

УДК 549.0 (470.5)

DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-4-1

**ДОПОЛНЕНИЯ К СОСТАВУ УРАЛЬСКИХ БЕРИЛЛОВ
И О ВКЛЮЧЕНИЯХ В НИХ СИНГЕНЕТИЧНЫХ МИНЕРАЛОВ****В.И. Попова, В.А. Попов, М.А. Рассомахин***Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; popov@mineralogy.ru*

Статья поступила в редакцию 29.10.2023 г., принята к печати 27.11.2023 г.

**SUPPLEMENTARY TO THE COMPOSITION OF THE URAL BERYLS
AND INCLUSIONS OF SYNGENETIC MINERALS IN THEM****V.I. Popova, V.A. Popov, M.A. Rassomakhin***South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,
Miass, Chelyabinsk region, 456317 Russia; popov@mineralogy.ru*

Received 29.10.2023, accepted 27.11.2023

Аннотация. В дополнение к данным предшественников, с помощью сканирующего электронного микроскопа с энергодисперсионной приставкой охарактеризован состав зональных или зонально-секториальных кристаллов берилла из пегматитов Мариинского и Квартального месторождений Уральских изумрудных копей на Среднем Урале, гранитного пегматита копи № 242 Ильменского государственного заповедника и Светлинского пегматитового карьера на Южном Урале. Периферические светлоокрашенные зоны призмы и пинакоида в сечениях кристаллов отличаются вариациями содержания Al, Fe и Mg от внутренних зон или участков. Наличие секущих трещин и регенерированных обломков раннего берилла указывает на синминерализационную тектонику. В берилле из Мариинского месторождения выявлены ранее не отмечавшиеся синтаксические вросстки бавенита и зоны параллельно-шестоватых агрегатов сокристаллизации берилла с бавенитом, а также поздние пирит, флюорит, жисмондин-Са и тоберморит. Бериллы из копи № 242 Ильменского государственного заповедника желтовато-зеленоватые и голубоватые с периферической белой зоной и синтаксическими микровростками аннита и сингенетическими включениями колумбита и Ta-Nb рутила. Мутный голубовато-белый берилл, регенерированный бесцветным, из Светлинского карьера содержит множество синтаксических включений мусковита, ганита, кальцита, кварца и кварц-мусковитовых микроагрегатов с пиритом, халькопиритом, сфалеритом, галенитом, сидеритом, кальцитом и микропорами. Синтаксия слюд, кварца и ганита с бериллом выявлена впервые.

Ключевые слова: берилл, зональность, состав, синтаксия, минеральные включения, гранитные пегматиты, Уральские изумрудные копи, Ильменский заповедник, Светлинский пегматитовый карьер, Россия.

Abstract. In addition to the data of predecessors, the chemical composition of zoned or zoned-sectorial beryl crystals from pegmatites of the Mariinsky and Kvartalny deposits of the Urals emerald mines in the Central Urals, granitic pegmatite of mine no. 242 of the Ilmeny State Reserve and Svetlinsky pegmatite quarry in the South Urals is characterized using scanning electron microscopy and energy-dispersive analysis. The light peripheral zones of prism and pinacoid in crystal sections differ in variations in Al, Fe and Mg contents from the inner zones or areas. The presence of fractures and regenerated fragments of early beryl indicates synmineralization tectonics. In beryl from the Mariinsky deposit, the previously unknown syntactic ingrowths of bavenite and zones of parallel columnar aggregates of co-crystallization of beryl and bavenite, as well as late pyrite, fluorite, gismondine-Ca and tobermorite, are identified. Beryls from mine no. 242 of the Ilmeny State Reserve are yellowish-greenish and bluish with a peripheral white zone and syntactic microingrowths of annite and syngenetic inclusions of columbite and Ta-Nb rutile. Muddy bluish-white beryl regenerated by

colorless beryl from the Svetlinsky quarry hosts numerous syntactic inclusions of muscovite, gahnite, calcite, quartz and quartz-muscovite microaggregates with pyrite, chalcopyrite, sphalerite, galena, siderite, calcite, and micropores. The syntaxy of mica, quartz and gahnite with beryl is revealed for the first time.

Keywords: beryl, zoning, composition, syntaxy, mineral inclusions, granitic pegmatites, Urals emerald mines, Ilmeny Reserve, Svetlinsky pegmatite quarry, Russia.

Введение

Результаты многолетних исследований берилла сотрудниками ВИМСа и других организаций при содействии коллег обобщены в монографии «Бериллиевые месторождения России» (Куприянова, Шпанов, 2011). Промышленные минералы бериллия (берилл, фенакит, берtrandит и минералы группы гельвина) выявлены в рудах разного генезиса, а также в комплексных месторождениях. В соответствии с геолого-экономической направленностью этой монографии химический состав минералов был охарактеризован «валовыми» анализами. Гораздо ранее в монографии «Берилл» (Фекличев, 1964) сведены результаты исследования морфологии, структуры и состава кристаллов берилла (с указанием их цвета в некоторых таблицах), а также фотографий кристаллов и деталей их сечений. Для бериллов из пегматитов описаны вариации окраски бериллов в процессе минералообразования (Платонов и др., 1979). Обзор данных о нахождении берилла в разных месторождениях и минеральных ассоциациях, вариации состава берилла и особенностей структуры также кратко изложены в справочнике «Типоморфизм минералов» (1989, с. 69–85).

На Урале наиболее исследованы знаменитые Изумрудные копи, включающие 12 месторождений, локализованных в породах восточного и юго-восточного экзоконтакта Адуйского гранитного массива (Власов, Кутукова, 1960; Жернаков, 1980). Примеры сечений кристаллов берилла с разным чередованием зеленых зон (изумруда) с почти бесцветными зонами берилла приведены В.И. Жернаковым (2009) в Минералогическом альманахе «Изумрудные копи Урала: заметки о минералогии», но без данных о составе зон. Недавно охарактеризована зональность редкоэлементного примесного состава двух слабоокрашенных кристаллов берилла из

Уральских Изумрудных копей (Гаврильчик и др., 2021).

Ниже в статье приведены результаты исследования состава зон нескольких кристаллов берилла из авторской коллекции жил Мариинского (Мальшевского) и Квартального месторождений Изумрудных копей на Среднем Урале, а также из гранитных пегматитов Ильменского заповедника и Светлинского месторождения на Южном Урале.

Материалы и методы исследования

Исследованы срезы восьми небольших кристаллов берилла из авторской коллекции периода 1978–1983 гг., отобранных на Среднем Урале из жил гранитных пегматитов в отвалах карьеров Мариинского (Мальшевского) месторождения Уральских Изумрудных копей и Квартального месторождения в 7 км южнее Мариинского, а на Южном Урале – из копи № 242 Ильменского заповедника и из Светлинского пегматитового карьера.

Химический состав препаратов берилла в сечениях $\perp[0001]$ или $\sim\parallel[0001]$ исследован в лабораториях Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс) с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Vega-3 Tescan с энергодисперсионной приставкой (ЭДА) Oxford Instruments X-act с расчетом содержания BeO. Ранее единичные препараты берилла исследованы методом нейтронно-активационной радиографии – облучением потоком тепловых нейтронов $1.58 \cdot 10^{11}$ н/см² · сек в течение 10 мин в реакторе ВВР-К Института ядерной физики Казахстана с последующей экспозицией на фотопластинках «Изоорто» (Попова, 1995).

