МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИИ И НЕОДНОРОДНОСТИ СОСТАВА ЦИРКОНА ИЗ МИАСКИТ-КАРБОНАТИТОВОГО КОМПЛЕКСА ВИШНЁВЫХ ГОР, ЮЖНЫЙ УРАЛ

В.И. Попова, В.А. Попов, В.А. Котляров

*Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия;
popov@mineralogy.ru*

MINERALS ASSOCIATIONS AND COMPOSITIONAL HETEROGENEITY OF ZIRCON FROM MIASKITE-CARBONATITE COMPLEX OF THE VISHNEVYE MOUNTAINS, SOUTH URALS

V.I. Popova, V.A. Popov, V.A. Kotlyarov

*Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS, Miass, Chelyabinsk oblast, 456317 Russia;
popov@mineralogy.ru*

В щелочных породах, пегматитах и карбонатитах Вишнёвых гор цирконы сокристаллизовались с породообразующими силикатами (полевыми шпатами, нефелином, аннитом и др.), а также с некоторыми другими минералами (пироксеном, магнетитом, ильменитом, апатитом, монацитом, кальцитом и др.) и не относятся к метакристаллам. Облик кристаллов циркона (их ограничение и габитус) меняется от дипирамидального (в миаскитах) к короткопризматическому (в биотитовых сиенитах), в щелочных пегматитах – от дипирамидального до призматического, в карбонатитах – с комбинацией дипирамид, что объясняется изменением щелочности минералообразующей среды от ранней щелочной (миаскиты) к менее щелочной (сиениты) и щелочной (карбонатиты). Преобладают зональные и зонально-секториальные кристаллы циркона с вариациями содержания HfO_2 , реже – относительно однородные. В разных кристаллах циркона содержание HfO_2 в периферических зонах кристаллов либо возрастает, либо уменьшается и меняется незакономерно. Секториальность состава циркона наиболее проявлена в отличии содержания HfO_2 в периферических зонах призм {100}, {110}, а также дипирамид {111} и {221}. Разведанные запасы циркона ~75 тыс. т при прогнозных более 100 тыс. т могут быть востребованы при необходимости.

Илл. 8. Табл. 1. Библ. 26.

Ключевые слова: циркон, миаскит-карбонатитовый комплекс, Вишнёвые горы, Южный Урал.

In alkaline rocks, pegmatites and carbonatites of the Vishnevye Mountains, zircons co-crystallized with rock-forming silicates (feldspars, nepheline, annite, etc.), as well as with some other minerals (pyroxene, magnetite, ilmenite, apatite, monazite, calcite, etc.) and cannot be ascribed to metacrystals. The morphology of zircon crystals (their cut and habit) varies from dipyrmidal (in miaskites) to short prismatic (in biotite syenites), from dipyrmidal to prismatic in alkaline pegmatites, and with a combination of dipyrmidal in carbonatites, which is explained by variation in alkalinity of mineral-forming conditions from early alkaline (miaskites) to less alkaline (syenites) and alkaline (carbonatites). Zonal and zonal-sectorial zircon crystals with variations in the HfO_2 content are dominant and relatively homogeneous crystal rarely occur. In different zircon crystals, the HfO_2 content of peripheral zones either increases or decreases and unevenly vary. Sectorial composition of zircon is mostly related to distinct HfO_2 contents of peripheral zones of prisms {100}, {110} and dipyrmid {111} and {221}. The reserves of zircon of are ~75 kt and possible resources are >100 kt.

Figures 8. Table 1. References 26.

Key words: zircon, miaskite-carbonatite complex, Vishnevye Mountains, South Ural.

Введение

Циркон в Вишнёвых горах впервые указывался в россыпи р. Маук (Щуровский, 1841), а в коренном залегании – в «гранито-гнейсах» (миаскитах) на горе Кобелевой (Зайцев, 1884) и в жилках среди нефелиновых сиенитов (миаскитов) на горе Ерёминой (Сущинский, 1900). Крупные кристаллы циркона (до 10–12 см) встречались в нефелин-полевошпатовых пегматитах горы Каравай (Амеландов, 1929), объединенных позднее в систему жил № 5. И.И. Шафрановский (1933) исследовал образцы с цирконом из миаскитов и миаскитовых пегматитов на горах Ерёминой, Валёжихе, Каравай и в руднике «Шпат» в Курочкином Логе, а также в мусковитовом сиенит-пегматите горы Мохнатой. Пегматиты жилы № 5 и россыпи циркона по западному склону Вишнёвых гор разведаны в 1937–1939 гг. (Исаков, 1940ф). В дальнейшем циркон был выявлен и в разной степени охарактеризован в образцах из миаскитов, сиенитов, альбититов, фенитов и многочисленных жильных и прожилковых тел щелочных пегматитов и карбонатитов (Бонштедт-Куплетская, 1951; Исаков и др., 1953ф; Чесноков, 1959, 1960; Халезова, 1963; Еськова и др., 1964; Попова, Чесноков, 1980; Попова и др., 1985; Левин и др., 1997; Недосекова и др., 2016).

Ниже приведен краткий обзор ранее опубликованных сведений о распространении, морфологии и составе циркона и полученных нами новых данных о минеральных парагенезисах и неоднородности состава зональных и зонально-секториальных кристаллов циркона по микрозондовым данным.

Материалы и методы исследования

Исследованы кристаллы циркона из сборов Б.В. Чеснокова в 1952–1955 гг. и 1963 г. из пегматитов жил № 5 на горе Каравай и жил Курочкина Лога, переданные нам в 1978 г., а также отобранные нами из разных пегматитовых жил, рудных зон и пород в процессе полевых исследований 1982–1984 гг. и эпизодически в 2003–2017 гг. Единичные образцы получены от А.В. Донскова, В.А. Губина, С.Н. Никандрова, Т.П. Нишанбаева, С.Г. Епанчинцева, А.М. Кузнецова и Е.П. Макагонова. Форма 50 крупных кристаллов охарактеризована визуально с применением прикладного гониометра (с учетом ранних гониометрических данных). Чертежи кристаллов циркона в стандартной установке, а также фотографии образцов и сечений кристал-

лов выполнены В.А. Поповым. Состав зон роста циркона (140 анализов) и сопутствующих минералов из щелочных пород, пегматитов и жильных карбонатитов, вскрытых горными выработками в рудных зонах 140, 147, 125 и жильных телах Курочкина Лога и на горах Долгой, Каравай, Мохнатой, Ерёминой, а также из керна разведочных скважин, исследован в Институте минералогии УрО РАН В.А. Котляровым на СЭМ РЭММА-202М с ЭДС LZ-5 Link Systems с Si-Li-детектором при ускоряющем напряжении 30 кВ, токе зонда 4 нА, диаметре зонда 5 мкм с использованием эталонов MINM 25–53 и Mineral Mount Serial № 01–44, а также на СЭМ Tescan Vega3 sbu с ЭДС Oxford Instruments X-act при ускоряющем напряжении 20 кВ (аналитик И.А. Блинов). Частично использованы нейтронно-активационные снимки сечений кристаллов (Попова, Чесноков, 1980), облученных в 1978–1984 гг. в течение 5 минут потоком тепловых нейтронов 3.2×10^{10} нейтр/см²·сек в реакторе ВВР-К в Казахстане с экспозицией на фотопластинках через 15 минут после облучения (Попова, 1995). Содержание элементов-примесей в облученных кристаллах циркона определялось нейтронно-активационным анализом (АИ-4046, Ge(Li)-детектор, аналитик М.А. Татаркин, ВИМС, г. Москва).

