



УДК 549.01

DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-2-5

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ СЛОЖНОСТИ В АНАТОМИЧЕСКОЙ КАРТИНЕ КРИСТАЛЛОВ

В.А. Попов

*Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; popov@mineralogy.ru*

Статья поступила в редакцию 04.03.2024 г., после доработки 19.03.2024 г., принята к печати 01.06.2024 г.

Аннотация. Исследование минеральных индивидов с помощью современных электронных микроскопов сталкивается с необходимостью решения анатомических задач устройства кристаллов. Чтобы получить согласованные спектроскопические данные от разных приборов, надо направить зонд точно в один и тот же элемент анатомии кристалла. Обычно это сложно сделать, не видя деталей анатомической картины. В заметке приведены примеры сложного устройства элементов анатомии кристаллов разных минералов для накопления онтогенетической информации к формулировке постулатов.

Ключевые слова: элементы анатомии кристаллов, зоны роста, пирамиды нарастания, вицинали.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад авторов. В.А. Попов – разработка концепции, исследование, написание черновика рукописи, визуализация, редактирование финального варианта рукописи. Автор одобрил финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования: Попов В.А. Морфологические сложности в анатомической картине кристаллов. Минералогия, 10(2), 78–84. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-2-5.

MORPHOLOGICAL DIFFICULTIES IN AN ANATOMICAL PATTERN OF THE CRYSTALS

V.A. Popov

*South Ural Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology, Ural Branch of RAS,
Miass, Chelyabinsk region, 456317 Russia; popov@mineralogy.ru*

Received 04.03.2024, revised 19.03.2024, accepted 01.06.2024

Abstract. The study of minerals with modern electron microscopes requires the solution of anatomical problems of the crystals. To obtain consistent spectroscopic data from different instruments, it is necessary to point the microprobe directly to the same element of the crystal anatomy. This is difficult to do unknown details of an anatomical pattern. The article provides the examples of complex arrangement of elements of crystal anatomy of different minerals to accumulate ontogenetic information for the formulation of the postulates.

Keywords: elements of crystal anatomy, growth zones, growth pyramids, vicinalis.

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

Author contribution. V.A. Popov – conceptualization, investigation, writing – original draft, visualization, writing – review & editing. The author approved the final version of the manuscript prior to publication.

For citation: Popov V.A. Morphological difficulties in an anatomical pattern of the crystals. Mineralogy, 10(2), 78–84. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-2-5

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с законами ростовой анатомии кристаллов (Григорьев, 1971), все элементы анатомии (зоны роста и пирамиды нарастания в кристалле) физически и химически различны. Это различие может быть от малозаметного до весьма контрастного вплоть до другого минерального вида по современной классификации (Попов, 2011). Понимание законов анатомии кристаллов определяет пересмотр предшествующей парадигмы минералогии, и в частности, теории типоморфизма минералов. В ведении последней находятся разработки и представления о парагенетическом анализе, геотермометрах, геобарометрах и многое другое, требующее исследований минералов с хорошей точностью и высоким разрешением. Знание законов анатомии кристаллов минералов необходимо для интерпретаций не только в геологии, но и физике, биологии, медицине, приборостроении.

Исследование минеральных индивидов с помощью электронных микроскопов сталкивается с необходимостью решения анатомических задач: какой элемент анатомии кристалла исследуется? Чтобы получить согласованные спектроскопические данные от разных приборов, необходимо попасть точно в один и тот же элемент анатомии кристалла. Обычно это сложно сделать, не видя деталей анатомической картины. Ниже приведены примеры сложного устройства элементов анатомии кристаллов разных минералов.

Понимание законов ростовой анатомии кристаллов моделируется на чертежах в предположении, что кристаллы растут зеркально-гладкими гранями. В таком случае зона роста на конкретной грани кристалла достаточно однородна во всем ее пространстве. Но в реальности это далеко не всегда так (рис. 1, 2). Все скульптурные усложнения на гранях кристаллов в дальнейшем росте захораниваются и выглядят неоднородностями состава зон в виде неясных пятен или кристаллографически выделенных фрагментов зон роста.

По-видимому, первым, кто дал кристаллографическое объяснение этому явлению на примере кристаллов кварца, был минералог Г.Г. Леммлейн (1973), показавший значение ростовой скульптуры, вицинальных пирамид нарастания и двойников для состава крупных зон роста кристаллов (рис. 3, 4).