Для цитирования: Попова В.И., Попов В.А., Рассомахин М.А. Дополнения к составу уральских бериллов и о включениях в них сингенетических минералов. Минералогия, 9(4), 5–16. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-4-1

For citation: Popova V.I., Popov V.A., Rassomakhin M.A. Additions to the composition of the ural beryls and about inclusions of syngenetic minerals in them. Mineralogy, 9(4), 5–16. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-4-1.

Рис. 1. Схема геологического строения центрального участка Изумрудных копей и локализация месторождений, по (Жернаков, 2009) с изменениями.

1 – граниты; 2 – диориты; 3 – амфиболовые сланцы; 4 – амфиболиты; 5 – метаморфические тальк-тремолит-хлоритовые сланцы и кварциты; 6 – серпентинитовый меланж.

Fig. 1. Scheme of geological structure of the central section of the Izumrudnye kopi (Emerald mines) and location of deposits, modified after (Zhernakov, 2009).

1 – granite; 2 – diorite; 3 – amphibole schist; 4 – amphibolite; 5 – metamorphic talc-tremolite-chlorite schist, quartzite; 6 – serpentinite mélange.

Результаты исследований

Уральские Изумрудные копи известны с 1830 г. и включали около 25 выработок, к настоящему времени объединенных в 12 месторождений в породах СВ и ЮВ экзоконтакта Адуйского гранитного массива. Анализ данных о геологическом строении и минералогии месторождений Изумрудных копей Урала (Жернаков, 2009) позволяет нам изложить некоторые результаты наших исследований берилла двух разных месторождений – изумрудоносного Мариинского (Мальшевского) и берилл-танталит-колумбитового Квартального, дополняющие опубликованные ранее (рис. 1).

Берилл из гранитного пегматита Мариинского месторождения исследован в сечении $\perp[0001]$ кристалла № 45 с семью периферическими чередующимися тонкими светло-зелеными и зелеными зонами, не проявленными в режиме отраженных электронов СЭМ (рис. 2а). Берилл центрального, более трещиноватого участка (b–c–d) содержит меньше Al_2O_3 при повышенных содержаниях MgO и Na_2O относительно периферических зон (табл. 1, ан. 45а–е). В берилле выявлены микровключения флогопита (g) с формульным составом $(K_{0.93}Na_{0.06})_{0.99}(Mg_{1.89}Fe_{0.61}Al_{0.21}Ti_{0.04}Mn_{0.02})_{\Sigma 2.77}(AlSi_3O_{10})[(OH)_{1.41}F_{0.59}]_2$, клинохлора (h) $(Mg_{3.59}Fe_{1.05}Mn_{0.05})_{\Sigma 4.69}Al_{0.99}(AlSi_3O_{10})(OH)_8$ и флюорита (f) CaF_2 (рис. 2б).

Неоднородный зеленоватый кристалл берилла № 46 из отвала Мариинского месторождения исследован в продольном сечении $\sim \parallel [0001]$ (рис. 3а). В срезе визуально прослеживается внутренняя зеленовато-беловатая зона роста пинакоида, переходящая в зеленоватую, подобную цвету зоны призм. Химический состав «центрального» участка

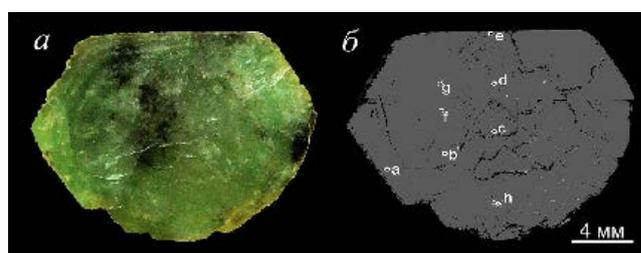


Рис. 2. Вид сечения (а) и фото в отраженных электронах (б) берилла № 45 с точками анализа.

Fig. 2. Section view (a) and BSE photo (b) of beryl no. 45 with analytical points.

берилла (е) в пирамиде роста пинакоида характеризуется повышенными содержаниями Be, Al и Si при пониженных – Na, Mg и Fe, а другие участки зон пинакоида (g, b) и призмы (d, f) содержат меньше Fe при немного повышенных – Mg и Na (табл. 1, ан. 46а–g).

Берилл содержит секущие разнонаправленные прожилки и отдельные минеральные включения (рис. 3, б–д). По отдельности $\perp[0001]$ вскрыты две зоны роста параллельно-шестоватых агрегатов берилла с бавенитом (рис. 3б), а в более ранних зонах роста берилла выявлены синтаксические вроски мельчайших зерен бавенита, светло-серого в ре-

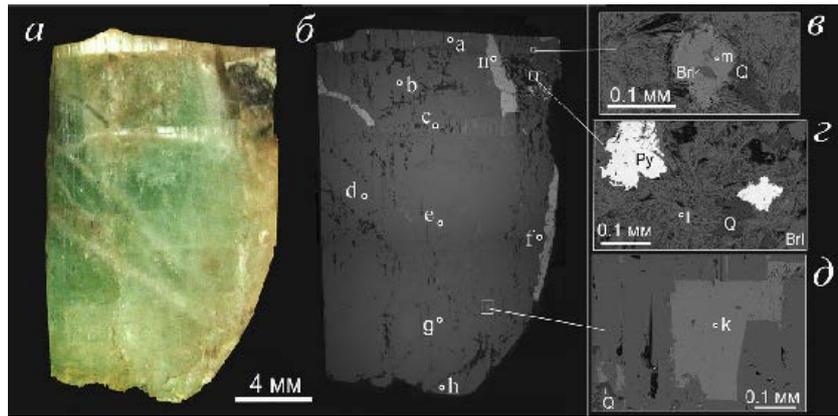


Рис. 3. Вид сечения (а) и фото в отраженных электронах (б) берилла № 46 с минеральными включениями (в–д).
Fig. 3. Section view (a) and BSE photo (б) of beryl no. 46 with mineral inclusions (в–д).

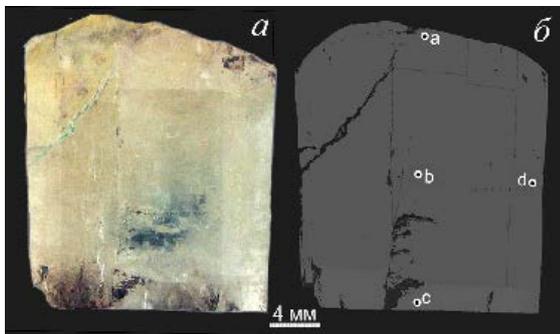


Рис. 4. Образец (а) и его BSE-фото (б) берилла Квартального месторождения.

Fig. 4. Sample (a) and its BSE photo (б) of beryl from the Kwartalnoe deposit.

жиме отраженных электронов СЭМ (рис. 3д, зерно k). Химический состав бавенита (среднее из двух близких анализов, мас. %): 24.30 CaO, 6.39 Al₂O₃, 58.22 SiO₂ ВеО_{расч.} 7.65 и Н₂О_{расч.} 3.87, Σ = 100.43 и эмпирической формулой Ca_{4.03}Ве₂(Al_{1.16}Ве_{0.84})_{Σ2}(Si₃O₁₀)(Si₆O₁₆)(OH)₂, отражающей принадлежность бавенита к изоструктурному ряду с бозеитом Ca₄Ве₄Si₆O₂₄(OH)₄.