Краткие сведения о распространённости циркона в Вишнёвых горах

В северной части Ильменогорско-Вишневогорского комплекса щелочных пород в Вишнёвых горах – от горы Мохнатой на севере до долины р. Большой Маук на юге – циркон встречается в интрузивных миаскитах Центрального (Главного) массива, включающего Центральную щелочную полосу, и седловидной залежи Западного тела, а также в сиенитах, альбититах и неоднородно-полосчатых фенитах (биотитовых, пироксеновых и пироксен-биотит-амфиболовых), пегматитах разного состава и карбонатитах (рис. 1) (Шафрановский, 1933; Исаков, 1940ф; Бонштедт-Куплетская, 1951; Халезова, 1963; Еськова и др., 1964; Левин и др., 1997; Недосекова и др., 2016). Геологическое строение щелочного комплекса Вишнёвых гор наиболее полно приведено в монографиях (Еськова и др., 1964; Левин и др., 1997).

Сиенитовые (биотит-полевошпатовые и пироксен-полевошпатовые) и миаскитовые (биотит-нефелин-полевошпатовые) пегматиты образуют самостоятельные жильные тела. Миаскитовые

пегматиты нередко зональные с преобладанием полевых шпатов в эндоконтактах. По нашим данным, в карьерах сиенитовые пегматиты пересекаются жилами нефелин-полевошпатовых пегматитов, а в жиле № 35 нефелин-полевошпатовый пегматит пересекается эгирин-полевошпатовым пегматитом. В полостях жил щелочных пегматитов и по секущим трещинам в жильных телах и вмещающих щелочных породах проявлены более поздняя анальцим-натролитовая минерализация (Еськова и др., 1964) и сеть кварцсодержащих арфведсонит-полевошпатовых прожилков с тенардит-мирабилитовой минерализацией (Никандров, 1983), наиболее часто встречающихся в рудной зоне 140.

Содержание акцессорного циркона в миаскитах составляет около 0.08–0.13 % площади исследованных образцов (Еськова и др., 1964). В шлифах отмечались дипирамидальные и короткопризматические кристаллики циркона и зерна «неправильной» формы величиной 0.2–0.3 мм, изредка до 1 см. По данным В.Я. Левина с соавторами (1997), миаскиты рудной зоны 147 содержат ~0.1 мас. % циркона, а карбонатиты ~0.03 мас. %. В биотитовых и биотит-мусковитовых сиенитах, залегающих среди миаскитов и пироксеновых фенитов, содержание циркона 0.06–0.11 об. % (Еськова и др., 1964), а в пироксеновых фенитах циркон редок.

Наиболее распространен циркон в нефелин-полевошпатовых (миаскитовых) пегматитах, где величина его индивидов и сростков составляет от первых миллиметров до 2–10 см при содержаниях 0.1–0.3 об. %. Наиболее богаты цирконами жилы № 3–5, 30 и ряд жил в северной части горы Долгой (рис. 1). В миаскитовых и сиенитовых пегматитах циркон по количеству обычно преобладает над пироксеном (Бонштедт-Куплетская, 1951), а в жилах и прожилках карбонатитов рудных зон пироксена больше, чем циркона, независимо от их количества (Славинский и др., 1957ф; Левин и др., 1997; и др.).

Рис. 1. Схема локализации пегматитов и рудных зон в Вишнёвых горах (составлена М.Г. Исаковым в 1950 г. по материалам В.С. Красулина, Е.А. Кузнецова, Ф.А. Сенникова, В.Д. Водопьянова и Вишневогорской ГРП, с дополнением).

1–5 – вмещающие породы: 1 – миаскиты, 2 – щелочные сиениты и фениты, 3 – гранито-гнейсы, 4 – плагиогнейсы, кристаллические сланцы, амфиболиты, кварциты; 5 – серпентиниты; 6 – жилы щелочных пегматитов; 7 – рудные зоны (Св – Светлоозёрский участок); 8 – изогипсы рельефа.

Fig. 1. Scheme of location of pegmatites and ore zones in the Vishnevye Mountains (modified after materials of M.G. Isakov (1950), V.S. Krasulin, E.A. Kuznetsov, A.F. Sennikov, V.D. Vodop'yanov, and Vishnevogorsky GRP).

1–5 – host rocks: 1 – miaskites, 2 – alkali syenites and fenites, 3 – granite gneisses, 4 – plagiogneisses, crystalline schists, amphibolites, quartzites; 5 – serpentinites; 6 – veins of alkaline pegmatites; 7 – ore zones (Св – Svetloe Ozero area); 8 – relief isohypses.

Предполагается, что кристаллизация циркона миаскитов и карбонатитов происходила в периоды 470–275 млн лет назад (Краснобаев, 1986; Краснобаев и др., 2010) или 440–250 млн лет назад при температурах от 670–580°C (Левин и др., 1997) на глубинах более 5 км. Близкие данные приведены И.Л. Недосековой с соавторами (2016): циркон из миаскитов и карбонатитов датирован ~430–410 млн лет, а из пегматитов и поздние генерации циркона из миаскитов и карбонатитов – 350–250 млн лет. За длительный период геологического развития в Вишневогорском миаскитовом массиве и его экзо-контактовом ореоле сформировались структуры с Nb-Zr минерализацией («оруденением»), среди которых наиболее существенны пять (Славинский и др., 1957ф): 1 – зоны дробления в участках контактов Центрального массива миаскитов (рудная зона 147, где циркона в 1.5 раза больше, чем пироклора); 2 – субсогласные и кососекающие тела нефелин-полевошпатовых пегматитов (жилы № 5, 8, 9, 20, 30, 68, 69, 132 и др., также обогащенные цирконом); 3 – трещины оперения сбросо-сдвигов, секущих контакт Центрального массива миаскитов (свиты жил № 123–124, 137, 141 с преобладанием пироклора над цирконом); 4 – надвиги в миаскитах Западного тела и связанные с ними трещины оперения и трещиноватости под Будымским массивом серпентинитов (обогащенные пироклором рудные зоны 140, 144, 116, 148); 5 – трещины расслоения и сдвига в «замках» поперечных антиклинальных складок (пироклорсодержащие свиты жил № 37, 110, 111 и др.).