Геометрическую модель появления и исчезновения вицинальных пирамид нарастания в пределах зон роста кристаллов кварца Г.Г. Леммлейн

(1973) представил очень наглядно (рис. 5) и ее можно использовать для построений в любых минералах.

ПРИМЕРЫ С РАЗНЫМИ МИНЕРАЛАМИ

Секториально-зональная окраска в кристаллах амазонита известна давно, но долгое время такие амазониты назывались «пятнистыми». На Орловском месторождении в Забайкалье были обнаружены кристаллы калиевого полевого шпата, в которых тонкие зоны роста были как бы подчеркнуты белыми кристаллами альбита и ярко выделялись на фоне пятнистого амазонита (рис. 6). Стало ясно, что белые пятна являются пирамидами нарастания граней $\{010\}$ и $\{130\}$, а зелено-голубые – пирамиды нарастания граней $\{110\}$. В процессе кристаллизации грани разных простых форм $\{hkl\}$ по-разному захватывали Pb-предцентры окраски.

В амазонитовом гранитном пегматите копи № 63 Ильменского государственного заповедника на Урале нами наблюдалась неоднородная окраска в плоских сечениях кристаллов амазонита и спессартина (рис. 6). Амазонит имеет слабую зональность по Na, параллельную граням $\{001\}$ – сечение препарата очень близкое базопинакоиду, в котором вскрывается ярко-зеленая пирамида нарастания $\{130\}$. Состав этой пирамиды нарастания существенно обогащен Pb (Pb-предцентры зеленой окраски):

о $(K_{0.92}Na_{0.08})AlSi_3O_8$ – состав калиевого полевого шпата в пирамиде нарастания $\{001\}$;

п $(K_{0.91}Na_{0.07}Pb_{0.02})AlSi_3O_8$ – состав амазонита (калиевого полевого шпата) в пирамиде нарастания $\{130\}$.

В зональном кристалле спессартина из копи № 63 разрез препарата прошел практически параллельно грани тетрагонтриоктаэдра $\{211\}$, на которой во время роста образовались небольшие углубления около включений кварца и флюорита (рис. 7, справа). Сечение препарата вскрыло нижнюю зону роста t и верхнюю зону s:

s $(Mn_{2.13}Fe_{0.83}Ca_{0.08}Ti_{0.02})Al_{1.94}Si_3O_{12}$

t $(Mn_{2.20}Fe_{0.78}Ca_{0.02})Al_2Si_3O_{12}$.

Граница между зонами выглядит извилистой, поскольку края ямки тоже были извилистыми. Зона s на BSE-фото светлее зоны t вследствие большего содержания Fe и Mn и контрастирования снимка (Попов, Блинов, 2022).

При исследовании магнезита из тальк-хлорит-магнезитового карбонатита Уфалейского

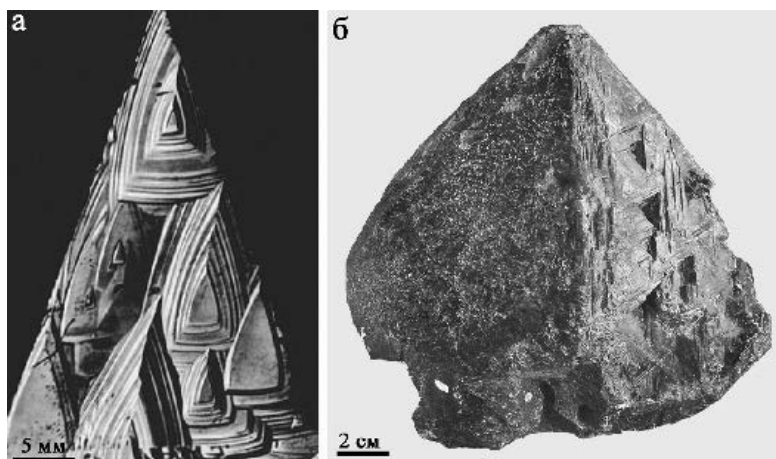


Рис. 1. Грубые ростовые бугры и ямы на гранях кварца (а) и шпинели (б).

Fig. 1. Rough growth knobs and pits on faces of quartz (a) and spinel (b).

