

## МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

КРАНДАЛЛИТ И ФЛОРЕНСИТ-(Ce) ИЗ КВАРЦЕВОЙ ЖИЛЫ РАЙОНА  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЖЕЛАННОЕ (ПРИПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

© 2023 г. С. А. Репина\*

*Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,  
территория Ильменского заповедника, Миасс, 456317 Россия**\*e-mail: repina@mineralogy.ru*

Поступила в редакцию 20.02.2023 г.

После доработки 29.05.2023 г.

Принята к публикации 14.06.2023 г.

В статье рассматриваются минералы из группы плюмбогуммита–крандаллит и флоренсит-(Ce). Минералы найдены на обломке гематитового агрегата, извлеченного из нижнего выклинивания кварцевой жилы проявления Зона 25. Проявление находится в непосредственной близости от месторождений жильного кварца горного хрусталя Желанное и Au-Pd-REE Чудное. Выделения крандаллита представлены двумя формами: ромбоэдрическими кристаллами и сферолитами. Выделяется три генерации этого минерала: первая – ромбоэдрические кристаллы, вторая – корочки на гранях ромбоэдров, третья – сферолиты крандаллита на поверхности ромбоэдров. Корочки толщиной 150 мкм, состоят из четырех слоев: REE-содержащего крандаллита, симплектитовых сростаний крандаллита с флоренситом-(Ce), сферолитов и кристаллов-присыпок крандаллита. Первая и вторая генерация минералов кристаллизовались из растворов, третья была переотложена. Генерации крандаллита отличаются содержанием примесей Sr, Ba, REE, U, Fe, S, Si.

*Ключевые слова:* крандаллит, флоренсит, аугелит, группа плюмбогуммита, сферолиты, симплектит, кварцевые жилы, месторождение Желанное, Приполярный Урал

**DOI:** 10.31857/S086960552304007X, **EDN:** GOZQOQO

Флоренсит  $(\text{Ce, La, Nd, Sm})\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$  и крандаллит  $\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$  входят в состав надгруппы алунита. Надгруппа содержит более 40 минеральных видов с общей формулой  $\text{A}\text{B}_3(\text{XO}_4)_2(\text{OH, H}_2\text{O, F})_6$ . В А-позицию входят крупные катионы ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Bi}^{3+}$ ,  $\text{PZ}\Theta^{3+}$ ) с координационным числом больше или равным 9. В-позиция занята  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  или  $\text{Zn}^{2+}$  в октаэдрической координации. В позиции X преобладают  $\text{S}^{6+}$ ,  $\text{P}^{5+}$ ,  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{As}^{5+}$  в тетраэдрической координации. Надгруппа состоит из четырех групп: сульфаты объединяет группа алунита; арсенаты – группа дюссертита; фосфат-сульфаты и арсенат-сульфаты – группа бедантита; фосфаты группа – плюмбогуммита (Fleischer, 1995). Минералы надгруппы имеют тригональную симметрию и кристаллизуются в виде ромбоэдрических или тригонально-призматических кристаллов; некоторые из них встречаются в виде сферолитов, волокнистых, почковидных и тонкозернистых масс. С появлением электронно-зондовых микроанализаторов количество находок этих минералов значительно увеличилось.

Флоренсит и сванбергит отмечаются как спутники алмазов в алмазоносных россыпях Урала и Бразилии (Лабунцов, 1950; Чайковский, 2003). Ассоциация крандаллита,

флоренсита и гояцита описана в карбонатитовых месторождениях Африки, Восточного Саяна и на Кольском полуострове, на месторождении Ковдор (McKie, 1962; Сомина, Булах, 1966; Лиферович, 2000). Широко распространены минералы группы плюмбогуммита в силлиманитсодержащих сланцах среди гнейсов Западного Забайкалья и в ассоциации с фтор-бериллиевой минерализацией на месторождении молибдена Жарчихинское (Избродин и др., 2008; Савченко и др., 2018). Встречается флоренсит и крандаллит в бокситах Среднего Тимана и аргиллизитах эпitherмальных Cu-Au месторождений Болгарии (Mordberg, 1999; Georgieva, Velinova, 2014).

