит 88% Fo в центральных частях кристаллов и хризолит 67–76% Fo в основной массе пород), клинопироксен (Mg-авгит, #Mg 0.75–0.93), ортопироксен (клиноэнстатит, #Mg 0.75–0.82), плагиоклаз (12–52 An), амфибол (магнезиальная роговая обманка, эдинит, магнезиогастингсит), биотит, магнетит, титаномагнетит, ильменит и сульфиды. В верхнем – габбровом горизонте присутствуют клинопироксен (Mg-авгит и авгит, #Mg 0.62–0.76), плагиоклаз (25–60 An), железистая и магнезиальная роговая обманка, биотит, хлорит, кварц, магнетит, титаномагнетит, ильменит, титанит и сульфиды.

Основные петрогеохимические характеристики ультраосновных пород и габброидов мисаелгинского комплекса (SiO_2 42.14 и 46.92 мас. %, MgO 19.9 и 5.6 мас. %, TiO_2 1.3 и 2.72 мас. %, Na_2O 1.0 и 2.72 мас. %, K_2O 0.5 и 1.07 мас. %, Cr 965.7 и 21.07 ppm;

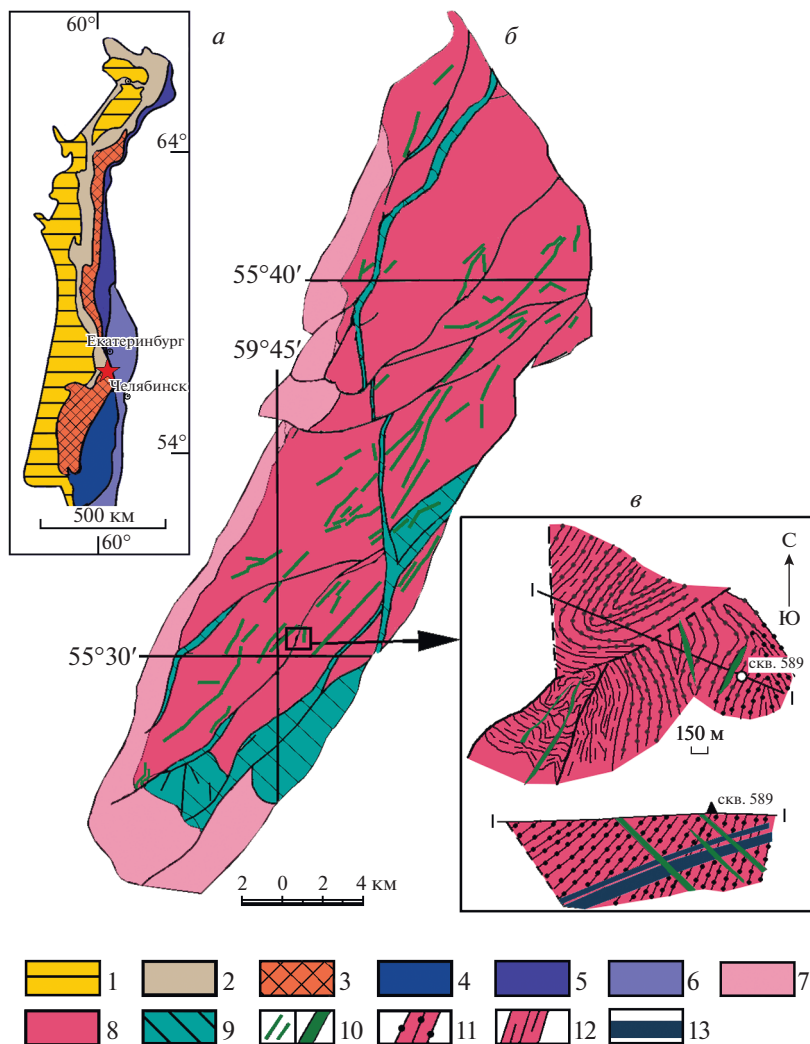


Рис. 1. Структурная схема Урала (а), геологическая схема тараташского комплекса (б) и участка “Магнитный” с телами пород миселгинского комплекса (в). Мегазоны Урала: 1 – Предуральская; 2 – Западно-Уральская, 3 – Центрально-Уральская, 4 – Тагильская, 5 – Магнитогорская, 6 – Восточно-Уральская; 7 – отложения айской свиты (RF₁); 8 – архей-протерозойские отложения нерасчлененные; 9 – тектонические зоны с бластомилонитами; 10 – разновозрастные дайки базитов; 11 – мигматиты; 12 – гранат-биотитовые гнейсы; 13 – расслоенные тела миселгинского комплекса.