В правой верхней части кристалла берилла видны включения пористого «лучистого» агрегата цеолита (рис. 3г), близкого по составу к жисмондину-Са (l) (мас. %): 12.63 CaO, 0.22 Na₂O, 2.47 MgO, 1.22 FeO, 26.70 Al₂O₃, 37.16 SiO₂, 16.70 H₂O (расчет), Σ = 97.10 с расчетной формулой (Si = 2 ф.е.) (Ca_{0.73}Na_{0.02})_{Σ0.75}(Al_{1.69}Mg_{0.20}Fe_{0.05})_{Σ1.94}(Si₂O₈)(OH)₃. В ассоциации с жисмондином-Са выявлены кварц, пирит и тоберморит (m), который содержит (мас. %): 35.51 CaO, 2.17 Al₂O₃, 43.40 SiO₂, 16.08 H₂O_{расч.}; Σ = 97.16 с формулой Ca_{4.97}(Si_{5.67}Al_{0.33})O₁₆(OH)₂ · 5H₂O. Ранее тоберморит отмечался в родингитовых жилах Баженовского месторождения

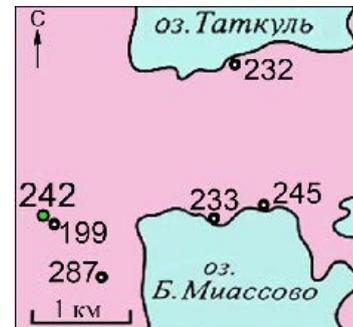


Рис.5. Положение жилы копи № 242 в породах гнейсо-амфиболитовой толщи PR2–3.

Fig. 5. Position of a vein in mine no. 242 in the Proterozoic rocks of gneiss-amphibolite sequence.

хризотил-асбеста на Среднем Урале (Кривовичев и др., 1998). И берилл, и параллельно-шестоватая бавенит-берилловая зона косо пересекается прожилками флюорита CaF₂ (n) (рис. 3б).

Берилл № 165 из кварц-полевошпатового пегматита Квартального месторождения представляет собой «верхнюю» часть короткопризматического полупрозрачного голубовато-желтоватого кристалла с нечеткими зонами роста пинакоида и призмы в сечении ~||[0001] (рис. 4). По химическому составу разные участки берилла (a, b) относительно близки, а в периферической зоне призмы (d) отмечено 0.18 мас. % FeO. Части кристалла берилла смещены по продольной трещине и их «нижняя» зона (c) выделяется пониженными содержаниями Al₂O₃ и Na₂O при повышенном содержании MgO (табл. 1, ан. 165a–d). По сравнению с бериллами Мариинского месторождения берилл Квартального месторождения более чист по составу.

Бериллы в жилах гранитных пегматитов Ильменских гор на Южном Урале известны с пер-

Таблица 1

Химический состав (мас. %) зон в бериллах Маринского (45, 46) и Кваргального (165) месторождений Среднего Урала

Table 1

Chemical composition (wt. %) of zones in beryls of the Mariinsky (45, 46) and Kvargalny (165) deposits of the Central Urals

№ обр.	45						46						165				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	f	g	a	b	c	d	
№ ан.																	
SiO ₂	66.17	65.79	65.53	65.36	65.22	67.07	67.12	66.15	67.52	67.68	66.53	67.23	67.40	66.54	66.45	65.71	
Al ₂ O ₃	17.83	17.56	16.65	17.02	17.70	18.94	18.38	18.73	18.08	19.67	17.70	17.84	19.60	19.13	19.01	18.77	
FeO	0.49	0.38	0.38	0.52	0.44	0.19	0.31	0.30	0.39	—	0.30	0.47	—	—	—	0.18	
MgO	1.11	1.48	1.70	1.69	0.75	0.51	0.73	0.43	1.08	0.24	1.13	1.28	0.13	0.07	0.26	0.19	
N ₂ O	1.28	1.39	1.55	1.62	1.13	0.97	1.00	0.85	1.30	0.58	1.31	1.35	0.77	0.78	0.68	0.68	
BeO*	12.27	12.00	12.10	11.80	12.42	12.82	12.83	12.82	12.76	13.48	12.54	12.53	13.34	13.17	13.32	12.95	
Сумма	99.15	98.60	97.91	98.01	97.66	100.50	100.37	99.28	101.13	101.65	99.51	100.60	101.24	99.69	99.72	98.48	
Эмпирические формулы (расчет на Si = 6)																	
45a	(Be _{2,67} Na _{0,23} Mg _{0,10}) _{Σ=3} (Al _{1,91} Mg _{0,05} Fe _{0,04}) _{Σ=2} (Si ₆ O ₁₈)																
45b	(Be _{2,63} Na _{0,25} Mg _{0,12}) _{Σ=3} (Al _{1,89} Mg _{0,08} Fe _{0,03}) _{Σ=2} (Si ₆ O ₁₈)																
45c	(Be _{2,66} Na _{0,28} Mg _{0,06}) _{Σ=3} (Al _{1,80} Mg _{0,17} Fe _{0,03}) _{Σ=2} (Si ₆ O ₁₈)																
45d	(Be _{2,60} Na _{0,29} Mg _{0,11}) _{Σ=3} (Al _{1,84} Mg _{0,12} Fe _{0,04}) _{Σ=2} (Si ₆ O ₁₈)																
45e	(Be _{2,75} Na _{0,20} Mg _{0,05}) _{Σ=3} (Al _{1,92} Mg _{0,05} Fe _{0,03}) _{Σ=2} (Si ₆ O ₁₈)																
46a	(Be _{2,75} Na _{0,17} Mg _{0,07} Fe _{0,01}) _{Σ=3} Al ₂ (Si ₆ O ₁₈)																
46b	(Be _{2,77} Na _{0,17} Mg _{0,06}) _{Σ=3} (Al _{1,94} Mg _{0,04} Fe _{0,02}) _{Σ=2} (Si ₆ O ₁₈)																
46c	(Be _{2,79} Na _{0,15} Mg _{0,06} Fe _{0,02}) _{Σ=3} Al ₂ (Si ₆ O ₁₈)																
46d	(Be _{2,72} Na _{0,22} Mg _{0,06}) _{Σ=3} (Al _{1,89} Mg _{0,08} Fe _{0,03}) _{Σ=2} (Si ₆ O ₁₈)																
46e	(Be _{2,87} Na _{0,10} Mg _{0,03}) _{Σ=3} Al _{2,06} (Si ₆ O ₁₈)																
46f	(Be _{2,72} Na _{0,23} Mg _{0,05}) _{Σ=3} (Al _{1,88} Mg _{0,10} Fe _{0,02}) _{Σ=2} (Si ₆ O ₁₈)																
46g	(Be _{2,69} Na _{0,23} Mg _{0,08}) _{Σ=3} (Al _{1,88} Mg _{0,08} Fe _{0,04}) _{Σ=2} (Si ₆ O ₁₈)																
165a	(Be _{2,85} Na _{0,13} Mg _{0,02}) _{Σ=3} Al _{2,06} (Si ₆ O ₁₈)																
165b	(Be _{2,85} Na _{0,14} Mg _{0,01}) _{Σ=3} Al _{2,03} (Si ₆ O ₁₈)																
165c	(Be _{2,85} Na _{0,12} Mg _{0,03}) _{Σ=3} Al _{2,02} (Si ₆ O ₁₈)																
165d	(Be _{2,84} Na _{0,12} Mg _{0,03} Fe _{0,01}) _{Σ=3} Al _{2,02} (Si ₆ O ₁₈)																

вой половины XVIII века (Менге, 1826). Два крупных кристалла берилла длиной по 25 см были найдены в 1843 г. М.И. Стрижовым в копи № 55 и переданы в музей Горного института г. Санкт-Петербурга. Более крупный кристалл берилла (длиной 60 см и 12 см в поперечнике) был добыт в 1979 г. в копи № 232, и его крупные расколовшиеся куски хранятся в музее Ильменского государственного заповедника. К настоящему времени в Ильменском заповеднике берилл известен в 70 копиях, вскрывающих жилы поздних гранитных пегматитов с амазонитом, топазом, нередко и редкоземельными минералами. Среди этих жил выделяется субширотная пегматитовая жила копи № 242 с графическими зонами от контактов с гнейсо-амфиболитовой толщей протерозоя (рис. 5).