Рис. 2. Штриховка изменения формы (100) (210) с направленным набегаем слоев роста на кристаллах пирита: а – ступеньки на штрихах; б – разная относительная скорость набега слоев в противоположные стороны от исходной вершины бугра.

Fig. 2. Hatching of the shape change (100) → (210) with directional overlapping of the growth layers on pyrite crystals: a – steps on hatches; б – different relative velocity of overlapping layers in opposite directions from the initial top of the hillock.

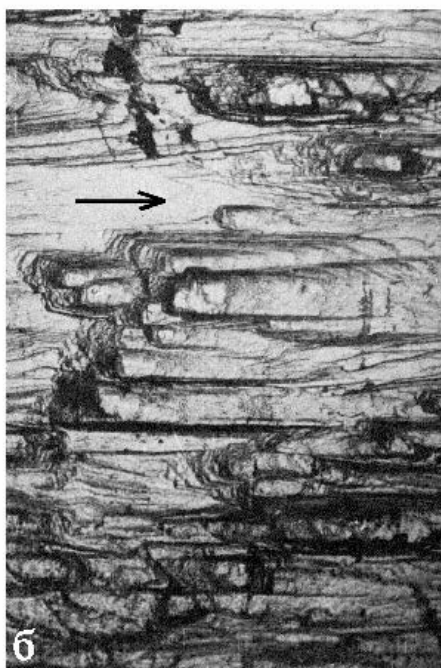
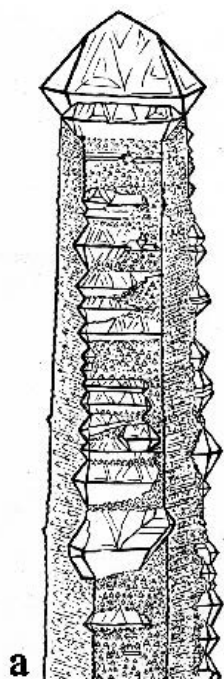
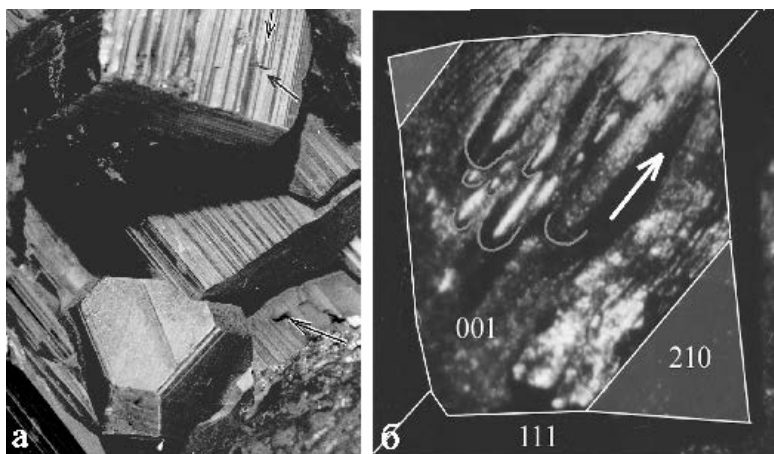


Рис. 3. Зарождение новых бугров (субиндивидов) роста на ребре с выходом отрицательного конца двойных осей кварца (а) и движение слоев роста с большей относительной скоростью в сторону положительного ребра гексагональной призмы кристалла кварца (б).

Fig. 3. Nucleation of new growth knobs (subindivides) on the edge with the exit of the negative end of the double axes of quartz (a) and the movement of growth layers with a higher relative velocity toward the positive edge of the hexagonal prism of a quartz crystal (b).