Fig. 1. The structural diagram of the Urals (a), the geological diagram of the Taratash complex (b) and the Magnitny site with rock bodies of the Miselga complex (c). Megazones of the Urals: 1 – PreUral; 2 – West Ural, 3 – Central Ural, 4 – Tagil, 5 – Magnitogorsk, 6 – East Ural; 7 – deposits of the Ai Formation (RF₁); 8 – Archean–Proterozoic sediments undifferentiated; 9 – tectonic zones with blastomylonites; 10 – basite dykes of different ages; 11 – migmatites; 12 – garnet–biotite gneisses; 13 – layered bodies of the Miselga complex.

Таблица 1. Химический состав бадделеита и циркона из пород мисаелгинского комплекса (мас. %) **Table 1.** The chemical composition of baddeleyite and zircon from rocks of the Miselga complex (wt %)

№ п/п	№обр.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	ZrO ₂	HfO ₂	ThO ₂	UO ₂	Σ
1	25137b	—	0.63	—	0.91	—	—	95.96	1.72	—	—	99.22
2	25137e	33.23	—	—	—	—	—	65.46	0.62	—	—	99.31
3	25137f	32.68	—	3.19	1.83	5.46	0.80	45.87	0.55	6.84	2.12	99.34
4	25137g	35.38	—	1.59	2.40	2.84	2.20	48.80	0.69	4.27	1.34	99.51
5	25138o	32.09	—	—	—	—	—	62.37	1.30	3.09	0.96	99.81
6	25138p	32.23	—	—	—	—	—	63.71	1.59	1.10	0.83	99.46
7	25141i	—	1.26	—	1.37	—	—	94.16	2.49	—	—	99.28
8	25141j	0.53	0.60	—	1.21	—	—	94.75	2.65	—	—	99.74
9	25141k	32.50	—	—	—	—	—	65.99	1.51	—	—	100.00
10	25142b	—	0.50	—	1.33	—	—	95.56	2.12	—	—	99.51
11	25142c	—	0.31	—	1.21	—	—	96.59	1.58	—	—	99.69
12	25142d	—	0.93	—	1.66	—	—	94.54	1.98	—	—	99.11
13	25142h	—	0.62	—	1.27	—	—	95.29	2.01	—	—	99.19
14	25142i	26.63	0.51	—	1.92	1.66	—	67.61	1.12	—	—	99.45
15	25166c	—	0.44	—	1.15	—	—	96.30	1.47	—	—	99.36
16	25143a	—	0.75	—	1.32	—	—	96.09	1.26	—	—	99.42

Примечание. Буквенные индексы соответствуют точкам микроанализа на рис. 2.