В 1978 г. копь была частично расчищена Е.П. Макагоновым, а в 2014 г. Т.П. Нишанбаевым с коллегами в центральной части жилы вскрыт биотит-кварц-полевошпатовый блоковый пегматит с полевошпат-берилловой зоной шириной до 10 см с голубовато-зелеными участками кристаллов берилла, частично выступавшими в бывшую полость, позднее заполненную аплитом с «консервацией» кристаллов берилла (рис. 6), что не типично для пегматитов Ильменских гор. Бериллы из копи № 242 исследованы в трех небольших кристаллах № 275–277.

Берилл № 275 – часть неоднородного голубовато-зеленоватого короткостолбчатого кристалла в сечении ⊥[0001] с серией трещин и тонкой периферической желтовато-белой зоной, малозаметной на фото в режиме отраженных электронов (рис. 7а, б).

Центральная голубовато-зеленая зона (а) этого берилла содержит примесь Mg и она менее железистая с повышенными содержаниями Al относительно средней (преобладающей) зоны кристалла (b) и его тонкой периферической зоны (c) (табл. 2, ан. 275а–с).

В средней зоне берилла выявлены микровключения железистого Ta-Nb рутила (рис. 7б, врезка a, зерно (e) с формульным составом (Ti_{0,52}Fe_{0,24}Ta_{0,18}Nb_{0,13}Sn_{0,01})O₂ в сростке с марганцовистым колумбитом-(Fe) (f) состава (Fe_{0,56}Mn_{0,35}Sc_{0,09})(Nb_{1,09}Ta_{0,51}Ti_{0,28}W_{0,12})O₆, а также обилие ориентированных по трем



Рис. 6. Биотит-кварц-полевошпатовый пегматит с полевошпат-берилловой зоной и поздним аплитом в жиле № 242.

Fig. 6. Biotite-quartz-feldspar pegmatite with feldspar-beryl zone and late aplite in vein no. 242.

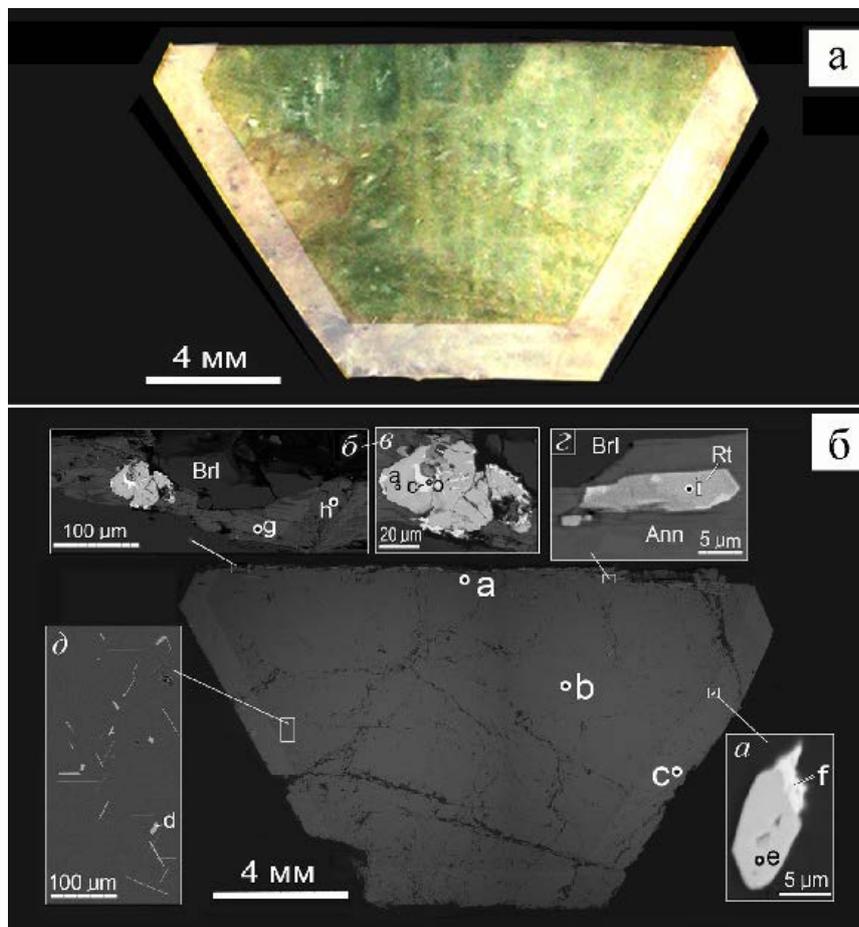


Рис. 7. Сечение зонального кристалла берилла № 275 (а), его фото в отраженных электронах с точками анализа а, b и с (б) и микровключениями танталониобатов (а–в), рутила (г) и аннита (д) из жилы № 242 Ильменского государственного заповедника.

Fig. 7. Section of zoned beryl no. 275 (a), its BSE photo with analytical points a, b, and c (b) and microinclusions of tantaloniobates (a–v), rutile (r), and annite (d) from vein no. 242 of the Ilmeny State Reserve.

системам микрозерен аннита (d) (рис. 7б, врезка d), встречающихся по всей площади средней зоны роста кристалла берилла.

В сколе кристалла берилла выявлен тонкий прожилок аннита (g) $K_{0.94}(Fe_{1.10}Al_{0.86}Mg_{0.53}$

$Ti_{0.06}Mn_{0.04})_{\Sigma 2.47}(Al_{0.91}Si_{3.09})O_{10}(OH_{1.54}F_{0.46})$ в парагенезисе с мусковитом (h) $K_{0.98}(Al_{1.30}Fe_{0.54}Mg_{0.40}Mn_{0.03}Ti_{0.01})_{\Sigma 2.29}(Al_{0.67}Si_{3.33})O_{10}(OH)_{1.53}F_{0.47}$, включающих агрегаты железистого Ta-Nb рутила $(Ti_{0.55}Fe_{0.19}Nb_{0.13}Ta_{0.12}Sn_{0.01})O_2$ (a) с марганцовисты-

Таблица 2

Химический состав (мас. %) зон в бериллах копи № 242 Ильменских государственного заповедника (275–277) и Светлинского месторождения (Св-82, Св-22) на Южном Урале

Table 2

Chemical composition (wt. %) of zones in beryls from mine no. 242 of the Ilmeny State Reserve (275–277) and Svetlinskoye deposit Св-82, Св-22) in the South Urals