На территории рудоносного района Приполярного Урала (рис. 1) широко проявлена фосфатная, алюмофосфат-сульфатная и алюмоарсенатная минерализация, ведущими элементами которой являются REE, Sr, Ba, Ca, Fe, Mg, Al. В пределах кварцево-жильного поля месторождения Желанное первыми были найдены сферолиты крандаллита, чуть позже – ромбоэдры сванбергита (Попова, Попов и др., 1993; Никулова и др., 2003). Тогда же в турмалинитах месторождения горного хрусталя Пирамида были обнаружены кристаллы гояцита, содержащие ядра-затравки флоренсита (Репина и др., 2005). Открытие и изучение месторождения Au-Pd-REE Чудное сопровождалось многочисленными находками редких минералов, среди которых впервые были описаны минералы из серий флоренсита и арсенофлоренсита (Моралев и др., 2005; Репина, Юзеева и др., 2005; Mills et al., 2010; Репина и др., 2010, 2011).

Позднее в обзорной статье по алюмофосфатной минерализации Желаннинского кварцево-жильного поля подробно были охарактеризованы проявления на горе Черной и горе Старик, проявления Лазулитовое и Зона 25 (Репина, Попова, 2015). Совместно с крандаллитом и сванбергитом были описаны минералы парагенезиса: апатит, лазулит, скорцалит, аугелит и бирюза. В данной публикации крандаллит упоминался впервые, но при этом не обсуждались разновидности минерала и вторичные изменения.

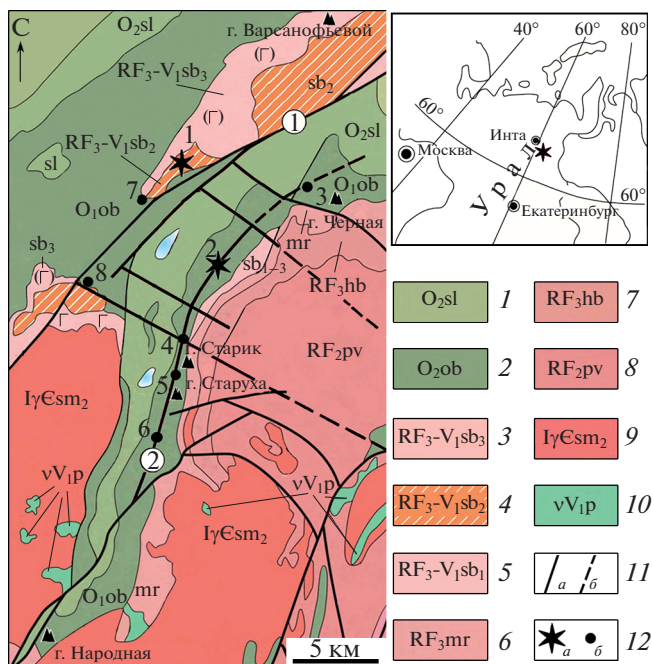
Крандаллит и флоренсит являются представителями группы плюмбогуммита, их отличает высокая изоморфная емкость как в катионной, так и в анионной позициях. Вхождение разного вида примесей в структуру минералов делает их чувствительными к изменениям условий кристаллизации: меняются форма кристаллов и агрегатов, состав, устойчивость к внешней среде и т.д. Данная работа направлена на выделение разновидностей и генераций крандаллита, на определение их места в процессе формирования кварцевой минерализации.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Составы минералов определялись в плоскополированных препаратах на электроннозондовом микроанализаторе Camebax-microBeam 733 с энергодисперсионным спектрометром Inca-200 (аналитик В.А. Муфтахов, Минералогический музей имени А.Е. Ферсмана РАН). Анализы выполнялись при ускоряющем напряжении  $U = 20$  кВ, токе зонда  $I = 20-30$  нА и диаметре пучка электронов 2 мкм. В качестве эталонов использовались диоксид (Ca), жадеит (Al), пирроп (Si), магнетит (Fe), микроклин (K) и синтетические  $MPO_4$ , где М – элементы от La до Sm; а также  $AlPO_4$  (P),  $SrTiO_3$  (Sr),  $BaSO_4$  (S),  $BaSi_2O_5$  (Ba),  $UO_2$ ,  $ThO_2$ ,  $SrTiO_3$ ,  $PtAs_2$ .

## КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОЛОГИИ

Район с редкоземельно-золоторудной и хрусталеносной минерализацией на Приполярном Урале приурочен к зоне контакта байкальского фундамента с каледоногерцинским чехлом уралид. Минералы группы плюмбогуммита встречаются на территории двух сближенных рудных полей – кварцево-жильном Желаннинском и золото-редкоземельном Малдинском, размещенных на противоположных крыльях Балба-



**Рис. 1.** Геологическая схема размещения алюмофосфатной минерализации в районе месторождений Желанное и Чудное на Приполярном Урале (по: В.Н. Иванову, 2002, с дополнениями). Свиты и комплексы: 1 – салецкая: алевролиты, алевроглинистые сланцы; 2 – обеизская: конгломераты, кварцитопесчаники с прослоями алевролитов; 3–5 – саблгорская: туфобазальты, туфосланцы (3), кварцевые порфиры, фельзиты (4), базальтовые порфиры (5); 6 – мороинская: филлитовидные сланцы, линзы мраморов; 7 – хобеинская: сланцы слюдяно-хлорит-альбит-кварцевые, кварциты; 8 – пуйвинская: сланцы аповулканогенные, прослои кварцитов и мраморизованных доломитов; 9 – сальнерско-маньхамбовский: лейкограниты; 10 – парнукский: диориты и габбро; 11 – разломы: установленные (а) и предполагаемые (б): Малдинский (1), Желаннинский (2); 12 – месторождения (а) и проявления (б). Месторождения и проявления в метасоматитах и кварцевых жилах: 1 – Au-Pd-REE Чудное; 2 – жильного кварца и горного хрусталя Желанное; 3 – сванбергита, лазулита, аугелита, апатита на г. Черной; 4 – лазулита, турмалинитов на г. Старик; 5 – крандаллита, лазулита, сванбергита, бирюзы на Лазулитовом; 6 – крандаллита, флоренсита, лазулита, аугелита, бирюзы на проявлении Зона 25; 7, 8 – флоренсита на Каровом и Сводовом.

**Fig. 1.** Geological layout of aluminophosphate mineralization in the area of the Zhelannoye and Chudnoye deposits in the Subpolar Urals (after V.N. Ivanov, 2002, with additions). Formations and complexes: 1 – Saledskaya: siltstones, silty shale; 2 – Obeizskaya: conglomerates, quartzite sandstones with interlayers of siltstones; 3–5 – Sablegorsk: tuff basalts, tuff schists (3), quartz porphyry, felsite (4), porphyry basalt (5); 6 – Moro: phyllite-like schists, lenses of marbles; 7 – Khibeinskaya: mica-chlorite-albite-quartz schists, quartzites; 8 – Puiva: apovolcanic shales, interlayers of quartzites and marmorized dolomites; 9 – Salner-Mankhambovsky: leucogranites; 10 – Parnukian: diorites and gabbro; 11 – faults: established (a) and assumed (b): Maldinsky (1), Zhelanninsky (2); 12 – deposits (a) and manifestations (b). Deposits and manifestations in metasomatites and quartz veins: 1 – Au-Pd-REE Chudnoye; 2 – veined quartz and rock crystal Zhelannoye; 3 – svanbergite, lazulite, augelite, apatite at Chernaya Mountain; 4 – lazulite, tourmalinites at Starik Mountain; 5 – crandallite, lazulite, svanbergite, turquoise at Lazulitovoye; 6 – crandallite, florensine, lazulite, augelite, turquoise at the occurrence Zone 25; 7, 8 – florensine at Karovoe and Svodovoe.