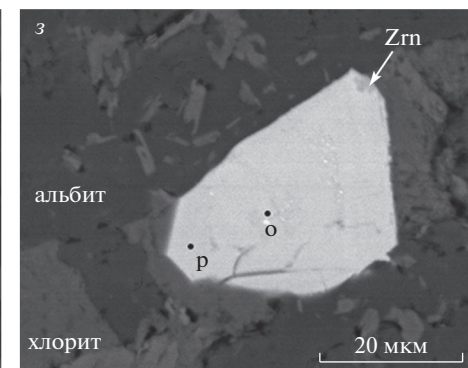
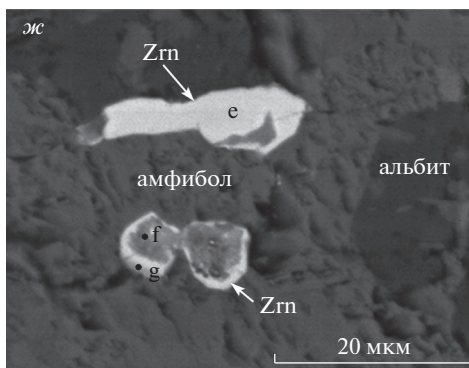
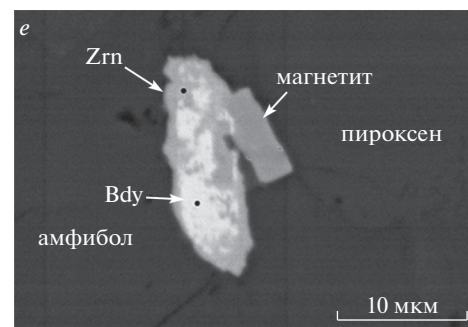
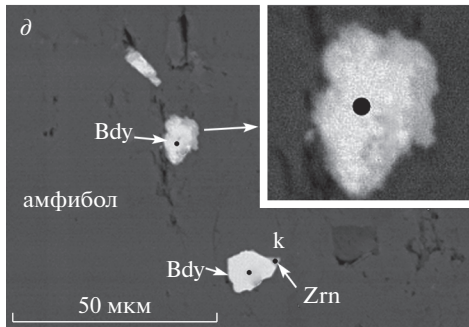
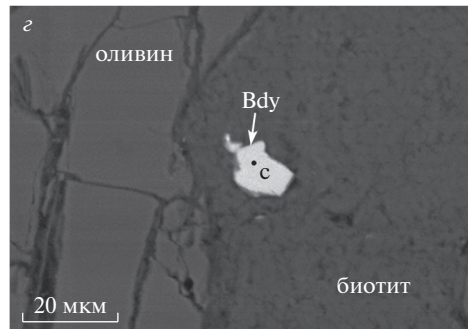
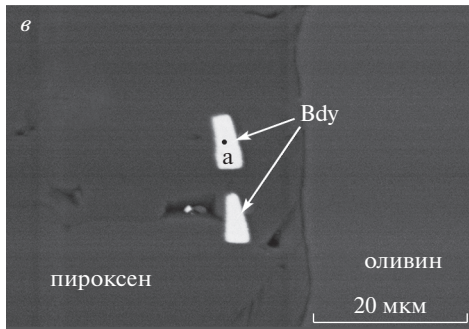
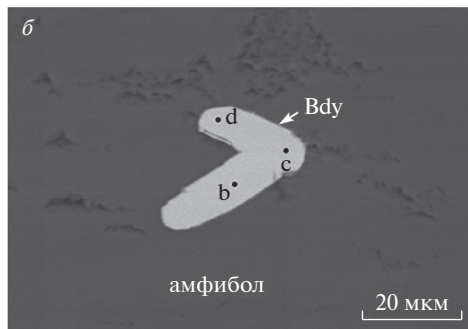
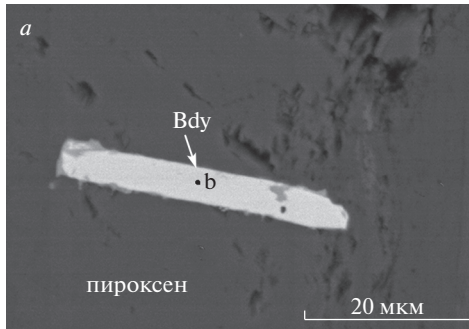
Ni 701.1 и 124.8 ppm, Co 95.6 и 82.9 ppm, Cu 343.9 и 93.7 ppm, Zr 88.88 и 82.57 ppm, сумма РЗЭ 71.1 и 109.7 ppm, La_n/Lu_n 8.2 и 10.7, Ce_n/Yb_n 7.3 и 9.1, La_n/Sm_n 2.0 и 2.2 соответственно) подчеркивают дифференцированное строение тела и свидетельствуют о близости среднего состава пород комплекса к типичным рифтогенным образованиям (Ernst et al., 2006).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Бадделеит в виде длиннопризматических кристаллов или их сростков (рис. 2) установлен по всему разрезу тела. В пикритах он пойкилитово включен в кристаллы оливина, пироксена и биотита (рис. 2, *в*, *г*), а в габброидах — в пироксен, амфибол либо интерстициальную матрицу (рис. 2, *а*, *б*, *д*, *е*, *ж*, *з*). В качестве постоянных примесей в ми-