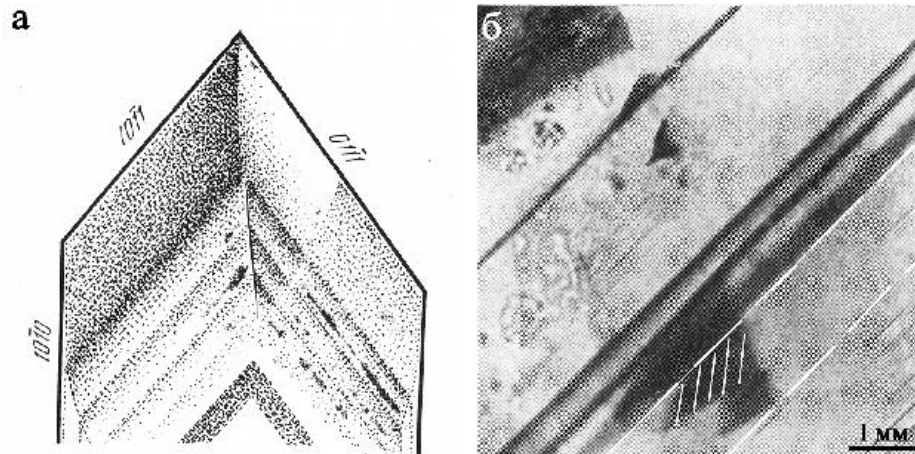


Рис. 4. Распределение дымчатой окраски кварца в анатомической картине кристалла с двойниками и вицинальными пирамидами в разных зонах роста (Леммлейн, 1973).

В некоторых зонах роста видно распределение окраски по симметрии конуса (а) с постепенным усилением или ослаблением цвета. Вицинальные сильно дымчатые пирамиды роста, возможно, связаны с появлением мелких граней тригональной дипирамиды (б).

Fig. 4. Distribution of smoky color of quartz in an anatomical pattern of the crystal with twins and vicinal pyramids in different growth zones (Lemmlein, 1973)..

Some growth zones show the color distribution along the cone symmetry (a) with gradual strengthening or weakening of the color. Vicinal strongly smoky growth pyramids are possibly related to the appearance of small trigonal dipyramid faces (b).

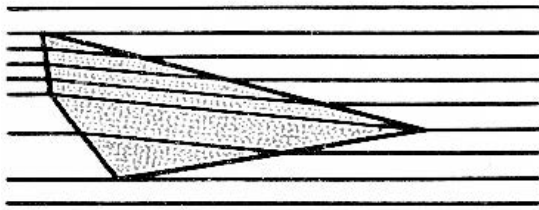


Рис. 5. Схема построения формы пирамид нарастания вицинальных граней (hkl), временно появляющихся в процессе роста основной грани (Леммлейн, 1973).

Fig. 5. Schematic shape of the growth pyramids of vicinal facets (hkl) temporarily appearing in the process of growth of the main facet (Lemmlein, 1973).

комплекса на Урале (Попов, Блинов, 2023) мы обнаружили пирамиды нарастания вицинальных граней гексагональной призмы в зонах роста спайного ромбоэдра (рис. 8). Состав магнетита в разных пирамидах нарастания одной зоны заметно отличается:

k ($\text{Mg}_{0.89}\text{Fe}_{0.10}\text{Ca}_{0.01}\text{CO}_3$) – более темная пирамида нарастания призмы (меньше Fe),

l ($\text{Mg}_{0.86}\text{Fe}_{0.13}\text{Mn}_{0.01}\text{Ca}_{0.005}\text{CO}_3$) – более светлая пирамида нарастания ромбоэдра.

Пегматиты Ильменских гор (гранитные, сиенитовые, ультрамафитовые, карбонатитовые) являются весьма информативными для исследования онтогении разнообразных цирконов. По теме данной заметки приведем два примера. В знаменитой

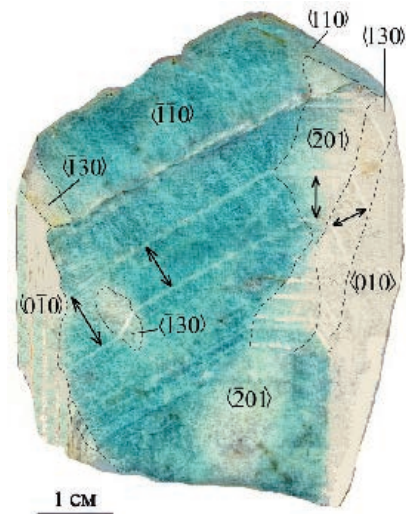


Рис. 6. Зонально-секториальный амазонит с белыми зонами, «подчеркнутыми» включениями альбита, Орловское месторождение, Забайкалье.

Размер образца 6 см.

Fig. 6. Zoned-sectoral amazonite white zones "emphasized" by albite inclusions, Orlovskoe deposit, Transbaikalia.

The sample size is 6 cm.