нинской грабен-синклинали. В пределах восточного крыла локализовано месторождение жильного кварца и горного хрусталя Желанное (рис. 1). В 5 км к северо-западу от него, в системе разрывов Малдинского разлома, находится месторождение Au-Pd-REE Чудное. Рудные поля обоих месторождений прослеживаются согласно уральским структурам на 10–15 км, на их площади по зонам разломов развиты гидротермально-метасоматические породы и размещены кварцевожильные проявления.

Верхняя часть фундамента сложена вулканогенными породами саблегорской свиты  $R_3sb_{1-3}$ : метабазальтами, риолитами, туфами. С угловым несогласием они перекрываются базальными толщами уралид: локально развитой грубообломочно-филлитовой алькесвожской ( $C_3-O_{1al}$ ) и конгломерато-песчаниковой обеизской ( $O_{1ob}$ ) свитами. Все породы района испытали зеленосланцевое метаморфическое перерождение. Для пород в пределах Малдинского поля характерны процессы изменения грейзенового типа, сопровождаемые геохимическими аномалиями REE, Pb, Zn, Ag и летучих элементов – F, As, Sn, Ge, Bi, Be, В (Юдович и др., 1998). С минерализацией Желаннинского поля связаны аномалии REE, Sr, Ba, Mg, B, F, S, Ge, Bi, Be (Репина, 1916).

Ассоциации минералов в пределах полей имеют различия. На проявлениях золоторудного поля распространены минералы из серий флоренсита и арсенофлоренсита, встречающиеся в жильном кварце и в серицитовых сланцах с гематитом, пиррофиллитом, диаспором, хлоритоидом, кианитом; вместе с ними находили ксенотим-(Y), черновит-(Y), монацит-(Ce), барит и др.

В пределах кварцевожильного поля месторождения Желанное на сегодня известно только два минерала из группы плюмбогуммита и один из группы бедантита: крандаллит, флоренсит-(Ce) и сванбергит. Они найдены в жильном кварце и в рассланцованных породах вблизи жил. Вместе с ними отмечаются гематит, хлоритоид и минералы из класса фосфатов: лазулит, аугелит, апатит, бирюза и другие. На самом месторождении этих минералов нет, только лишь на флангах находили лазулит в жильном кварце.

Кристаллы крандаллита и его агрегаты обнаружены на двух проявлениях – Лазулитовом и Зона 25, расположенных на западном склоне горы Старуха в 4 км друг от друга. Оба проявления, представленные серией кварцевых жил, находятся в одной толще, контролируются одним разломом и имеют однотипный минеральный состав кварцевых жил и околожильных метасоматитов.

Первыми выделения крандаллита были найдены на проявлении Лазулитовом в виде сферолитов размером 3–6 мм в агрегатных псевдоморфозах по лазулиту, а также в полостях лазулит-кварцевых жил совместно со сванбергитом, лазулитом и аугелитом. (Попова и др., 1993). Сферолиты состоят из бесцветных, беловатых или чуть буроватых копьевидных, часто сдвойникованных кристаллов величиной 0.5–2 мм. Состав сферолитов крандаллита соответствует формуле  $(Ca_{0.77}Na_{0.13})_{0.9}(Al_{2.93}Fe_{0.12})_{3.05}(P_{1.02}O_4)_2(OH)_5 \cdot H_2O$ .

Изученное нами *кварцевожильное проявление Зона 25* находится на крутом склоне горы Старуха в 10 км к югу от месторождения Желанное. Проявление размещено в мономинеральных кварцитопесчаниках обеизской свиты ( $O_{1ob_4}$ ). Кварцевые жилы образуют линейную зону, вытянутую в меридиональном направлении на 1200 м. Контролирует минерализацию крутопадающий Желаннинский разлом, на всем протяжении прослеживающийся по нижнему контакту толщи. Мощность жил около 1–2 м, многие из них на крутом склоне разрушены, иногда до самого основания.