Рис. 2. Микрофотографии бадделеита и циркона из пород мисаелгинского комплекса. *а* — габбро, бадделеит 25137b, пироксен — диопсид; *б* — габбро, бадделеит 25142b, 25142c, 25142d, амфибол — железистая роговая обманка; *в* — пикрит, бадделеит 25143a, оливин — 69 Fo, пироксен — клиноэнстатит; *г* — пикрит, бадделеит 25166c, оливин — 72 Fo; биотит; *д* — габбро, бадделеит 25141i, 25141j, циркон 25141k; амфибол — магниевая роговая обманка; *е* — габбро, бадделеит 25142h, циркон 25142i, амфибол — магниевая роговая обманка; пироксен — авгит; *ж* — габбро, циркон 25137e, 25137f, 25137g, амфибол — магниевая роговая обманка; альбит; *з* — габбро, циркон 25138o, 25138p, альбит; хлорит. Bdy — бадделеит; Zrn — циркон. Номера соответствуют номерам образцов в таблице. Изображения в обратно-отраженных электронах.

Fig. 2. Microphotographs of baddeleyite and zircon from the rocks of the Miselga complex. *a* — gabbro, baddeleyite 25137b, pyroxene — diopside; *b* — gabbro, baddeleyite 25142b, 25142c, 25142d, amphibole — glandular hornblende; *v* — picrite, baddeleyite 25143a, olivine — 69 Fo, pyroxene — clinoenstatite; *g* — picrite, baddeleyite 25166c, olivine — 72 Fo; biotite; *d* — gabbro, baddeleyite 25141i, 25141j, zircon 25141k; amphibole — magnesian hornblende; *e* — gabbro, baddeleyite 25142h, zircon 25142i, amphibole — magnesian hornblende; pyroxene — augite; *g* — gabbro, zircon 25137e, 25137f, 25137g, amphibole — magnesian hornblende; albite; *z* — gabbro, zircon 25138o, 25138p, albite; chlorite. Bdy — baddeleyite; Zrn — zircon. The numbers correspond to the numbers of the samples in the table. BSE images.



нерале присутствуют HfO_2 (от 1.47 до 2.65 мас. %), TiO_2 (от 0.31 до 1.26 мас. %), FeO (от 0.91 до 1.66 мас. %) и в единичном случае – SiO_2 (0.53 мас. %) (табл. 1). Отдельные кристаллы бадделеита имеют неоднородный состав с уменьшением содержания HfO_2 (2.12 и 1.58 мас. %), TiO_2 (0.5 и 0.31 мас. %) и FeO (1.33 и 1.21 мас. %) от центра зерен к краям.