Можно предполагать, что при древнекембрийском орогенезе (~160 млн лет назад) и дальнейших тектонических движениях (Геология..., 1969) миаскитовый массив и вмещающие его породы были вскрыты процессами денудации. При последующей эрозии миаскитов и щелочных сиенитов (с пегматитами и карбонатитами) и сносе материала в лога среди миаскитов и в пониженные участки (преимущественно западного экзоконтакта миаскитового массива) формировались цирконовые россыпи. Наиболее значимые россыпи разрабатывались в Чупруновом, Курочкином и Свистуновом логах на восточном склоне Вишнёвых гор и в долине р. Маук, а на западном склоне гор – в долинах рек Горькая, Халдиха и Спириха и на склоне горы Ерёмной (Исаков, 1940ф; Исаков и др., 1953ф). Вариации содержаний циркона в разных частях россыпей составляли 0.5–10 кг/м³, реже – до 100 кг/м³ и более. Россыпи восточного склона гор и участка

долины р. Маук, в основном, отработаны, а в россыпях западного склона разведанные запасы циркона ~75 тыс. т при прогнозных более 100 тыс. т (Левин и др., 1997).

Морфология циркона в породах и жилах Вишнёвых гор

Первое сообщение о форме кристаллов циркона (до 1 мм) из миаскитов горы Кобелевой было приведено А.М. Зайцевым (1884), указавшего комбинацию преобладающей дипирамиды {111} с меньшими гранями призм {110} и {100}. Позднее И.И. Шафрановский (1933) при исследовании формы кристаллов циркона из миаскитов и миаскитовых пегматитов отмечал, что всесторонне ограненные кристаллы циркона в жилах гор Ерёмной, Валёжихе, Каравай и в Курочкином Логе встречаются редко. Результаты изучения формы кристаллов циркона, полученные ранее А.М. Зайцевым (1884), А.С. Амеландовым (1929), И.И. Шафрановским (1933), Е.Е. Костылевой и М.Е. Владимировой (1934) и, частично, Э.М. Бонштедт-Куплетской (1951) и Е.Б. Халезовой (1963), суммированы в обобщающей монографии (Еськова и др., 1964) и приводятся с нашими поправками (преимущественно, ориентировки кристаллов и их местонахождения).

Для миаскитов характерны цирконы до 1–3 мм, реже – до 1 см «цирконового» типа – дипирамидального габитуса (рис. 2) с преобладанием дипирамиды {111} и малоразвитыми гранями призм {110}, {100} и дипирамид {221}, {311}, реже – с преобладанием дипирамид {221} и {111}. Кристаллы и зерна циркона встречаются в сростаниях с полевыми шпатами, нефелином, биотитом и редкими кальцитом, ильменитом, пироклором и обычно неполно огранены (Шафрановский, 1933; Еськова и др., 1964; Левин и др., 1997; наши данные), что указывает на частичную сокристаллизацию циркона с пороодообразующими минералами (т.е. цирконы в миаскитах – не метакристаллы).

Цирконы из биотитовых сиенитов субизометричны – с почти равным развитием дипирамиды {111} и призмы {100} с редкими малыми гранями призмы {110}, пинакоида {001} и дипирамид {221}, {311} и {101} (рис. 2), но также с участками индукционных поверхностей совместного роста с биотитом и полевыми шпатами. В биотит-амфиболовых и амфибол-пироксеновых разностях сиенитов цирконы несколько удлинены по оси [001].

Наиболее разнообразны по форме цирконы из альбититов, миаскитовых и сиенитовых пегматитов и жильных карбонатитов (рис. 2). В альбититах встречаются как дипирамидальные цирконы с двумя или тремя дипирамидами и маленькими гранями призм, так и субизометричные кристаллы с преобладанием дипирамиды $\{111\}$ и призмы $\{100\}$. Цирконы нефелин-полевошпатовых (миаскитовых) пегматитов частью по форме подобны цирконам из миаскитов, сиенитов и альбититов, но в некоторых крупных жилах (например, в жиле № 5 на горе Каравай) преобладают удлиненно-призматические кристаллы «гиацинтового» типа величиной до 7–

10 см с наиболее развитой призмой $\{100\}$. В пегматитах карьера г. Долгой С.Ю. Крюковым встречен циркон величиной 12 см. В биотит-полевошпатовых (сиенитовых) пегматитах кристаллы циркона также удлиненно-призматические «гиацинтового» типа, но в ряде жил встречаются и кристаллы «цирконового» типа. В разных жилах карбонатитов отмечались как субизометричные кристаллы «гиацинтового» типа, так и короткопризматические «цирконового» типа. Некоторые примеры вида реальных кристаллов циркона и взаимоотношений их с другими минералами в щелочных пегматитах и карбонатитах показаны на рисунке 3. И.И. Шаф-

Рис. 2. Идеализированная форма кристаллов циркона из миаскитов (а–ж, п, э), сиенитов (л–п), альбититов (е–л), миаскитовых (а, г–е, з–к, м–ф, ш) и сиенитовых (п–ш) пегматитов и карбонатитов (л–н, ц, ш) Вишнёвых гор.

Fig. 2. Idealized morphology of zircon crystals from miaskites (a–ж, п, э), syenites (л–п), albitites (е–л), miaskitic (а, г–е, з–к, м–ф, ш) and syenitic (п–ш) pegmatites, and carbonatites (л–н, ц, ш) from the Vishnevy Mountains.

Рис. 3. Вид кристаллов и сростков циркона с пирохлором (а), полевыми шпатами (б, в) и в агрегатах кальцит-полевошпатовом (г) и нефелин-полевошпатовом (д).

Размер образцов, см: 3 (а), 6 (б), 5 (в), 2.5 (г), 8 (д); а–в – жила № 5 (г. Каравай), г, д – г. Долгая. Фото: В.А. Попов.

Fig. 3. Zircon crystals and their intergrowths with pyrochlore (a), feldspar (б, в), in calcite-feldspar aggregate (б, в), and nepheline-feldspar aggregate (д).

Samples size, cm: 3 (a), 6 (б), 5 (в), 2.5 (г), 8 (д); а–в – vein no. 5 from Mt. Karavay; г, д – Mt. Dolgaya. Photo: V.A. Popov.

рановский (1933) указывал, что в 1895 г. П.В. Еремеев нашел три двойника циркона с плоскостью срастания (101) из россыпей Кыштымского округа. Вид такого двойника построен нами (рис. 4а, б).

В пегматитах циркон часто образует срастания с соседними минералами. Так, более обычны закономерные сростки циркона с пирохлором (рис. 4в), но встречались и ориентированные срастания двух типов (Чесноков, 1960): в первом типе грань (111) пирохлора параллельна (100) циркона, и ребро $[11\bar{2}]$ пирохлора параллельно (100) циркона (рис. 4г). Во втором типе L_4 пирохлора перпендикулярна (100) циркона, и ребро $[110]$ пирохлора параллельно $[001]$ циркона (рис. 4д). В сечениях кристаллов циркона часто встречаются мелкие вросстки других минералов, в том числе и по зонам роста циркона, но среди них закономерные срастания нами не встречены.