Кварц в жилах молочно-белый трещиноватый, с редкими мелкими хрусталеносными пустотами. Жильный кварц содержит включения гематита, голубого турмалин-асбеста, игольчатого шерла, реже лазулита, бирюзы, хлоритоида, кианита, серицита и др. Общее количество минеральных включений в жильном кварце не превышает 1–3 об. %.

В 1967 г. на проявлении проводились поисковые работы на горный хрусталь, тогда же проявлению был присвоен номер в реестре учета минерализованных участков. Наиболее перспективные кварцевые жилы в нижнем выклинивании были вскрыты



Рис. 2. Щетки кристаллов крандаллита в пустотах гематитового агрегата.

Fig. 2. Brushes of crandallite crystals in the voids of a hematite aggregate.

канавами. Спустя десятки лет в полотно одной из выработок был найден обломок, сложенный агрегатом тесно сросшихся кристалликов гематита. Диаметр обломка составил около 0.5 м. Снаружи и на сколах гематит практически не изменен и имеет сербристо-серую окраску. На поверхности гематитового агрегата много ямок и углублений, выполненных щетками из коричневых ромбоэдров крандаллита величиной до 2 мм (рис. 2). В микроскопе на гранях ромбоэдров едва различимы почки кремового цвета, промежутки между кристаллами нередко заполнены халцедоновидными агрегатами крандаллита кремового и бурого оттенков. Именно эти образцы явились предметом наших исследований.

### КРИСТАЛЛЫ И АГРЕГАТЫ КРАНДАЛЛИТА

Всего анализировалось около двух десятков кристаллов крандаллита и их сростков, наиболее интересные из них обсуждаются в данной работе. По внешнему виду кристаллы разделены на две группы. Одна группа имеет относительно простой облик — это ромбоэдры и их сростки со сферолитами на гранях; другая группа представляет собой ромбоэдры, поверхность которых покрыта тонкими корочками.

*Ромбоэдры крандаллита со сферолитами на гранях* составляют большую часть выборки. Ромбоэдры сложены формой  $\{10\bar{1}2\}$ , их поверхность заселена сферолитами микронных размеров (рис. 3).

В основании ромбоэдров, нарастающих на поверхность гематита, содержатся включения пластинок гематита и зерна кварца шестигранной формы (рис. 4, в, г); на поверхности кристаллов нередко вросли аугелита (рис. 5, а). По данным многочисленных анализов ромбоэдры крандаллита имеют однородное внутреннее строение; иногда у них имеется каемка толщиной 15–20 мкм (рис. 4, а). Многие кристаллы крандаллита подвергались гидротермальным изменениям.

Ромбоэдры крандаллита содержат небольшое количество примесей Sr, Fe, S, Si (табл. 1, ан. 1, 2, 7, 10, 12); в каемке немного повышено содержание Si (табл. 1, ан. 3). В пересчете на миналы ромбоэдры состоят из крандаллита 94–95 мол. % и сванбергита 5–6 мол. %.

Гидротермальные изменения в кристаллах имеют вид осветленных участков, наблюдаемых на границах срастания индивидов, вдоль каймы и на гранях под сферолитами (рис. 4, а–в, 5, а). В измененном крандаллите больше Sr и меньше S, появляются

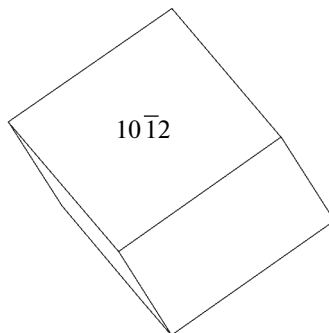


Рис. 3. Ромбоэдры крандаллита на проявлении Зона 25.

Fig. 3. Rhombohedrons of crandallite at the Zone 25 occurrence.