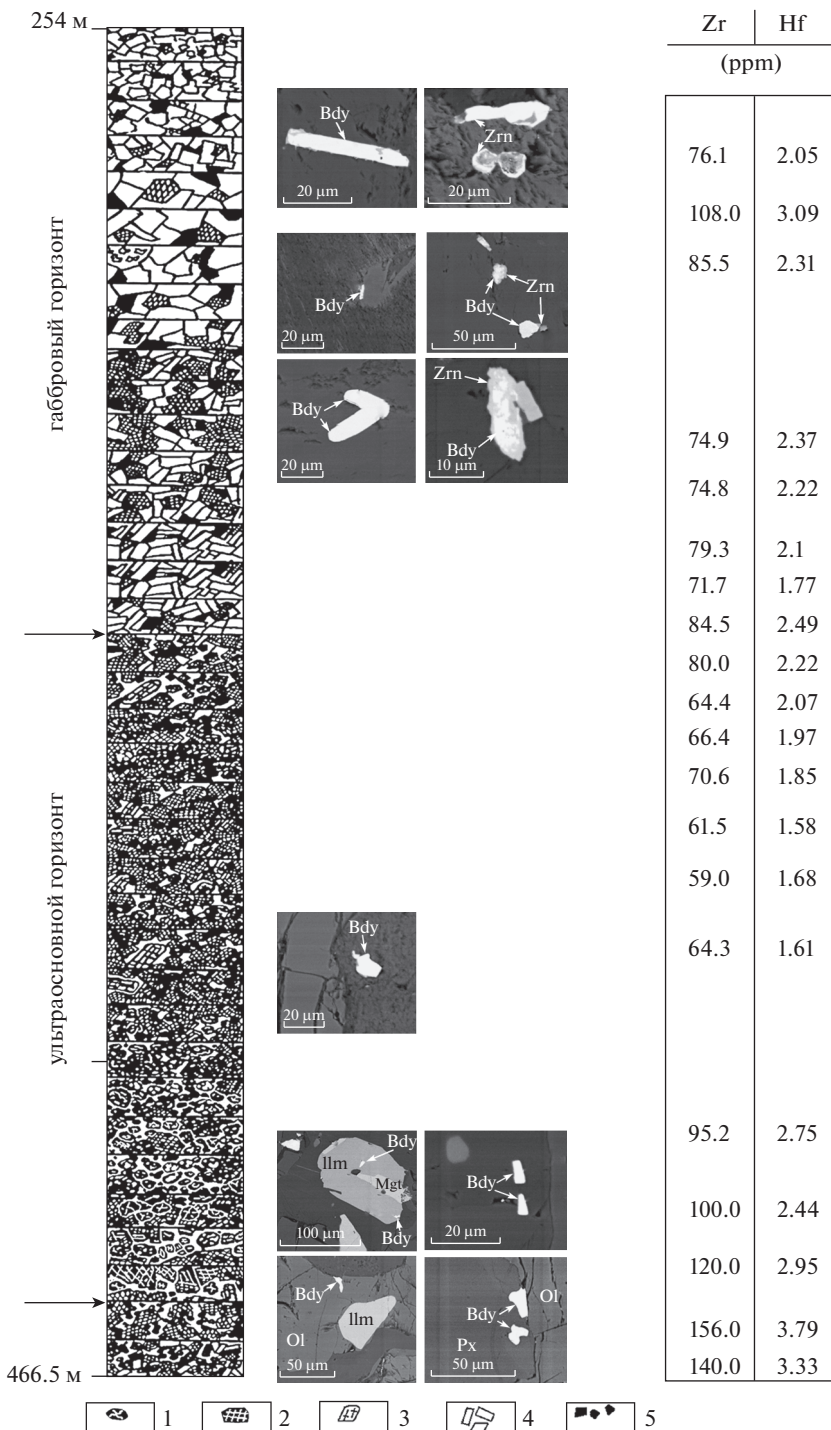
Циркон обнаружен только в габбровом горизонте. Он представлен призматическими кристаллами, часто образующими сростки (рис. 2, ж, з). Относительно крупные единичные кристаллы зональны, в направлении от центра к краям в них повышается количество HfO_2 (1.3 и 1.59 мас. %) и снижается количество ThO_2 (3.09 и 1.1 мас. %) и UO_2 (0.96 и 0.83 мас. %); Th/U (3.22 и 1.33) (рис. 2, з). В породе встречен сросток двух кристаллов циркона, имеющих темные ядра, окруженные более светлой каймой. Химический состав ядерных частей и каймы резко различен: в ядрах установлены HfO_2 , Al_2O_3 , ThO_2 , UO_2 , CaO и MgO при Th/U 3.19–3.23, а в кайме циркон содержит только гафний – $(\text{Zr}_{0.99}\text{Hf}_{0.01})_{1.00}\text{Si}_{1.00}\text{O}_{4.00}$. Возможно, ядра циркона являются ксеногенными кристаллами, захваченными расплавом при контаминации корового (?) материала, что встречается довольно часто в магматических комплексах Южного Урала (Ковалев и др., 2018). Особый интерес представляет микрофотография “e” на рис. 2, на которой изображено зерно, состоящее из темной и светлой фаз. Первая представлена цирконом, в котором в качестве примесей присутствуют HfO_2 , TiO_2 , CaO , FeO и MgO , а вторая – бадделеитом, состав которого и примесные компоненты полностью аналогичны бадделеиту основной массы пород – $(\text{Zr}_{0.96}\text{Hf}_{0.01}\text{Ti}_{0.01}\text{Fe}_{0.02})_{1.00}\text{O}_{2.00}$ (табл. 1). Как видно из анализа изображения, процесс замещения развивается по периферии кристалла с проникновением темной фазы (циркона) вовнутрь кристалла по микротрещинам либо дислокациям кристаллической решетки. Сохранившиеся участки светлой фазы (бадделеита) имеют “корродированные”, неправильные очертания. Аналогичные, но более мелкие выделения изображены на рис. 2, д.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как уже отмечалось выше, в литературе описано замещение бадделеита цирконом при метаморфизме и воздействии на породу флюидов, привносящих кремнезем (Naglov, 2015 и ссылки выше). В нашем случае это замещение обусловлено процессом магматической дифференциации расплава в промежуточной камере, когда в ходе кристаллизационно-гравитационной дифференциации силикатов ранней генерации (оливина, клино- и ортопироксена) остаточный расплав обогащается кремнеземом и формируются породы габбрового горизонта. При этом, наблюдается определенная специфика в распределении элементов по разрезу интрузивного тела. В частности, при средних содержаниях циркония 88.9 ppm в ультраосновных породах и 82.6 ppm – в габброидах, установлено обогащение этим элементом нижней части пикритового горизонта (рис. 3). Для объяснения особенностей распределения циркония по разрезу тела были рассчитаны температуры кристаллизации основных пороодообразующих минералов, “ответственных” в первую очередь за перераспределение элементов при дифференциации расплава. Средняя температура кристаллизации ортопироксена, рассчитанная по двупироксеновым геотермометрам (Wood, Banno, 1973, Wells, 1977, Perchuk, 1977, Kretz, 1982) соответствует 1070 °С. Расчеты температуры кристаллизации оливина,