Неоднородности состава циркона в породах и пегматитах Вишнёвых гор

Краткий обзор опубликованных данных о составе циркона. В сводной монографии (Еськова и др., 1964) приведены результаты химических, спек-

тральных и рентгеноспектральных анализов циркона из пород и пегматитов Вишнёвых гор, включая данные И.И. Шафрановского (1933), Э.М. Бонштедт-Куплетской (1951) и Е.Б. Халезовой (1963). В цирконах из миаскитов и сиенитов установлены примеси (мас. %) HfO_2 0.8–1.0, REE_2O_3 0.2–0.3, Y 0.2, Nb_2O_5 0.02–0.05, Ti, Th, Ca, Mg, Fe, Al и в некоторых пробах следы Mn, Sr, Be. Отмечалось, что цирконы из щелочных пород содержат меньше примесей, чем цирконы из щелочных пегматитов. Это же указывалось и для щелочных пегматитов Курочкина Лога, где от периферии к центральной жил в цирконах возрастают содержания HfO_2 от 1.8 до 2.3–2.4 мас. % и REE_2O_3 от 0.30 до 0.88–1.02 мас. % (Еськова и др., 1964).

Сравнение картин зонально-секториальной окраски циркона (из миаскитового пегматита жилы № 5), люминесценции в ультрафиолетовых лучах и нейтронно-активационной радиографии в сечении параллельно (100) и $\perp(001)$ (Попова, Чесноков, 1980) показало как их частичное сходство, так и отличия. Картины окраски и люминесценции этого циркона близки, но зонально-секториальная неоднородность его на радиографии проявлена ярче (рис. 5): здесь выявлены дополнительные зоны

Рис. 4. Двойник циркона по (101) (а, б), незакономерный сросток циркона с пироксеном (в) и два типа закономерных сростаний циркона с пироксеном (г, д).

Fig. 4. Zircon twin along (101) (a, б), irregular zircon-pyroxene aggregate (в), and two types of regular zircon-pyroxene intergrowths (г, д).

Рис. 5. Картины зонально-секториальной окраски (а), люминесценции (б) и нейтронно-активационной радиографии кристалла циркона в сечении (100) (в) и (001) (г) из жилы № 5.

Fig. 5. Patterns of zonal-sectorial color (a), luminescence (б) and neutron activation radiography of zircon crystal in cross-section (100) (в) and (001) (г) from vein no. 5.

и детали строения с менее излучающими зонами (темные на рис. 5в, г). В сечении $\perp(001)$ циркона (рис. 5г) внутренние зоны призмы $\{110\}$ зональные с преобладанием менее излучающих зон. По данным нейтронно-активационного анализа (Попова и др., 1985) в последовательных зонах пирамид нарастания граней дипирамиды $\{111\}$ и призмы $\{100\}$ выявлены переменные количества Hf и Zr с возрастанием содержания Hf от центра кристалла к краю, более контрастные в зонах призмы (рис. 6).

По результатам лазерной абляции в миаскитах, миаскистовом пегматите жилы № 5 и жильных карбонатах выделены магматогенные (I–II) и метаморфогенные (III–IV) цирконы (Недосекова и др., 2016). В мелких зернах (до 1 мм) отмечены неоднородности как в виде первичной зональности, так и «ядра» с каймой обрастания. Вариации содержаний Hf в цирконах I–IV из миаскистов и пегматита жилы № 5 составили 0.72–1.07 мас. % независимо от его типов, в цирконах I–II из карбонатов ~0.45–0.7 мас. %, а в цирконах III–IV ~0.58–0.93 мас. %. Цирконы типа I из карбонатов выделяются повышенными содержаниями Y, Th, U и суммы РЗЭ, а содержания прочих элементов в цирконах разных типов малы (0–0.000п мас. %), достигая в отдельных участках зерен до 0.0п мас. % (возможно, из-за микровключений ассоциирующих минералов).

Новые данные о неоднородности состава циркона, полученные нами в 2017–2018 гг. при исследовании образцов из биотитовых сиенитов, миаскистов, пегматитов сиенитовых и миаскистовых, а также жильных тел карбонатов, показали вариации примесей Hf (реже – Th, Y, U, Fe) и преобладание зональных и зонально-секториальных по составу кристаллов циркона наряду с более редкими относительно однородными индивидами.

В лейкократовых биотитовых сиенитах зоны 140 зональный циркон встречается в ассоциации с полевыми шпатами, ильменитом, магнетитом, фторкальциопирохлором, рутилом, пиритом, сфалеритом и редким кальцитом. В периферической зоне циркона содержание HfO_2 составляет 1.76 мас. %, что втрое выше, чем в центральной части кристалла (рис. 7а; табл., ан. 1, 2).

Меланократовый биотитовый сиенит с кальцитом, титанитом, ильменитом, алланитом-(Ce), торитом, торанитом, бастнезитом-(Ce), синхизитом-(Ce) и фторкальциопирохлором (кern C-6970, район жилы № 35) содержит циркон с 1.44 мас. % HfO_2 , практически однородный в сечении кристалла.

Биотитовый слюдит в экзоконтакте миаскистового пегматита жилы № 5 на г. Каравай в полевошпат-аннитовом агрегате с фторкальциопирохлором содержит зерна циркона размером до 2.5 мм. В центральной части зерна содержание HfO_2 выше, чем на периферии, где зоны призмы $\{100\}$ содержит

Рис. 6. Вариации содержаний Zr и Hf в соответственных зонах роста дипирамиды $\{111\}$ и призмы $\{100\}$ в сечении (100) циркона (Рис. 5в) из жилы № 5.

Fig. 6. Variations in Zr and Hf contents of corresponding growth zones of dipyrmaid $\{111\}$ and prism $\{100\}$ in (100) cross-section of zircon (Fig. 5в) from vein no. 5.

Рис. 7. Неоднородности состава циркона (Zrn) из биотитовых сиенитов (а, б), миаскитов (в, г) и сиенитовых пегматитов (д, е).

Образцы: а, г – зона 140, б – экзоконтакт жилы № 5, в, д – карьер г. Долгой, е – жила № 133. а–j – точки анализа.

Fsp – полевошпат, Ann – аннит, Pcl – пирохлор, Cal – кальцит, Ab – альбит, Mt – магнетит, Ilm – ильменит. Epr – эпоксидная смола. BSE-фото.

Fig. 7. Compositional heterogeneities of zircon (Zrn) from biotite syenites (a, б), miaskites (в, г), and syenitic pegmatites (д, е).

Samples: а, г – zone 140; б – vein no. 5; в, д – quarry of Mt. Dolgaya; е – vein no. 133. а–j – points of analyses.

Fsp – feldspar, Ann – annite, Pcl – pyrochlore, Cal – calcite, Ab – albite, Mt – magnetite, Ilm – ilmenite. Epr – epoxy resin. BSE-photo.

больше HfO_2 по сравнению с зоной призмы {110} (рис. 7б; табл., ан. 3–5), т.е. проявлена секториальность состава циркона.

В миаските с полевыми шпатами, магнетитом и редким кальцитом из карьера г. Долгой циркон содержит меньше HfO_2 в центральной части зерна (рис. 7в; табл., ан. 6, 7). В меланократовом тонкополосчатом миаските из рудной зоны 140, секущем более ранний лейкократовый биотитовый сиенит перпендикулярно его полосчатости (кern C-1423), выявлен относительно однородный дипирамидально-призматический циркон с 1.44 мас. % HfO_2 (рис. 7г, табл., ан. 8). Нефелин в миаските частично замещен микрозернистым мусковитом («либениритом»), из аксессуарных минералов встречены фторкальциопирохлор, монацит-(Ce), бастнезит-(Ce) и Sr-содержащий барит.