Блюмовской копи № 50 давно известны мелкие зеленоватые длиннопризматические цирконы из позднего парагенезиса с амазонитом, кварцем, альбитом и магнетитом. Циркон интересен анатомическим устройством, в котором заметны несколько зон с большим количеством включений мелких синхрон-

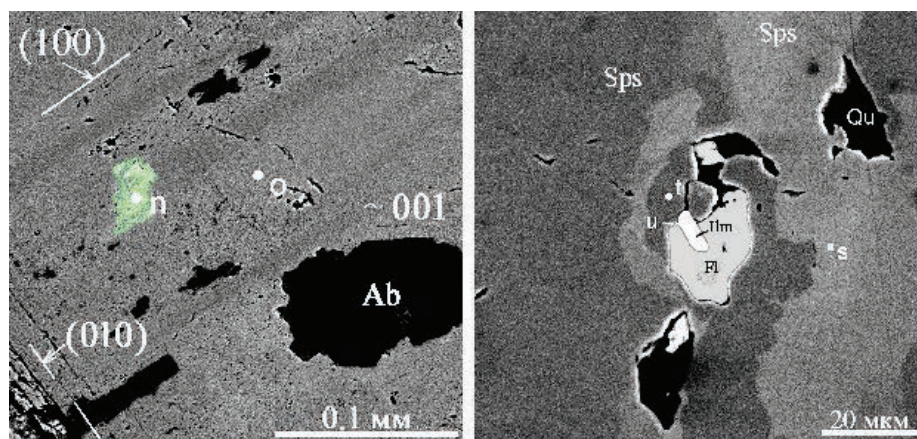


Рис. 7. Зонально-секториальный амазонит (слева) и зональный спессартин (справа) из жилы гранитного пегматита копи № 63 Ильменского государственного заповедника. Ab – альбит, Sps – спессартин, Qu – кварц, Ilm – ильменит, Fl – флюорит. Здесь и на рис. 8, 9 и 11, BSE-фото.

Fig. 7. Zoned-sectorial amazonite (left) and zoned spessartine (right) from the granitic pegmatite vein of mine no. 63 of the Ilmeny State Reserve. Ab – albite, Sps – spessartite, Qu – quartz, Ilm – ilmenite, Fl – fluorite.

Here and in Figs. 8, 9, and 11, BSE-photo.

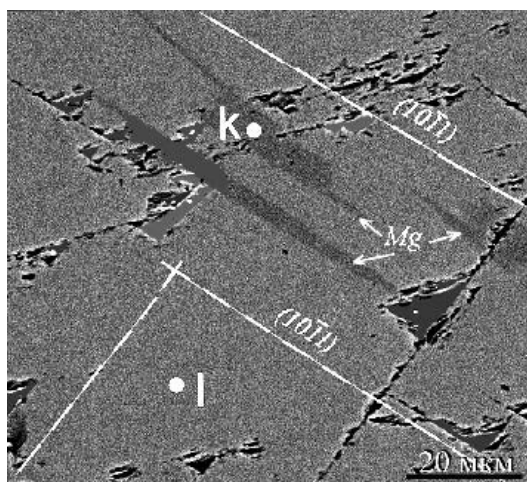


Рис. 8. Вицинальные пирамиды нарастания граней k ($1\bar{1}10$) в зонах роста граней спайного ромбоэдра l ($10\bar{1}1$) магнезита.

Fig. 8. Vicinal pyramids of growth faces k ($1\bar{1}10$) in the growth zones of the magnesite rhombohedron l ($10\bar{1}1$) with cleavage.

ных минералов (монацита, торита, уранинита, галенита и других), которых не видно в окружающих синхронных породообразующих минералах (рис. 9). Сам циркон в разных элементах анатомии имеет разный состав и различную микро- и нанопористость (в соответствии с метамиктностью) (рис. 9):

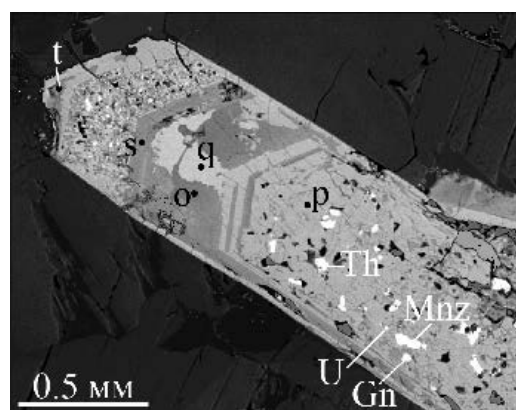
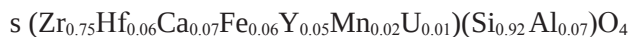


Рис. 9. Анатомия кристалла циркона из амазонитового пегматита копи № 50 Ильменского государственного заповедника.