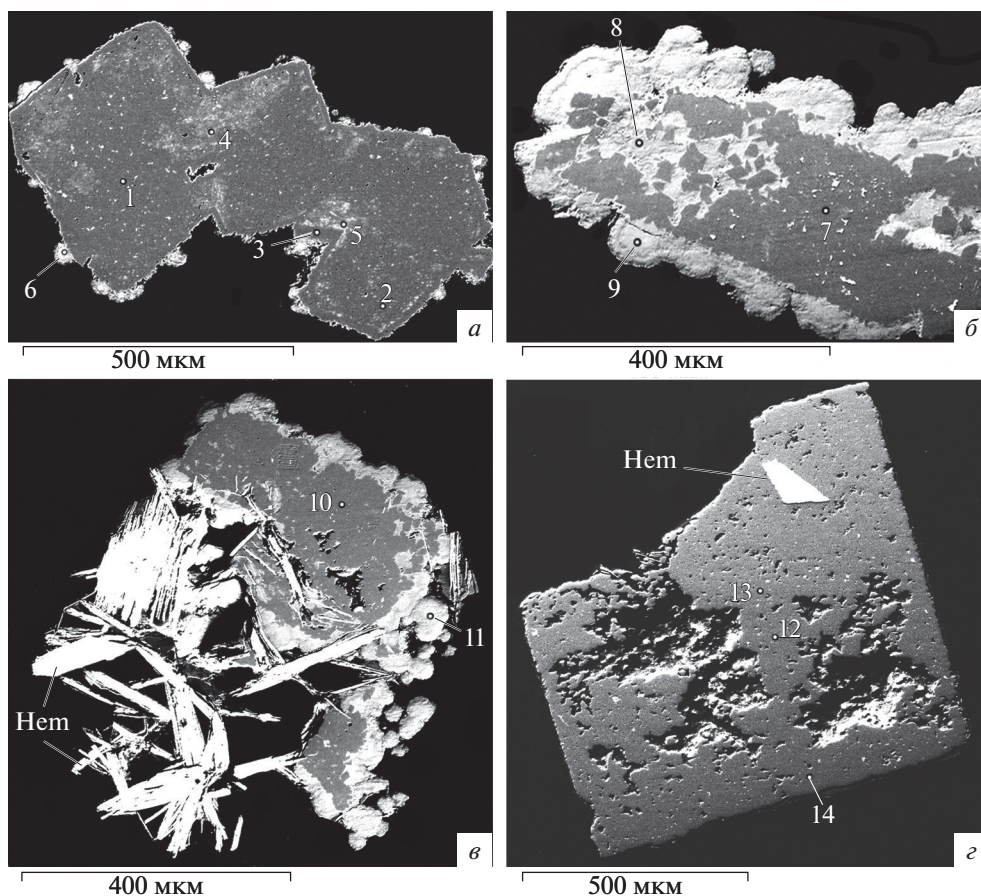
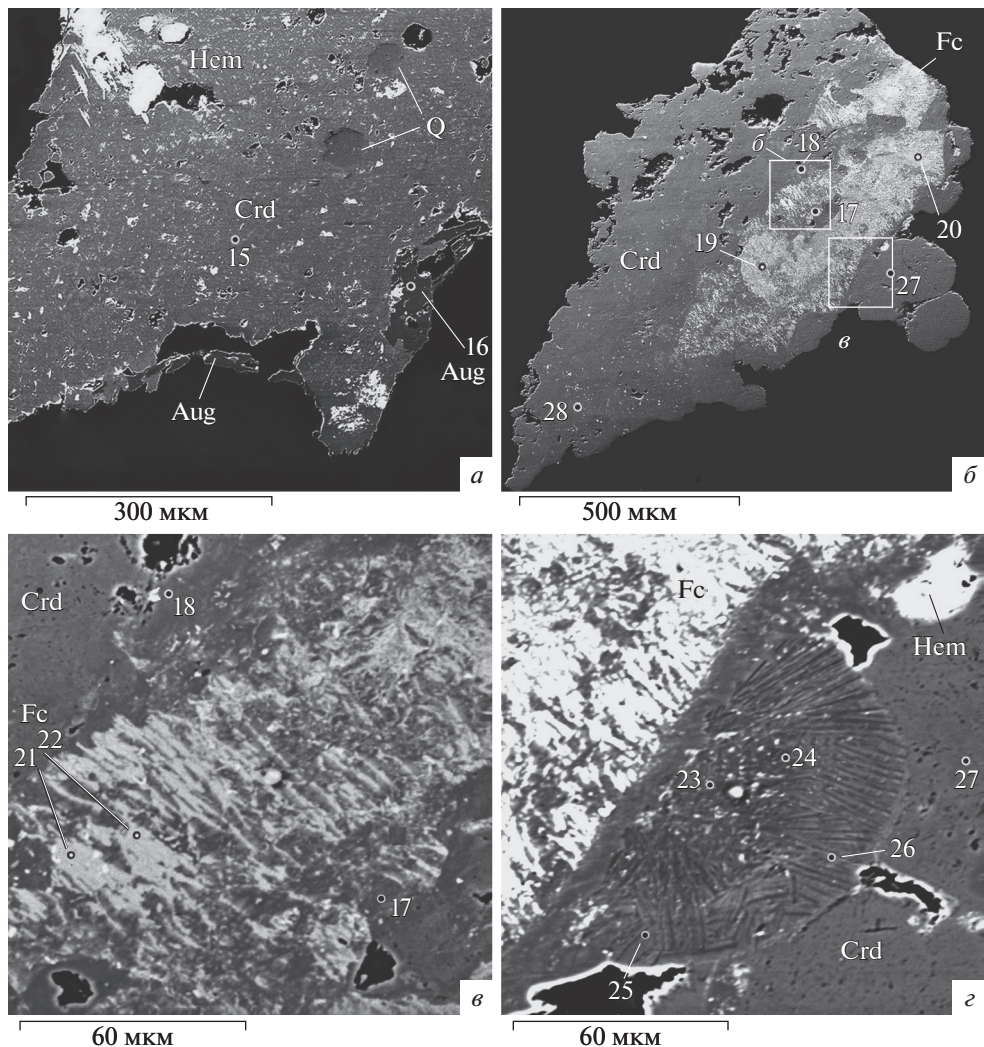