№ обр. № ан.	275			276			277			Св-82		Св-22		
	a	b	c	a	b	c	d	a	b	c	d	e	1b	2b
SiO ₂	67.96	67.49	67.48	66.43	66.09	66.09	66.01	65.55	65.49	65.30	65.56	65.60	65.90	66.11
Al ₂ O ₃	19.46	19.00	19.18	18.61	18.42	18.23	19.03	18.91	19.19	19.27	18.83	19.31	18.11	19.40
FeO	0.54	1.09	1.05	0.93	0.88	0.88	0.64	0.76	0.56	0.79	0.57	0.51	0.43	0.31
MgO	0.11	–	–	0.20	0.25	0.18	–	–	–	–	–	–	–	–
Na ₂ O	0.24	0.29	0.20	0.34	0.39	0.33	0.21	0.19	0.17	0.16	0.22	0.19	0.47	0.29
BeO	13.20	13.56	13.56	13.20	13.09	12.98	13.16	13.34	13.00	13.00	13.16	12.80	13.28	13.74
Сумма	101.51	101.36	101.47	99.71	99.12	98.69	99.05	98.75	98.41	98.52	98.34	98.41	98.66*	99.85
Эмпирические формулы (расчет на Si = 6)														
275a	(Be _{2.88} Na _{0.04} Fe _{0.04} Al _{0.03} Mg _{0.01}) _{Σ3} Al ₂ (Si ₆ O ₁₈)													
275b	(Be _{2.86} Al _{0.07} Fe _{0.04} Na _{0.05}) _{Σ3} (Al _{1.99} Fe _{0.01}) _{Σ2} (Si ₆ O ₁₈)													
275c	(Be _{2.90} Fe _{0.07} Na _{0.03}) _{Σ3} (Al _{1.99} Fe _{0.01}) _{Σ2} (Si ₆ O ₁₈)													
276a	(Be _{2.86} Na _{0.06} Fe _{0.02} Mg _{0.03}) _{Σ3} (Al _{1.98} Fe _{0.02}) _{Σ2} (Si ₆ O ₁₈)													
276b	(Be _{2.86} Na _{0.07} Fe _{0.04} Mg _{0.03}) _{Σ3} (Al _{1.97} Fe _{0.03}) _{Σ2} (Si ₆ O ₁₈)													
276c	(Be _{2.87} Na _{0.06} Fe _{0.05} Mg _{0.02}) _{Σ3} (Al _{1.98} Fe _{0.02}) _{Σ2} (Si ₆ O ₁₈)													
276d	(Be _{2.91} Na _{0.06} Fe _{0.03}) _{Σ3} (Al _{1.98} Fe _{0.02}) _{Σ2} (Si ₆ O ₁₈)													
Эмпирические формулы (расчет на Si = 6)														
277a	(Be _{2.93} Al _{0.04} Na _{0.03}) _{Σ3} Al ₂ (Si ₆ O ₁₈)													
277b	(Be _{2.86} Al _{0.07} Fe _{0.04} Na _{0.03}) _{Σ3} Al ₂ (Si ₆ O ₁₈)													
277c	(Be _{2.89} Fe _{0.04} Na _{0.04} Al _{0.03}) _{Σ3} Al ₂ (Si ₆ O ₁₈)													
277d	(Be _{2.89} Na _{0.04} Fe _{0.04} Al _{0.03}) _{Σ3} Al ₂ (Si ₆ O ₁₈)													
277e	(Be _{2.81} Al _{0.12} Fe _{0.04} Na _{0.03}) _{Σ3} Al ₂ (Si ₆ O ₁₈)													
1-b	(Be _{2.90} Na _{0.08} Сs _{0.02}) _{Σ3} (Al _{1.94} Fe _{0.03}) _{Σ1.97} (Si ₆ O ₁₈)													
2-b	(Be _{2.93} Na _{0.05} Fe _{0.02}) _{Σ3} Al ₂ (Si ₆ O ₁₈)													

Примечание. Обр. Св-82 – Samebax-micro, аналитик Л.Н. Поспелова, анализ 1b содержит 0.47 мас. % Cs₂O.

Note. Sample Св-82 – Samebax-micro, analyst L.N. Pospelova, an. 1b contains 0.47 wt. % Cs₂O.

ми «колумбо-танталитами» с формульными составами (Fe_{0.42}Mn_{0.41}Sc_{0.17})_{Σ1}(Ta_{0.82}Nb_{0.79}Ti_{0.33}Sn_{0.06})_{Σ2}O₆ (b) и (Fe_{0.56}Mn_{0.39}Sc_{0.05})(Ta_{0.95}Nb_{0.56}Ti_{0.40}Sn_{0.09})_{Σ2}O₆ (c), а также почти чистого рутила (Ti_{0.93}Fe_{0.03}Nb_{0.02}W_{0.014}Sn_{0.005})O₂ (i) (см. рис. 7, врезки б–з). Ранее в низкосортном изумруде и хризоберилле (александрите) Мариинского месторождения отмечались включения рутила с меньшими примесями Ta и Nb (Попов, 2013; Попов, Ханин, 2021).

Берилл № 276 в сечении ⊥[0001] голубоватый, с тонкими секущими трещинами и краевой белой зоной (рис. 8а), на фото в режиме отраженных электронов немного темнее внутренней части кристалла (рис. 8б). В составе преобладающей центральной части берилла (а–б–с) определены меньшие содержания Al и немного повышенные – Na и Mg по сравнению с бериллом № 275, а в краевой зоне (d) содержится больше Al и отсутствует Mg (табл. 2, ан. 276а–d). В центральной части этого берилла встречены мелкие включения аннита (f), а в периферической зоне – мусковита (e).

Берилл № 277 в сечении ~||[0001] из этой же жилы также голубоватый и по цвету близок кристаллу № 276, отличаясь меньшей толщиной периферической белой зоны (рис. 9а), не выделяющейся на фото в режиме отраженных электронов (рис. 9б). В голубоватом берилле (b, c, e) определено немного больше Al, чем в краевой белой зоне (d, a) (табл. 2, ан. 277а–е).

Берилл из Санарского гранитного массива на Южном Урале впервые отметил Н.П. Барбот де Марни (1855) – трещиноватую малопрозрачную гальку «изумруда» по р. Каменке. Эта территория между реками Каменка и Санарка за ее минеральное разнообразие названа «Русской Бразилией» академиком Н.И. Кокшаровым в 1858 г., что используется и в наше время.

Бериллсодержащие пегматиты в жильных телах гранит-аплитов в рай-

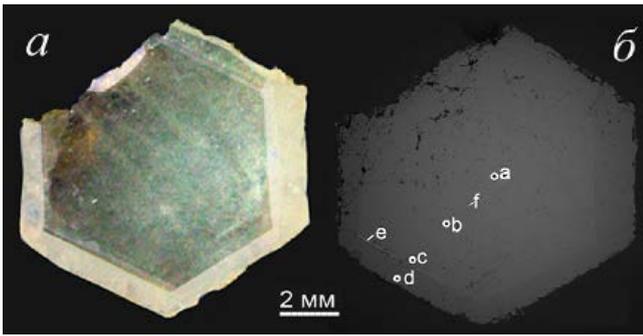


Рис. 8. Сечение зонального берилла № 276 (а) и его фото в отраженных электронах (б) с точками анализа.

Fig. 8. Section of zoned beryl no. 276 (a) and its BSE photo (b) with analytical points.

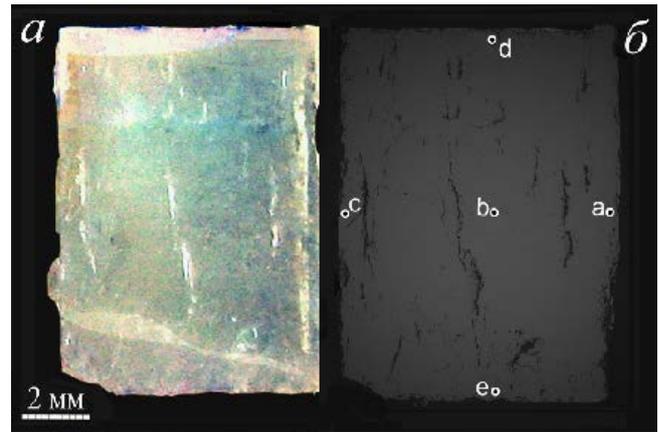


Рис. 9. Образец берилла № 277 (а) и его фото в отраженных электронах (б).