Fig. 9. Anatomy of zircon crystal from amazonite pegmatite of mine no. 50 of the Ilmeny State Reserve.

Обращают на себя внимание синхронные включения уранинита и галенита, а также плотность большого количества очень мелких включений и пор в предпоследней зоне роста кристалла циркона. У кристалла циркона наблюдались индукционные поверхности с породообразующими минералами только в основании и немного на головке (слева вверх, рис. 9).

В 2022 г. в карбонатит-пегматитах среди ультрамафитов копи № 97 обнаружено множество крупных (до 1.5 см) цирконов, имеющих на гранях тетрагональной призмы $\{110\}$ грубую ростовую скульптуру с вицинальными гранями дипирамиды $\{331\}$ (рис. 10).

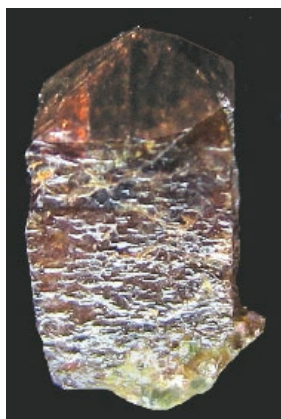


Рис. 10. Кристалл циркона с большим количеством вицинальных граней (331) на грубых буграх роста тетрагональной призмы (110).

Вицинальные грани поставлены на отблеск. Размер кристалла 1.5 см. Копь № 97.

Fig. 10. Zircon crystal with many vicinal facets (331) on rough growth knobs of the tetragonal prism (110).

The vicinal facets are set on the reflection. The size of the crystal is 1.5 cm. Mine no. 97.

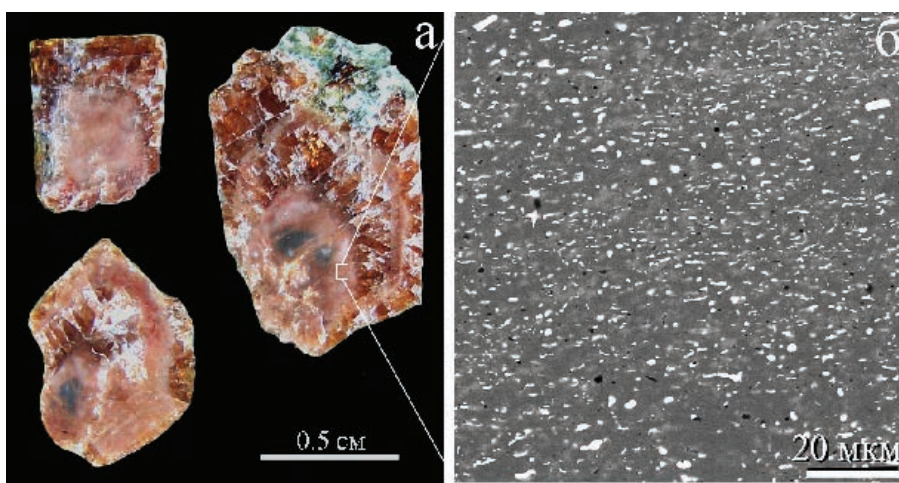


Рис. 11. Анатомия кристаллов циркона из карбонатит-пегматитов копи № 97 Ильменского государственного заповедника: а – ориентированные сечения, полированная поверхность; б – включения торита во внутренней зоне роста циркона.

Fig. 11. Anatomy of zircon crystals from carbonatite-pegmatites of mine no. 97 of the Ilmeny State Reserve: а – oriented sections, polished surface; б – thorite inclusions in the inner zone of zircon growth.