В сиенитовых биотит-полевошпатовых пегматитах, вскрытых карьерами на г. Долгой, субизометричные дипирамидально-призматические кристаллы циркона встречены в сростках с аннитом, микроклином; в жиле есть и более поздние кальцит и натролит. В сечении циркона $\sim \Pi(001)$ из пегматита северной части карьера установлены вариации содержаний HfO_2 с увеличением в периферической зоне до 2.06 мас. % (рис. 7д, табл., ан. 9–13). В биотитовых и биотит-пироксеновых пегматитах серии эшинитсодержащих жил № 133 (в сиенитах ССЗ экзоконтакта миаскитового массива на г. Мохнатой) мелкие удлиненно-призматические зональные цирконы (до 1–3 мм) обогащены HfO_2 в периферической зоне дипирамиды {111} (рис. 7е, табл., ан. 14–16). В эшините-(Ce) встречаются вросстки циркона и аннита.

Таблица

Химический состав (мас. %) циркона из щелочных пород и пегматитов Вишнёвых гор

Table

Chemical composition (wt. %) of zircon from alkali rocks and pegmatites of the Vishnevye Mountains

№ ан.	№ обр.	Зона роста	SiO ₂	ZrO ₂	HfO ₂	Сумма	Формула (Si = 1)
Биотитовые сиениты, рудная зона 140							
1	В-42	ц-а	32.43	66.19	0.53	99.15	(ZrHf _{0.005})(SiO ₄)
2		κ-b	32.39	65.39	1.76	99.54	(Zr _{0.98} Hf _{0.02})(SiO ₄)
Биотитовые слюдиты, жила № 5, г. Каравай							
3	В-60	ц-d	32.34	65.58	1.82	99.74	(Zr _{0.99} Hf _{0.02})(SiO ₄)
4		κ (100)-b	32.37	65.63	1.47	99.47	(Zr _{0.99} Hf _{0.01})(SiO ₄)
5		κ (110)-с	32.55	65.92	1.29	99.76	(Zr _{0.99} Hf _{0.01})(SiO ₄)
Миаскиты, г. Долгая, карьер, горизонт 372 м							
6	В-11	ц -h	32.96	66.42	0.48	99.86	(Zr _{0.98} Hf _{0.005})(SiO ₄)
7		с -g	32.12	66.44	1.26	99.82	(Zr _{1.01} Hf _{0.01})(SiO ₄)
Миаскиты, рудная зона 140							
8	В-42а	ц-h	32.50	65.34	1.44	99.98	(Zr _{0.98} Hf _{0.01})(SiO ₄)
Сиенитовый пегматит г. Долгая, карьер, гор. 384 м							
9	В-23	ц (100)-е	32.55	66.20	1.00	99.75	(Zr _{0.99} Hf _{0.01})(SiO ₄)
10		с l-f	32.54	66.31	0.68	99.53	(Zr _{0.99} Hf _{0.01})(SiO ₄)
11		с2-g	32.45	66.18	1.21	99.84	(Zr _{0.99} Hf _{0.01})(SiO ₄)
12		с3-h	32.57	66.06	0.94	99.57	(Zr _{0.98} Hf _{0.02})(SiO ₄)
13		κ (100)-i	32.54	65.29	2.06	99.89	(Zr _{0.98} Hf _{0.02})(SiO ₄)
Сиенитовый пегматит г. Мохнатая, жила № 133							
14	В-28	ц - d	32.80	65.14	1.68	99.61	(Zr _{0.99} Hf _{0.01})(SiO ₄)
15		κ (100)-f	32.68	65.06	1.41	99.17	(Zr _{0.99} Hf _{0.01})(SiO ₄)
16		κ (111)-j	32.39	65.59	2.00	99.98	(Zr _{0.98} Hf _{0.02})(SiO ₄)
Миаскитовый пегматит, Курочкин Лог							
17	В 18	ц (111)-m	31.77	62.38	2.12	99.34	(Zr _{0.96} Hf _{0.02} Y _{0.03} Th _{0.01})(SiO ₄)
18		с (111)-l	32.14	62.30	2.64	99.86	(Zr _{0.95} Hf _{0.02} Y _{0.03} Th _{0.01})(SiO ₄)
19		κ (111)-p	32.82	61.85	1.88	99.55	(Zr _{0.92} Hf _{0.02} Y _{0.05})(SiO ₄)
20		с (221)-j	32.69	61.80	1.79	99.48	(Zr _{0.92} Hf _{0.02} Y _{0.05})(SiO ₄)
21		κ (221)-k	32.42	61.85	2.26	99.58	(Zr _{0.93} Hf _{0.02} Y _{0.05})(SiO ₄)
Миаскитовый пегматит, жила № 5							
22	В-13	ц-d	32.33	65.08	2.00	99.41	(Zr _{0.98} Hf _{0.02})(SiO ₄)
23		κ (100)-f	32.55	64.33	2.59	99.47	(Zr _{0.96} Hf _{0.02})(SiO ₄)
24		κ (110)-h	32.37	64.24	3.32	99.93	(Zr _{0.97} Hf _{0.03})(SiO ₄)
Миаскитовый пегматит, г. Долгая, карьер, гор. 384 м							
25	В-33	ц (110)-е	32.40	66.03	0.85	99.28	(ZrHf _{0.01})(SiO ₄)
26		κ (110)-i	32.58	66.61	0.29	99.48	(ZrHf _{0.005})(SiO ₄)
27		ц (111)-f	32.38	66.26	0.50	99.14	(ZrHf _{0.005})(SiO ₄)
28		κ (111)-g	32.37	66.18	0.74	99.29	(Zr _{0.99} Hf _{0.01})(SiO ₄)
Биотитовый карбонатит, Светлоозёрский участок							
29	В-5	ц -g	33.13	65.86	1.23	100.02	(Zr _{0.98} Hf _{0.01})(SiO ₄)
30		κ -f	32.68	65.87	0.52	99.73	(Zr _{0.98} Hf _{0.005} Th _{0.005})(SiO ₄)
Карбонатит-пегматит, рудная зона 147							
31	В-43	1ц-а	32.65	66.15	1.12	99.92	(Zr _{0.99} Hf _{0.01})(SiO ₄)
32		2ц-с	32.28	65.75	1.50	99.53	(Zr _{0.99} Hf _{0.01})(SiO ₄)
Карбонатит-пегматит, рудная зона 140							
33	В-56-1	ц (100)-g	32.41	66.12	0.68	99.21	(Zr _{0.99} Hf _{0.01})(SiO ₄)
34		с(100)-f	32.37	65.31	0.47	99.90	(Zr _{0.98} Hf _{0.005} Th _{0.005} U _{0.005})(SiO ₄)
35		κ (100)-d	32.42	65.63	1.06	99.11	(Zr _{0.99} Hf _{0.01})(SiO ₄)
36		κ (110)-h	32.58	65.65	1.26	99.49	(Zr _{0.98} Hf _{0.01})(SiO ₄)

Примечание. В сумму анализов включены (мас. %): ан. 17 – ThO₂ 1.03, Y₂O₃ 2.04; ан. 18 – ThO₂ 1.08, Y₂O₃ 1.70; ан. 19, 20, 21 – Y₂O₃ 3.00, 3.20 и 3.05, соответственно; ан. 30 – ThO₂ 0.66; ан. 34 – ThO₂ 1.06 и UO₂ 0.69. Зоны кристаллов: ц – центр, с – средняя, κ – край; а-м – точки анализа.