Рис. 3. Петрографический разрез нижнего тела мисалгинского комплекса и содержания в породах циркония и гафния. 1 – оливин; 2 – клинопироксен; 3 – ортопироксен; 4 – плагиоклаз; 5 – рудный минерал.

Fig. 3. Petrographic section of the lower body of the Miselga complex and the content of zirconium and hafnium in the rocks. 1 – olivine; 2 – clinopyroxene; 3 – orthopyroxene; 4 – plagioclase; 5 – ore mineral.



выполненные по оливин–клинопироксеновому геотермометру (Loucks, 1996) показали, что температура кристаллизации оливина из основной массы пород варьирует в пределах от 1050 до 1185 °С, в то время как в центральных частях кристаллов она составляет 1470 °С, что оказывается близко к экспериментально определенной температуре кристаллизации бадделеита в ультраосновном расплаве – 1400 °С (Анфилогов и др., 2018). Таким образом, наблюдаемое обогащение цирконием нижнего интервала интрузивного тела (рис. 3) при относительно равномерном его распределении как в габбровом, так и пикритовом горизонтах, вероятнее всего, является результатом ранней кристаллизации бадделеита и его гравитационного осаждения в виде включений в оливине и пироксене (см. выше).

В заключение необходимо отметить, что мисаелгинский комплекс, охарактеризованный в данной работе, может служить модельным объектом для приближенной оценки более масштабных процессов, реализующихся в промежуточных очагах при формировании крупных магматических провинций, в связи с чем возникает проблема определения “первичности” циркона в дифференцированных интрузиях и производных процесса дифференциации расплава.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания (тема № 0252-2017-0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев А.А., Алексеева Г.В., Ковалев С.Г. Расслоенные интрузии западного склона Урала. Уфа: Гилем, **2000**. 188 с.

Анфилогов В.Н., Краснобаев А.А., Рыжков В.М. Древний возраст цирконов и проблемы генезиса дунитов габбро–гипербазитовых комплексов складчатых областей и платформенных массивов центрального типа // Литосфера. **2018**. № 5. С. 706–717.

Аранович Л.Я., Зингер Т.Ф., Бортников Н.С., Шарков Е.В., Антонов А.В. Циркон из габброидов осевой зоны Срединно-Атлантического хребта (впадина Маркова, 6° с.ш.): корреляция геохимических особенностей с петрогенетическими процессами // Петрология. **2013**. Т. 21. № 1. С. 4–19.

Аранович Л.Я., Бортников Н.С., Зингер Т.Ф., Борисовский С., Матреничев В.А., Перцев А.Н., Шарков Е.В., Сколотнев С.Г. Морфология и элементы-примеси циркона из океанической литосферы осевой зоны Срединно-Атлантического хребта (6°–13° с.ш.): свидетельства особенностей магматической кристаллизации и постмагматических преобразований // Петрология. **2017**. Т. 25. № 4. С. 335–361.