В анатомической картине таких кристаллов, кроме вростков кальцита и рихтерита, наблюдается две светлых зоны роста с огромным количеством мельчайших синхронных включений торита и пор (рис. 11). Зоны с торитом выглядят под бинокляром как матовые тела с диффузными границами. Торит определяется только при максимальном увеличении, причем минимальные кристаллики уходят в область наноразмерности и диагностируются только предположительно по общему составу циркона. Во вмещающих циркон породообразующих минералах такие зоны с мелкими кристаллами не обнаружены. Можно предположить, что циркон своим кристаллизационным полем каким-то образом влиял на появление зародышей торита. И это влияние носило волновой характер (несколько зон).

Приведенные примеры анатомии кристаллов минералов являются фрагментами онтогенических

наблюдений в различных минеральных объектах, среди которых особенно информативны пегматитовые крупно-гигантозернистые образования со сложной историей жизни минералов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе микрозондовых исследований кристаллов мы изначально не осведомлены о сложном анатомическом их устройстве и в обобщениях стремимся использовать простые, кажущиеся логически удобными генетические модели минералообразования. Усредняем химический состав, отбрасываем аномальные значения концентраций отдельных элементов, стремимся к написанию нейтральных химических формул, в то время как элементы анатомии кристаллов могут быть существенно различны по составу, нанопо-

ристости, электрическому заряду, диссимметризации пространства. В площадь снятия электронно-микроскопической информации может попадать разное количество тонких зон роста и пирамид нарастания минерала, дающих суммарный спектральный эффект, который в рядовой работе специально не исследуется.

Реальное анатомическое устройство кристаллов минералов подсказывает нам, что в минеральном мире не было, нет и не будет равновесия, к которому якобы стремятся системы. Равновесная термодинамика к ним не применима. Для объяснения наблюдаемых кристаллизационных явлений и действующих сил необходимо накопить большой объем знаний онтогенического характера. Приведенные в этой заметке примеры, как представляется автору, настраивают на онтогенические размышления и на решения вопросов правильности снятия генетической информации.

ЛИТЕРАТУРА

- Григорьев Д.П. (1971) О законах анатомии кристаллов. Кристаллография, 16(6), 1226–1229.
Леммлейн Г.Г. (1973) Морфология и генезис кристаллов. М., Наука, 328 с.
Попов В.А. (2011) Практическая генетическая минералогия. Екатеринбург, УрО РАН, 167 с.

Попов В.А., Блинов И.А. (2022) Парагенезисы гельвина в амзонитовом гранитном пегматите копи № 63 в Ильменских горах. *Двадцать третьи Всероссийские научные чтения памяти ильменского минералога В.О. Полякова*. Миасс, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 23–37.

Попов В.А., Блинов И.А. (2023) Этюд онтогенического анализа тальк-хлорит-карбонатной породы проявления «Мягкий камень» Уфалейского комплекса на Урале. *Заметки Уральского отделения РМО*, 1, 81–87.

REFERENCES

- Grigoriev D.P. (1971) On the laws of crystal anatomy. *Kristallografiya (Crystallography)*, 16(6), 1226–1229. (in Russian)
Lemmlein G.G. (1973) Morphology and genesis of crystals. Moscow, Nauka, 328 p. (in Russian)
Popov V.A. (2011) Practical genetic mineralogy. Yekaterinburg, UrO RAN, 167 p. (in Russian)
Popov V.A., Blinov I.A. (2022) Assemblages of helvite in granitic amazonite pegmatite of mine no. 63 in the Ilmeny Mountains. *Dvadsat tret'i Vserossiiskie nauchnye chteniya pamyati ilmenskogo mineraloga V.O. Polyakova (Twenty-third All-Russian Scientific Readings in Memory of the Ilmeny Mineralogist V.O. Polyakov)*. Miass, YuU FNTs MiG UrO RAN, 23–37. (in Russian)
Popov V.A., Blinov I.A. (2023) Etude of ontogenic analysis of talc-chlorite-carbonate rock of the Myagki Kamen occurrence of the Ufaley complex in the Urals. *Zametki Ural'skogo otdeleniya RMO (Notes of the Urals Branch of the Russian Mineralogical Society)*, 1, 81–87. (in Russian)

Информация об авторе

В.А. Попов – доктор геолого-минералогических наук, научный сотрудник Ильменского государственного заповедника, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия, popov@mineralogy.ru

Information about the author

V.A. Popov – Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher of the Ilmeny State Reserve, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia, popov@mineralogy.ru