Note. Analytical sum includes (wt. %): analyses 17 – ThO₂ 1.03, Y₂O₃ 2.04; 18 – ThO₂ 1.08, Y₂O₃ 1.70; 19, 20, 21 – Y₂O₃ 3.00; 3.20 and 3.05, respectively; 30 – ThO₂ 0.66; 34 – ThO₂ 1.06, UO₂ 0.69. Crystal zones: ц – center, с – intermediate, κ – edge; а-м – points of analyses.

Миаскитовые пегматиты в разных жильных телах характеризуются разным содержанием циркона с варьирующими размерами, формой и составом. В пегматитах Курочкина Лога кристаллы циркона с абсолютным преобладанием граней дипирамид относительно мелкие (до 0.1–1 см) и образуют вросстки в полевых шпатах, нефелине, канкрините и титаните (с участками индукционных поверхностей сокристаллизации), иногда в ассоциации с фторапатитом и пироксеном. Так, в двойнике титанита из жилы № 2 включение дипирамидального циркона характеризуется примесью Th при меньшем содержании Y_2O_3 в зонах дипирамиды {111} относительно дипирамиды {221}; периферические зоны роста их отличаются содержанием HfO_2 (рис. 8а, табл., ан. 17–21). В кристалле циркона в агрегате с аннитом, магнетитом, ильменитом и пироксеном в последовательных зонах дипирамиды (рис. 8б) содержание HfO_2 составляет 0.80, 1.25 и 1.16 мас. %, соответственно. В других кристаллах циркона в ассоциации с урансодержащим пироксеном и канкринитом из жил Курочкина Лога содержание HfO_2 также невысокое. В эгирине жилы № 2 Курочкина Лога встречен циркон с вросстком бадделеита ZrO_2 (Попов, Блинов, 2018).

Наиболее разнообразна зональность крупных кристаллов циркона в миаскитовых пегматитах жилы № 5 на г. Каравай. Повышенные содержания HfO_2 характерны для периферических зон кристаллов: дипирамида {111} → призма {100} → призма {110} (рис. 5, 8д; табл., ан. 22–24). В эндоконтакте субмеридиональной выработки жилы № 5 на южном склоне г. Каравай относительно ранний зональный кристалл циркона содержит мельчайшие (5–18 мкм) зерна иттриалита-(Y), торита и ксенотима-(Y) (Попова и др., 2019). В исследованных нами крупных кристаллах циркона (с контрастными по интенсивности окраски зонами) из центральной части жилы № 5 содержания HfO_2 в зонах разных пирамид несколько отличаются. Так, в одном из кристаллов с тонкой зональностью (рис. 8в) вариации содержаний HfO_2 составляют (мас. %): 0.24–1.06 – в зонах призмы {100}, 0.56–0.71 – в зонах дипирамиды {221} и 0.29–0.76 – в зонах дипирамиды {111}, где зоны с меньшими содержаниями нередко выделяются более светлой коричневой окраской. В кристалле с более «крупными» зонами (рис. 8г) содержания HfO_2 составляют 1.53–3.23 мас. % (т.е. в 1.5–2 раза выше), но более светлоокрашенные зоны также беднее Hf. В жиле № 5 несколько выделяются цирконы из по-

лостей, частично заполненных альбит-натролитовыми агрегатами: в таких цирконах периферические зоны светло-коричневые полупрозрачные до прозрачных, а центральные участки коричневые. В сечении кристалла, близком (001), содержание HfO_2 увеличивается от 2 мас. % в центральной коричневой части к периферии до 2.59 мас. % в зоне призмы {100} и до 3.32 мас. % в зоне призмы {110} (рис. 8д; табл., ан. 22–24).

Циркон из миаскитового пегматита одной из жил в карьере г. Долгой встречен в агрегате с полевыми шпатами, аннитом, нефелином и мелкими зернами марганцовистого ильменита, фторапатита и кальцита. В сечении циркона содержание HfO_2 в центральной зоне роста призмы {110} в 2.6 раза выше относительно периферии кристалла, а в зонах дипирамиды {111} тенденция обратная – в периферической зоне больше HfO_2 (табл., ан. 25–28; рис. 8е).

Биотит-кальцитовые карбонатиты Светлоозёрского участка (восточной ветви зоны 147 – за озером Светлым) содержат акцессорные титанит, фторапатит, магнетит, пирит, пирротин, халькопирит и более редкие мелкие циркон и урансодержащий пироксен. В образце керна скважины 3401 циркон относительно однородный и содержит 1.23 мас. % HfO_2 , и только тонкая периферическая зона беднее HfO_2 , но обогащена ThO_2 (табл., ан. 29–30).

В кальцитовом карбонатит-пегматите, слагающем жилу в эгириновом сиените западной (основной) части рудной зоны 147, в керне скважины 3740 в кальците выявлены мелкие кристаллики циркона и их сростки (до 0.5–1 мм), содержащие 0.91–1.85 мас. % HfO_2 . В ассоциации с цирконом встречаются фторапатит и монацит-(Ce). Разные зерна циркона относительно однородны (один из примеров приведен в табл., ан. 31, 32). В исследованных нами цирконах из разных жил полевошпат-кальцитовых карбонатитов рудной зоны 140 (в ассоциации с фторкальциопироксеном и галенитом) в периферических зонах циркона содержание HfO_2 1.06–1.26 мас. % – почти вдвое выше, чем в центральных его участках (табл., ан. 32–36).

Закключение

Данные о морфологии циркона и взаимоотношениях его с минералами щелочных пород, пегматитов и карбонатитов Вишнёвых гор, а также результаты исследования неоднородностей состава кристаллов циркона позволяют сделать ряд выводов.

Рис. 8. Сечения зональных кристаллов циркона из миаскитовых пегматитов Курочкина Лога (а–б), жилы № 5 (в–д) и карьера г. Долгой (е).

а, б, е – BSE-фото; в–д – косое освещение. Фото: В.А. Попов.

Fig. 8. Cross-sections of zonal zircon crystals from miaskitic pegmatites of Kurochkin Log (a–b), vein no. 5 (v–d) and quarry of Mt. Dolgaya (e).

а, б, е – BSE-photo, в–д – oblique light. Photo: V.A. Popov.

1. Цирконы в миаскитах, сиенитах и жильных телах щелочных пегматитов и карбонатитов сокристаллизовались с пороодообразующими силикатами (полевыми шпатами, нефелином, аннитом и др.), а также с некоторыми другими минералами (пироксеном, магнетитом, ильменитом, апатитом, монацитом, кальцитом и др.), т.е. не являются метакристаллами.