Fig. 9. Sample (a) of beryl no. 277 and its BSE photo (b).

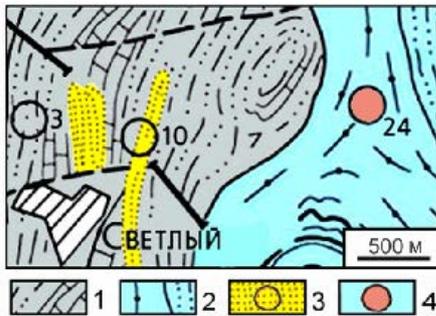


Рис. 10. Положение Светлинского пегматитового карьера.

1 – гнейсо-сланцевая толща С1; 2 – сланцево-карбонатная толща Pz1-2; 3 – оработанные россыпи золота; 4 – Светлинский пегматитовый карьер.

Fig. 10. Location of Svetlinsky pegmatite quarry.

1 – Lower Carboniferous gneiss-schist sequence; 2 – Lower to Middle Paleozoic shale-carbonate sequence; 3 – former gold placers; 4 – Svetlinsky pegmatite quarry.

оне пос. Светлый выявлены в процессе поисков золотосодержащих россыпей и шлихового опробования (Игумнов, 1935). При разведочных работах на золото в 1938 г. был вскрыт аплит с жилой пегматита и пройден небольшой карьер, вскрывший элювиальные россыпи с морионом, раухтопазом и горным хрусталем, а позднее – в расширенном Светлинском пегматитовом карьере (рис. 10) – с топазом, бериллом, турмалином и другими минералами (Коган, 1948ф; Таланцев, 1988; Колисниченко и др., 2008).

В Светлинском карьере среди многих жильных тел наиболее известно гранит-аплитовое пологозалегающее тело «Второе» (рис. 11 и 12) с субсогласными жилами мусковит-альбит-микро-

клиновых пегматитов и камнесамоцветной минерализацией (Таланцев, 1988), где находили бериллы разной окраски (голубой аквамарин, светло-желтый гелиодор, розовый воробьевит, бесцветные или беловатые «кростерит» и «гошенит») с разным габитусом (от призматического до субизометричного и таблитчатого), обычно в агрегатах с кварцем, мусковитом, полевыми шпатами и турмалином.

Из пегматита этого карьера столбчатый кристалл желтовато-зеленоватого берилла длиной 4 см в субпараллельном сростке с меньшим желтоватым бериллом передан нам С.В. Ворожевой в 1982 г. Для исследования кристалл распилен по $\sim \perp [0001]$. Оба индивида берилла в сечении зонально-секториальны с более светлыми зонами роста пинакоида (рис. 13а), что контрастно проявилось и на нейтронно-активационной радиографии (Попова, 1995) с постепенным увеличением интенсивности β -излучения (рис. 13б) из-за примеси Cs_2O (0.47 мас. %) в пирамиде роста пинакоида (табл. 2, обр. Св-82, ан. 1б).

В другой пегматитовой жиле Светлинского карьера в 2022 г. был найден небольшой участок с бериллами, внутренние мутные голубовато-белые обломки которых регенерированы почти бесцветным прозрачным бериллом (Попов, Колисниченко, 2022). Один из таких кристаллов берилла исследован в сечении $\parallel [0001]$ (рис. 14а). Его внутренний обломок характеризуется следующим составом (мас. %): 0.29 Na_2O , 0.31 FeO , 19.40 Al_2O_3 , 66.11 SiO_2 , $\text{BeO}_{\text{расч.}}$ 13.09, $\Sigma = 99.20$ с формулой $(\text{Be}_{2.85}\text{Na}_{0.05}\text{Al}_{0.08}\text{Fe}_{0.02})\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$. В этом берилле выявлены ориентированные синтаксические вросстки агрегата ганита ($\text{Zn}_{0.68}\text{Fe}_{0.31}\text{Mn}_{0.01}$)

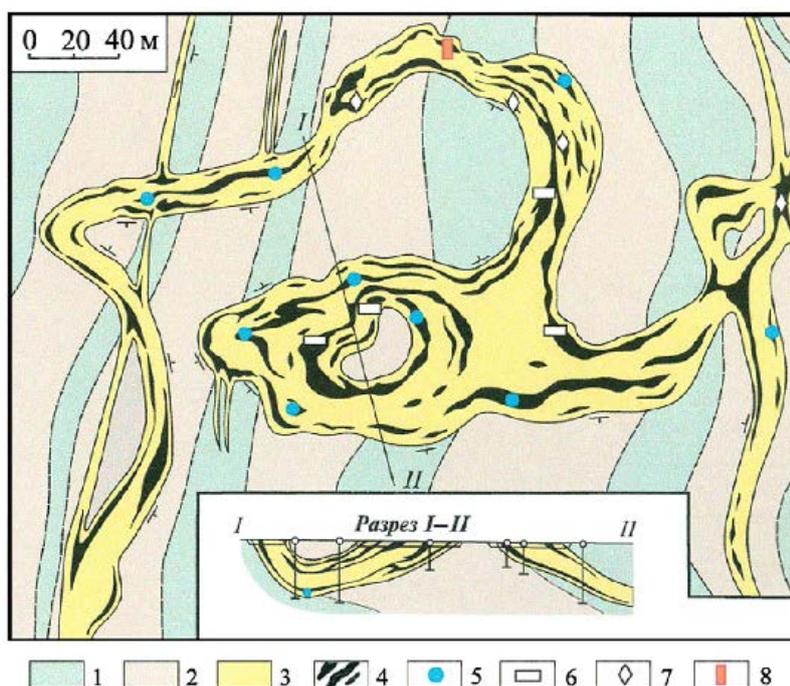


Рис. 11. Геологический план и разрез центральной части гранит-пегматитового тела Второе в Светлинском пегматитовом карьере, по (Таланцев, 1988).

1 – биотит-плагиоклаз-амфиболовые сланцы; 2 – кварц-плагиоклаз-биотитовые сланцы с гранатом и ставролитом; 3 – аплитовидные мусковитовые граниты; 4 – камерные гранитные пегматиты; 5–8 – участки находок аквамарина (5), роостерита (6), топаза (7) и полихромного турмалина (8).

Fig. 11. Geological plan and cross-section of the central part of the Vtoroe granitic pegmatite body in Svetlinsky pegmatite quarry, after (Talantsev, 1988).

1 – biotite-plagioclase-amphibole schist; 2 – quartz-plagioclase-biotite schist with garnet and staurolite; 3 – aplite-like muscovite granite; 4 – chamber granitic pegmatites; 5–8 – areas of findings of aquamarine (5), roosterite (6), topaz (7), and polychrome tourmaline (8).



Рис. 12. Вид отработанного участка Светлинского карьера с жилками пегматита в каолинизированном гранит-аплите тела Второе в 2008 г.

Fig. 12. View of a mined area in Svetlinsky quarry with pegmatite veins in kaolinized granite aplite of the Vtoroe body in 2008.