Баянова Т.Б. Бадделеит – перспективный геохронометр щелочного и базитового магматизма // Петрология. **2006**. Т. 14. № 2. С. 203–216.

Добрецов Н.Л., Чепуров А.И., Сонин В.М., Жимулев Е.И. Устойчивость циркона в системе MgO–SiO₂–H₂O при 2.5 ГПа // Геология и геофизика. **2019**. Т. 60. № 4. С. 527–531.

Каулина Т.В. Образование и преобразование циркона в полиметаморфических комплексах. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, **2010**. 144 с.

Ковалев С.Г. Дифференцированные диабаз–пикритовые комплексы западного склона Южного Урала. Уфа: ИГ УНЦ РАН, **1996**. 90 с.

Ковалев С.Г., Ковалев С.С., Высоцкий С.И., Пучков В.Н. Находки “древних” цирконов в магматических породах Шатакского комплекса (Южный Урал) и их петрогенетические следствия // ДАН. **2018**. Т. 482. № 5. С. 553–557.

Кузнецов Д.В., Мукатова А. Образование бадделеита при десицикации циркона в родингитизированных высокобарических гранатитах массива Миндяк на Южном Урале // Ежегодник-**2012**. Тр. ИГГ УрО РАН. **2013**. Вып. 160. С. 224–228.

Скублов С.Г., Мельник А.Е., Марин Ю.Б., Березин А.В., Богомолов Е.С., Ишмурзин Ф.И. Новые данные о возрасте (U–Pb, Sm–Nd) метаморфизма и протолита эклитоподобных пород района Красной губы, Беломорский пояс // ДАН. **2013**. Т. 453. № 1. С. 319–325.

Скублов С.Г., Красоткина А.О., Макеев А.Б., Галанкина О.Л., Мельник А.Е. Уникальная находка преобразования циркона в бадделеит (рудопроявления Ичетью, Средний Тиман) // Известия вузов. Геология и разведка. **2018**. № 1. С. 27–35.

**First Data on Baddeleyit-Zircon Mineralization
in Differentiated Intrusions of the Bashkir Meganticlinorium**

S. G. Kovalev^{a,*}, V. N. Puchkov^b, S. S. Kovalev^a, and S. I. Vysotsky^a

^a*Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre RAS,
K. Marx st., 16/2, Ufa, 450077 Russia*

^b*Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS,
Vonsovsky str., 15, Yekaterinburg, 620016 Russia*

**e-mail: kovalev@ufaras.ru*

The article gives the first description of baddeleyite-zircon mineralization in differentiated intrusions of the Bashkir meganticlinorium (Southern Urals). It has been established that baddeleyite is distributed throughout the section of the intrusive body, and zircon is found only in the gabbro horizon, where the replacement of baddeleyite with zircon is described in detail. It is concluded that this replacement was due to the process of magmatic differentiation of the melt in the intermediate chamber, when during the crystallization-gravitational differentiation of silicates of early generation, the residual melt was enriched with silica and gabbro horizon rocks were formed.

Keywords: Bashkir meganticlinorium, Taratash complex, zircon, baddeleyite, picrites, gabbro, magmatic differentiation