2. Облик кристаллов циркона (их огранка и габитус) в последовательно сформировавшихся щелочных породах и жильных телах пегматитов и карбонатитов меняется от дипирамидального (в миаскитах) к короткопризматическому (в биотитовых сиенитах), а в щелочных пегматитах – от дипирамидального до призматического. В карбонатитах цирконы относительно редки и представляют собой комбинацию дипирамид. Такая тенденция, вероятно, обусловлена изменением щелочности минералообразующей среды (Попов, Попова, 1996) от ранней щелочной (миаскиты) к менее щелочной (сиениты) и затем к щелочной (карбонатиты).

3. Среди исследованных кристаллов циркона преобладают зональные и зонально-секториальные по составу кристаллы с вариациями содержаний HfO_2 , реже – относительно однородные. Примеси Th, Y, U, Fe, REE, Ca, Ti, Nb и P в ряде случаев обусловлены наличием микровостков торита, фторкальциопироксена, монацита-(Ce), фторапатита, иттриалита-(Y) и других (Недосекова и др., 2016; Попова и др., 2019).

4. В неоднородных по составу цирконах в зонах роста кристаллов вариации содержаний HfO_2 составили 0.29–3.32 мас. %. Они характеризуются как возрастанием в периферических зонах кристаллов, так и уменьшением или незакономерны, что может указывать на неоднократное и разнонаправленное изменение минералообразующей среды в нестабильной тектонической обстановке.

5. В секториальных кристаллах циркона выявлены отличия содержаний HfO_2 в периферических зонах призм {100}, {110} и дипирамид {111} и {221}, вероятно, обусловленные различием меха-

низмов роста граней разных простых форм (разными типами строительных частиц) в изменяющихся условиях кристаллизации.

6. Оставшиеся в Вишнёвых горах разведанные запасы циркона в россыпях западного склона ~75 тыс. т при прогнозных более 100 тыс. т (Левин и др., 1997), а также цирконы в жилах и россыпях восточного склона горы Ерёминой могут быть востребованы при необходимости.

Авторы признательны Б.В. Чеснокову, А.В. Донскову, В.А. Губину, С.Н. Никандрову, Т.П. Нишанбаеву, С.Г. Епанчинцеву, А.М. Кузнецову и Е.П. Макагонову, в разные годы передавших для исследования некоторые образцы циркона, а также И.А. Блинову и М.А. Татаркину за ряд анализов циркона. Исследования выполнены по госбюджетной теме АААА-А17-117020250032-1.

Литература

- Амеландов А.С.** (1929) Материалы к познанию нефелиновых пегматитов Каслинского района на Урале. *Известия Геолкома*, **48**(6), 148–155.
- Бонштедт-Куплетская Э.М.** (1951) Минералогия щелочных пегматитов Вишнёвых гор. М., АН СССР, 176 с.
- Геология СССР (1969) Пермская, Свердловская, Челябинская и Курганская области. М., Недра, XII, часть 1, кн. 2, 304 с.
- Еськова Е.М., Жабин А.Г., Мухитдинов Г.Н.** (1964) Минералогия и геохимия редких элементов Вишнёвых гор. М., Наука, 319 с.
- Зайцев А.М.** (1884) Геологический очерк Кыштымской и Каслинской дач в Среднем Урале. *Труды Общества естествознания Казанского университета*, **13**(3), 1–38.
- Исаков М.Г.** (1940ф) Окончательный отчет по разведке цирконовых россыпей и поискам коренных месторождений циркона и редкоземельных минералов на Вишнёвых и Потаниных горах в 1937–1940 гг. Кн. 1. Свердловск, Союзцветметразведка, Вишневогорская ГРП, 213 с.
- Исаков М.Г., Водопьянов В.Д., Чесноков Б.В.** (1953ф) Подсчет запасов по цирконовым россыпям Вишневогорского месторождения на 1/VII–1953 г. Кн. 1. Вишневогорск, Вишневогорская ГРП, 314 с.
- Костылева Е.Е., Владимирова М.Е.** (1934) Циркон / Минералогия Союза, серия А, выпуск **2**, 43–47, 65–72.
- Краснобаев А.А.** (1986) Циркон как индикатор геологических процессов. М., Наука, 147 с.
- Краснобаев А.А., Русин А.И., Вализер П.М., Бушарина С.В.** (2010) Цирконология кальцитовых карбонатитов Вишневогорского массива (Южный Урал). *Доклады Академии наук*, **431**(3), 382–385.
- Левин В.Я., Роненсон Б.М., Самков В.С., Сергеев Н.С., Киселёв А.П., Левина И.А.** (1997) Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург, Урал-геолком, 274 с.
- Недосекова И.Л., Беляцкий Б.В., Белоусова Е.А.** (2016) Редкие элементы и изотопный состав гафния как индикаторы генезиса циркона при эволюции щелочно-карбонатитовой системы (Ильмено-Вишневогорский комплекс, Урал, Россия). *Геология и геофизика*, **57**(6), 1135–1154.
- Никандров С.Н.** (1983) Минерализация пострудных тектонических нарушений Вишневогорского месторождения. *Минералы и парагенезисы минералов месторождений Урала*. Свердловск, УНЦ АН СССР, 32–45.
- Попов В.А., Блинов И.А.** (2018) Первые находки бадделеита в щелочном комплексе Вишнёвых гор на Южном Урале. *Минералогия*, **4**(1), 3–7.
- Попов В.А., Попова В.И.** (1996) Парагенезисы форм кристаллов минералов. Миасс, ИГЗ УрО РАН, 103 с.
- Попова В.И.** (1995) Нейтронно-активационная радиография минералов. Миасс, ИМин УрО РАН, 188 с.
- Попова В.И., Попов В.А., Блинов И.А., Котляров В.А., Касаткин А.В., Шкода Р., Лебедева С.М.** (2019) Новые находки редких минералов в пегматитах Вишнёвых гор на Южном Урале. *Минералогия*, **5**(1), 3–14.
- Попова В.И., Татаркин М.А., Хасанов Р.А., Бобров В.А., Винокуров В.М.** (1985) К онтогении циркона из щелочных пегматитов Ильменских и Вишнёвых гор. *Проблемы онтогении минералов*. Л., Наука, 83–92.
- Попова В.И., Чесноков Б.В.** (1980) Анатомия кристаллов циркона из щелочных пегматитов Вишнёвых гор. *Онтогения пегматитов Урала*. Свердловск, УНЦ АН СССР, 91–101.
- Славинский С.С., Лукс А.А., Лисицын А.И., Ионов Т.Н.** (1957ф) Вишневогорское месторождение ниобия и его перспективы. Берёзовский, шахта № 6, 265 с.
- Сущинский П.П.** (1900) Некоторые минералогические наблюдения в Ильменских горах и Кыштымском горном округе Урала, произведённые летом 1899 г. *Труды Санкт-Петербургского общества естествоиспытателей*, **29**(5), 21–46.
- Халезова Е.Б.** (1963) О типоморфизме циркона из щелочных пород Вишнёвых и Ильменских гор. *Труды Минералогического музея АН СССР*, **14**, 182–189.
- Чесноков Б.В.** (1959) О люминесценции и внутреннем строении кристаллов циркона из Вишнёвых гор на Урале. *Записки ВМО*, **88**(5), 583–586.
- Чесноков Б.В.** (1960) О закономерных срастаниях циркона с пироксеном из Вишнёвых гор. *Материалы по геологии и полезным ископаемым Урала. Труды СГИ*, вып. **35**, 163–164.
- Шафрановский И.И.** (1933) Цирконы Вишнёвых гор. *Записки ВМО*, **62**(1), 218–258.
- Щуровский Г.** (1841) Уральский хребет в физико-географическом, геогностическом и минералогическом отношении. М., Университетская типография, 453 с. (с. 307 – циркон).