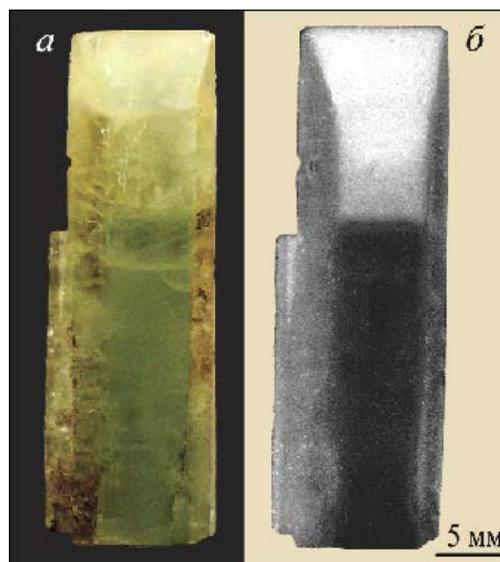


Рис. 13. Вид сечения зонально-секториального берилла № Св-82 (а) и его радиография (б), по (Попова, 1995).

Fig. 13. Section view of zoned-sectoral beryl no. Св-82 (а) and its radiography (б), after (Popova, 1995).

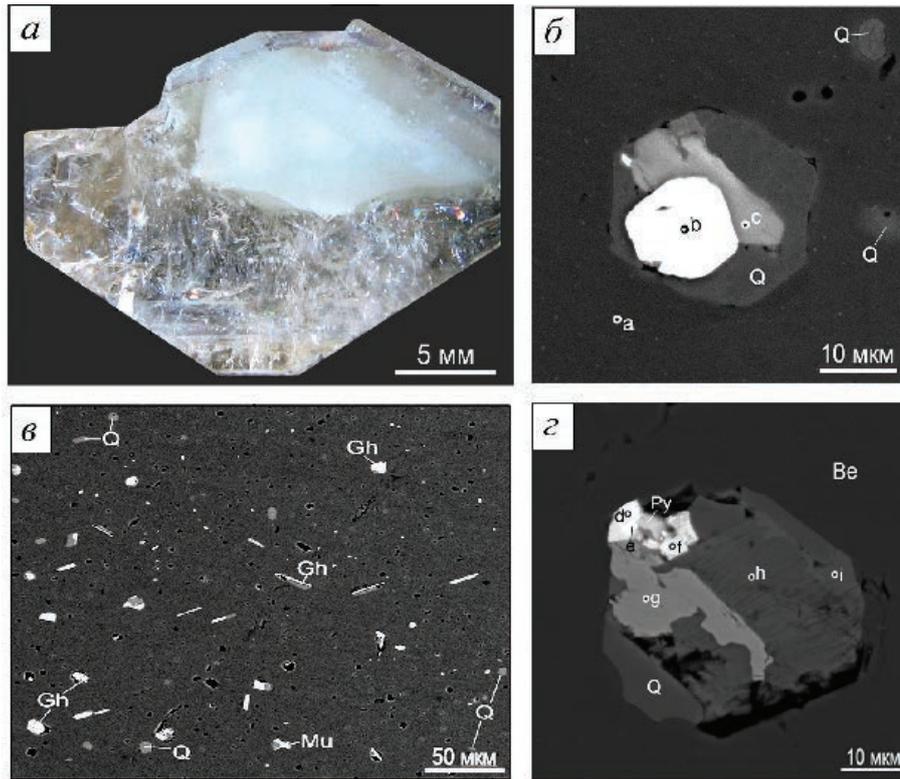


Рис. 14. а – берилл № Св-22 с включениями в голубовато-белом микропористом берилле; б – агрегат ганита (b) с кальцитом (c) и кварцем (Q) (а – берилл); в – ориентированные вросстки ганита (Gh), мусковита (Mu), кварца (Q) и микропор (черные); г – агрегата сидерита (g), сфалерита (d), халькопирита (f), галенита (e), пирита (Py), мусковита (h, i) и кварца (Q). Фото б–г – в отраженных электронах.

Fig. 14. а – beryl no. Sv-22 with inclusions in bluish white microporous beryl; б – gahnite aggregate (b) with calcite (c) and quartz (Q) (а – beryl); в – oriented ingrowths of gahnite (Gh), muscovite (Mu), quartz (Q) and micropores (black); г – aggregate of siderite (g), sphalerite (d), chalcopyrite (f), galena (e), pyrite (Py), muscovite (h, i) and quartz (Q).

Al_2O_3 с кальцитом ($Ca_{0.89}Mn_{0.07}Fe_{0.04})(CO_3)$ и кварцем (рис. 14б), а также двойники ганита с мусковитом $K_{0.87}Al_{1.78}Fe_{0.36}(Si_{3.22}Al_{0.78})O_{10}(OH)_2$ и кварцем (рис. 14в), агрегаты сидерита ($Fe_{0.87}Mn_{0.10}Mg_{0.02}Ca_{0.01})(CO_3)$ (g), сфалерита ($Zn_{0.98}Fe_{0.02}S$) (d), халькопирита $Cu_{0.99}Fe_{0.99}Zn_{0.02}S_2$ (f), галенита PbS (e), пирита FeS_2 , мусковита (h, i) и кварца (рис. 14г). Результаты анализов некоторых микрозернистых агрегатов Вi-содержащих сульфидов допускают наличие в них галенобисмутита $PbBi_2S_4$, выявленного ранее (в 2007 г.) по физическим свойствам и ЭД спектру.

Заключение

В дополнение к данным предшественников, в исследованных нами кристаллах бериллов уральских объектов установлены важные признаки их онтогенеза. В продольных и поперечных сечениях кристаллов периферические зоны и призмы, и пинакоида чаще более светлоокрашенные и отлича-

ются составом от более ранних внутренних зон или участков. Признаки дробления раннего берилла с последующей регенерацией его прозрачным бериллом свидетельствуют о синминерализационной тектонике в процессе пегматитообразования.

В ранних зонах роста берилла из Мариинского месторождения на Среднем Урале выявлены ранее не отмечавшиеся мельчайшие синтаксические вросстки бавенита, а также поздние зоны параллельно-шестоватых агрегатов сокристаллизации берилла с бавенитом. При макронаблюдениях и под бинокляром они малозаметны, а на фото в режиме отраженных электронов бавенит в берилле проявляется только при увеличении контраста; сопутствующие поздние минералы – пирит, флюорит, тоберморит, жисмондин-Са. На Южном Урале в бериллах из копи № 242 Ильменского заповедника выявлены синтаксические микрозерна аннита, а также сингенетичные включения колумбита и Та-Nb рутила.

В раннем голубовато-белом берилле из Светлинского пегматитового карьера выявлены микроскопические синтаксические вроски мусковита, ганита и кварца, почти невидимые при малых увеличениях, а также кварц-мусковитовые агрегаты с пиритом, халькопиритом, сфалеритом, галенитом, сидеритом, кальцитом и микропорами. Концентрация включений такова, что берилл становится почти непрозрачным (слабо просвечивающим). Синтаксия слюд, кварца и ганита с бериллом на микроуровне встречена впервые.

Синтаксические микровроски минералов в исследуемых препаратах важно учитывать при использовании профильной или площадной записи химического состава с применением современных приборов высокой чувствительности. Сокристаллизация берилла с Fe-Mn-карбонатами (сидеритом и марганцовистым кальцитом), а также наличие Fe-содержащих сульфидов способствовали образованию лимонита и окислов марганца в коре выветривания пегматитов Светлинского карьера, где они позднее были растворены или замещены, и в процессе полевых исследований в парагенезисах минералов пегматитов не фиксируются, тогда как «законсервированные» в берилле минералы свидетельствуют о более сложном онтогенезе пегматитовых жил.

Литература

Барбот де Марни Н.П. (1855) О минералах, встречающихся в Уральских россыпях. *Горный журнал*, **II**, 78–83.