REFERENCES

- Alekseev A.A., Alekseeva G.V., Kovalev S.G.* Stratified intrusions of the western slope of the Urals. Ufa: Gilem, **2000**. 188 p. (in Russian).
- Anfilogov V.N., Krasnobaev A.A., Ryzhkov V.M.* The ancient age of zircons and problems of the genesis of dunites of gabbro-hyperbasite complexes of folded areas and platform massifs of the central type. *Lithosphere*. **2018**. N 5. P. 706–717. (in Russian).
- Aranovich L.Ya., Singer T.F., Bortnikov N.S., Sharkov E.V., Antonov A.V.* Zircon in gabbroids from the axial zone of the Mid-Atlantic ridge, Markov Deep, 6° N: correlation of geochemical features with petrogenetic processes. *Petrology*. **2013**. Vol. 21. N 1. P. 1–16.
- Aranovich L.Ya., Bortnikov N.S., Singer T.F., Borisovsky S., Matrenichev V.A., Pertsev A.N., Sharkov E.V., Skolotnev S.G.* Morphology and impurity elements of zircon in the oceanic lithosphere at the Mid-Atlantic ridge axial zone (6°–13° N): evidence of specifics of magmatic crystallization and postmagmatic transformations. *Petrology*. **2017**. Vol. 25. N 4. P. 339–365.
- Bayanova T.B.* Baddeleyite: a promising geochronometer of alkaline and basic magmatism. *Petrology*. **2006**. Vol. 14. N 2. P. 187–201.
- Ernst R.E., Pease V., Puchkov V.N., Kozlov V.I., Sergeeva N. D., Hamilton M.* Geochemical characterization of Precambrian magmatic suites of the Southeastern margin of the East European Craton, Southern Urals, Russia. *Geological collection*. IG UNC RAS. **2006**. N 5. P. 1–45.
- Hanchar J.M., Hoskin P.W.O.* Zircon. *Rev. Miner. Geochem.* **2003**. N 53. 500 p.
- Harlov D.* Fluids and geochronometers: charting and dating mass transfer during metasomatism and metamorphism. *J. Indian Inst. Sci.* **2015**. Vol. 95. P. 109–124.
- Dobretsov N.L., Chepurov A.I., Sonin V.M., Zhimulev E.I.* Zircon stability in the system MgO–SiO₂–H₂O at 2.5 GPa. *Russian Geol. Geophys.* **2019**. Vol. 60. N 4. P. 527–531.
- Kaulina T.V.* The formation and transformation of zircon in polymetamorphic complexes. Apatity: Kola Scientific center of RAS, **2010**. 144 p. (in Russian).
- Kovalev S.G.* Differentiated diabase–picrite complexes of the western slope of the Southern Urals. Ufa: IG UC RAS. **1996**. 90 p. (in Russian).
- Kovalev S.G., Kovalev S.S., Vysotsky S.I., Puchkov V.N.* Finds of “ancient” zircons in igneous rocks of the Shatak complex (Southern Urals) and their petrogenetic consequences. *Doclady Earth Sci.* **2018**. Vol. 482. N 2. P. 1270–1274.
- Kretz R.* Transfer and exchange equilibria in a portion of the pyroxene quadrilateral as deduced from natural and experimental data. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **1982**. N 46. P. 411–422.
- Kuznetsov D.V., Mukatova A.* Formation of baddeleyite during zircon desilication in rhodogitic high-pressure granulites of the Mindyak massif in the Southern Urals. *Yearbook-2012. Proc. IGG UB RAS*. Iss. 160. **2013**. P. 224–228. (in Russian).
- Loucks Robert R.* A precise olivine-augite Mg–Fe–exchange geothermometer. *Contrib. Miner. Petrol.* **1996**. Vol. 125. P. 140–150.

Perchuk L.L. Thermodynamic control of metamorphic processes. In: *Energetics of Geological Processes*. Eds. Saxena S.K. and Bhattacharji S. New York: Springer, **1977**. P. 285–352.

Skublov S.G., Melnik A.E., Marine Yu.B., Berezin A.V., Bogomolov E.S., Ishmurzin F.I. New data on the age (U–Pb, Sm–Nd) of metamorphism and protolith of eclogitic rocks from the Krasnaya Guba region, Belomorsky belt. *Doklady Earth Sci.* **2013**. Vol. 453. N 1. P. 1158–1164.

Skublov S.G., Krasotkina A.O., Makeev A.B., Galankina O.L., Melnik A.E. A unique finding of zircon into baddeleyite transformation (the Ichetju ore occurrence, the middle Timan). News of higher educational institutions. *Proc. of Higher Schools. Geology and Exploration.* **2018**. N 1. P. 27–35 (in Russian).

Wells P.R.A. Pyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contrib. Miner. Petrol.* **1977**. Vol. 62. N 2. P. 129–139.

Wingate M.T.D. SHRIMP baddeleyite and zircon ages for an Umkondo dolerite sill, Nyanga Mountains, Eastern Zimbabwe. *South African J. Geol.* **2001**. Vol. 104. P. 13–22.

Wood B.J., Banno S. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems. *Contrib. Miner. Petrol.* **1973**. Vol. 42. N 2. P. 109–124.