References

- Amelandov A.S.** (1929) [Materials to understanding of nepheline pegmatites of the Kasli district, Urals]. *Izvestiya Geolkomu [News of Geological Committee]*, **48**(6), 148–155. (in Russian)
- Bonstedt-Kupletskaya E.M.** (1951) [Mineralogy of alkaline pegmatites of the Vishnevy Mountains]. Moscow, AN SSSR, 176 p. (in Russian)
- Chesnokov B.V.** (1959) [About luminescence and interior structure of zircon crystals from Vishnevy Mountains]. *Zapiski VMO [Proceedings of All-Union Mineralogical Society]*, **88**(5), 583–586. (in Russian)
- Chesnokov B.V.** (1960) [About regular zircon-pyrochlore intergrowths from Vishnevy Mountains]. *Materialy po geologii i poleznym iskopaemyim Urala [Materials on geology and mineral resources of the Urals. Proceedings of Sverdlovsk Mining Institute]*, **35**, 163–164. (in Russian)
- Es'kova E.M., Zhabin A.G., Mukhitdinov G.N.** (1964) [Mineralogy and geochemistry of rare elements of the Vishnevy Mountains]. Moscow, Nauka, 319 p. (in Russian)
- Geology of USSR (1969) [Perm, Sverdlovsk, Chelyabinsk and Kurgan regions]. Moscow, Nedra, XII, part 1, book 2, 304 p.
- Isakov M.G.** (1940ф) [Final report on exploration of zircon placers and search of primary deposits of zircon and REE minerals in Vishnevy and Potaniny Mountains in 1937–1940]. Book 1. Sverdlovsk, Soyuszhvetmetrazvedka, Vishnevogorsky GRP, 213 c. (in Russian)
- Isakov M.G., Vodop'yanov V.D., Chesnokov B.V.** (1953ф) [Calculation of reserves of zircon placers of Vishnevogorsky deposit on 1/VII–1953]. Book 1. Vishnevogorsk, Vishnevogorsky GRP, 314 p. (in Russian)
- Khalezova E.B.** (1963) [About typomorphism of zircon from alkaline rocks of the Ilmeny and Vishnevy Mountains]. *Trudy Mineralogicheskogo muzeya AN SSSR [Proceedings of Mineralogical Museum of USSR]*, **14**, 182–189. (in Russian)
- Kostyleva E.E., Vladimirova M.E.** (1934) [Zircon]. In: *Mineralogia Soyuzu [Mineralogy of USSR]*, Series A, Issue 2, 43–47, 65–72. (in Russian)
- Krasnobaev A.A.** (1986) [Zircon as an indicator of geological processes]. Moscow, Nauka, 147 p. (in Russian)
- Krasnobaev A.A., Rusin A.I., Valizer P.M., Busharina S.V.** (2010) [Zirconology of calcite carbonatites of the Vishnevogorsk massif, Southern Urals]. *Doklady Earth Sciences*, **431**(3), 390–393.
- Levin V.Ya., Ronenson B.M., Samkov V.S., Sergeev N.S., Kiselev A.P., Levina I.A.** (1997) [Alkaline-carbonatite complexes of the Urals]. Yekaterinburg, Uralgeolcom, 274 p. (in Russian)
- Nedosekova I.L., Belyatsky B.V., Belousova E.A.** (2016) Trace elements and Hf isotope composition as indicators of zircon genesis due to the evolution of alkaline-carbonatite magmatic system (Ilmeny-Vishnevogorsky complex, Urals, Russia). *Russian Geology and Geophysics*, **57**(6), 891–906.
- Nikandrov S.N.** (1983) [Mineralization of postore faults of the Vishnevogorsky deposit]. *Mineraly i paragenesis mineralov mestorozhdeniy Urala [Minerals and mineral assemblages of the Ural deposits]*. Sverdlovsk, UNC AN USSR, 32–45. (in Russian)
- Popov V.A., Blinov I.A.** (2018) [First find of baddeleyite in alkaline complex of the Vishnevy Mountains, South Urals]. *Mineralogia [Mineralogy]*, **4**(1), 3–7. (in Russian)
- Popov V.A., Popova V.I.** (1996) [Assemblages of forms of mineral crystals]. Miass, IGZ UrO RAN, 103 p. (in Russian)
- Popova V.I.** (1995) [Neutron-activation radiography of the minerals]. Miass, IMin UrO RAN, 188 p. (in Russian)
- Popova V.I., Chesnokov B.V.** (1980) [Anatomy of zircon crystals from alkaline pegmatites of the Vishnevy Mountains]. *Ontogeniya pegmatitov Urala [Onthogeny of pegmatites of the Urals]*. Sverdlovsk, UNC AN SSSR, 91–101. (in Russian)
- Popova V.I., Popov V.A., Blinov I.A., Kotlyarov V.A., Kasatkin A.V., Škoda R., Lebedeva S.M.** (2019) [New findings of rare minerals in pegmatites of Vishnevy Mountains in the Southern Urals]. *Mineralogia [Mineralogy]*, **5**(1), 3–14. (in Russian)
- Popova V.I., Tatarkin M.A., Khasanov R.A., Bobrov V.A., Vinokurov V.M.** (1985) [Onthogeny of zircon from alkaline pegmatites of the Vishnevy and Ilmeny Mountains]. *Problemy ontogenii mineralov [Problems of onthogeny of minerals]*. Leningrad, Nauka, 83–92. (in Russian)
- Shafranovsky I.I.** (1933) [Zircons of the Vishnevy Mountains]. *Zapiski Mineralogicheskogo obshchestva [Proceedings of Mineralogical Society]*, **62**(1), 218–256. (in Russian)
- Shchurovsky G.** (1841) [The Ural Ridge in physico-geographical, geognostic and mineralogical relation]. Moscow, Universitetskaya tipografiya, 307 p. (in Russian)
- Slavinsky S.S., Luks A.A., Lisitsyn A.I., Ionova T.N.** (1957ф) [Vishnevogorsky Nb deposit and its perspective]. Berezovskiy, Mine No. 6, 265 pp. (in Russian)
- Sushchinsky P.P.** (1900) [Some mineralogical observations in Ilmeny Mountains and Kyshtym mining district conducted in summer of 1899]. *Trudy Saint-Petersburg Obshchestva estestvoispytateley [Proceedings of Saint-Petersburg society of naturalists]*, **29**(5), 21–46. (in Russian)
- Zaytsev A.M.** (1884) [Geological sketch of Kyshtym and Kasli dachas in the Central Urals]. *Trudy Obshchestva estestvoznaniya Kazanskogo universiteta [Proceedings of Society of Natural History of Kazan University]*, **13**(3), 1–38. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 18 июня 2019 г.