Власов К.А., Кутукова Е.И. (1960). Изумрудные копи. М., АН СССР, 251 с.

Гаврильчик А.К., Скублов С.С., Котова Е.Л. (2021) Особенности редкоэлементного состава берилла из Уральских Изумрудных копей. *Минералогия*, **7(3)**, 32–47.

Жернаков В.И. (1980) Морфология и внутреннее строение уральских изумрудов. *Материалы конференции «Онтогенез пегматитов Урала»*. Свердловск: УНЦ АН СССР, 79–90.

Жернаков В.И. (2009) Изумрудные копи Урала: заметки о минералогии. *Минералогический альманах*, **14(2)**, 129 с.

Коган И.С. (1948ф) Отчет о геологоразведочных работах на бериллий в Кочкарском районе в 1947 г. Верхняя Санарка, 125 с. (фонды «Челябинскнедра»).

Колисниченко С.В., Попова В.И., Попов В.А. (2014) Гранитные пегматиты Борисовского массива на Южном Урале. *Минералогический альманах*, **19(1)**, 14–29.

Кривовичев В.Г., Гойло Э.А., Нестеров А.Р., Габидулин Ф.И. (1998) Тоберморит из родингитовых жил Баженовского месторождения хризотил-асбеста (Средний Урал). *Материалы конференции «Минералогические музеи»*. Санкт-Петербург: СПбГУ, 71.

Куприянова И.И. (1989) Берилл / Типоморфизм минералов: Справочник // Под ред. Л.В. Чернышёвой. М., Недра, 71–85.

Куприянова И.И., Шпанов Е.П. (2011) Бериллиевые месторождения России. Москва, ГЕОС, 353 с.

Менге И. (1826) Геогностические наблюдения в окрестностях Миасского завода. *Горный журнал*, **4**, (10), 9–20.

Платонов А.Н., Шурига Т.Н., Гинзбург А.И., Польшин Э.С., Таран М.Н. (1979) О примере эволюции окраски бериллов в процессе формирования месторождения. *Конституция и свойства минералов*, **13**, 32–45.

Попов М.П. (2013) О находке танталсодержащего рутила в изумрудах Мариинского месторождения (Уральские Изумрудные копи). *Вестник Уральского отделения Российского минералогического общества*, **10**, 89–91.

Попов В.А., Колисниченко С.В. (2022) К онтогенезу берилла в гранитных пегматитах Светлинского месторождения на Южном Урале. *Материалы конференции «Минералогия техногенеза-2022»*. Миасс: ЮН ФНЦ МиГ УрО РАН, 34–37.

Попов М.П., Ханин Д.А. (2021) О находке Sn-Ta-содержащего рутила в александрите с Мариинского месторождения (Уральские Изумрудные копи). *Вестник Уральского отделения Российского минералогического общества*, **18**, 129–131.

Попова В.И. (1995) Нейтронно-активационная радиография минералов. Миасс, ИМин УрО РАН, 188 с.

Таланцев А.С. (1988) Камерные пегматиты Урала. М., Наука, 144 с.

Типоморфизм минералов. Справочник (1989). М., Недра, 559 с.

Фекличев В.Г. (1964) Берилл. М., Наука, 118 с.

References

Barbot de Marny N.P. (1855) [About minerals found in the Urals placers]. *Gorny zhurnal [Mining Journal]*, **II**, 78–83. (in Russian)

Feklichev V.G. (1964) [Beryl]. Moscow, Nauka, 118 p. (in Russian)

Gavrilchik A.K., Skublov S.S., Kotova E.L. (2021) [Features of trace element composition of beryl from the Urals emerald mines]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **7(3)**, 32–47. (in Russian)

Kogan I.S. (1948) [Unpublished report on geological exploration work for beryllium in the Kochkar region in 1947]. Verkhnyaya Sanarka, 125 p. (Chelyabinsknefunds) (in Russian)

- Kolisnichenko S.V., Popova V.I., Popov V.A.** (2014) [Granitic pegmatites of the Borisovsky pluton in the South Urals]. *Mineralogicheskyy almanakh [Mineralogical Almanac]*, **19**(1), 14–29. (in Russian)
- Krivovichev V.G., Goilo E.A., Nesterov A.R., Gabidullin F.I.** (1998) [Tobermorite from rodingite veins of the Bazhenovsky chrysotile-asbestos deposit (Central Urals)]. *Materialy konferentsii «Mineralogicheskiye muzei» [Proceedings of the Conference “Mineralogical Museums”]*. St. Petersburg: SPbGU, p. 71. (in Russian)
- Kupriyanova I.I.** (1989) [Beryl]. In: *Tipomorfizm mineralov: Spravochnik. [Typomorphism of minerals: Handbook]* / Ed. by L.V. Chernysheva. Moscow, Nedra, 71–85. (in Russian)
- Kupriyanova I.I., Shpanov E.P.** (2011) [Beryllium deposits of Russia]. Moscow, GEOS, 353 p. (in Russian)
- [Mineralogy of hydrothermal beryllium deposits] / Ed. by A.I. Ginsburg. Moscow, Nedra, 1976, 199 p. (in Russian)
- Platonov A.N., Shuriga T.N., Ginzburg A.I., Polishin E.S., Taran M.N.** (1979) [Example of the evolution of beryl color during the formation of a deposit]. *Konstitutsiya i svoystva mineralov [Constitution and Properties of Minerals]*, **13**, 32–45. (in Russian)
- Popov M.P.** (2013) [Discovery of Ta-bearing rutile in emeralds of the Mariinsky deposit (Urals emerald mines)]. *Vestnik Ural'skogo otdeleniya Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva [Bulletin of the Urals Branch of the Russian Mineralogical Society]*, **10**, 89–91. (in Russian)
- Popov M.P., Khanin D.A.** (2021) [Discovery of Sn-Ta-bearing rutile in alexandrite from the Mariinsky deposit (Urals emerald mines)]. *Vestnik Ural'skogo otdeleniya Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva [Bulletin of the Urals Branch of the Russian Mineralogical Society]*, **18**, 129–131. (in Russian)
- Popov V.A., Kolisnichenko S.V.** (2022) [Ontogeny of beryl in granitic pegmatites of the Svetlinsky deposit in the South Urals]. *Materialy konferentsii «Mineralogiya tekhnogeneza-2022» [Proceedings of the Conference “Mineralogy of Technogenesis-2022”]*. Miass: YuU FNTs MiG UrO RAN, 34–37. (in Russian)
- Popova V.I.** (1995) [Neutron-activation radiography of minerals]. Miass, IMin UrO RAN, 188 p. (in Russian)
- Talantsev A.S.** (1988) [Chamber pegmatites of the Urals]. Moscow, Nauka, 144 p. (in Russian)
- Typomorfizm of minerals. Handbook (1989). Moscow, Nedra, 559 pp.
- Vlasov K.A., Kutukova E.I.** (1960). [Emerald mines]. Moscow, AN USSR, 251 p. (in Russian)
- Zhernakov V.I.** (1980) [Morphology and internal structure of the Urals emeralds]. *Materialy konferentsii «Ontogeniya pegmatitov Urala» [Proceedings of the Conference «Ontogeny of Pegmatites of the Urals»]*. Sverdlovsk, UNTs AN USSR, 79–90. (in Russian)
- Zhernakov V.I.** (2009) [Emerald mines of the Urals: notes on mineralogy]. *Mineralogicheskyy almanakh [Mineralogical Almanac]*, **14**(2), 129 p. (in Russian)