Рис. 4. Ромбоэдры крандаллита со сферулитами на гранях и включениями пластинок гематита (Hem). Изображения в обратно отраженных электронах. Данные анализов см. табл. 1.

Fig. 4. Crandallite rhombohedra with spherulites on the faces and inclusions of hematite plates (Hem). BSE images. Data analyses see Table 1.



**Рис. 5.** Включения гематита, аугелита и кварца в кристалле крандаллита (*a*); многослойные корочки на ребре ромбоэдра в срезе (*б–д*). Изображения в обратно отраженных электронах. Crd – крандаллит, Hem – гематит, Aug – аугелит, Q – кварц, Fc – флоренсит. Данные анализов см. табл. 2.

**Fig. 5.** Inclusions of hematite, augelite, and quartz in a crandallite crystal (*a*); multilayer crusts on the edge of the rhombohedron in section (*б–д*). BSE images. Crd – crandallite, Hem – hematite, Aug – augelite, Q – quartz, Fc – florencite. Data analyses see Table 1.

Ва и U. Минимальный состав (мол. %): крандаллит 64–91, сванбергит 1–11, гоэцит 0–25, горсейксит 0–12 (табл. 1, 2, ан. 4, 5, 8, 13–15).

Сферолиты заселяют преимущественно ребра и вершины ромбоэдров, размер сферолитов около 60 мкм в диаметре (рис. 4, *a*). При густом заселении сферолитами граней, последние нацело изменены и сливаются с лучистыми агрегатами в единое целое. В одном из ромбоэдров ребро срезано на небольшую глубину, что позволило увидеть границу изменений в продольной и поперечной плоскости (рис. 4, *б*). В первом случае

**Таблица 1.** Химический состав крандаллита, мас. %  
**Table 1.** Chemical composition of crandallite, wt %

Анализ	Зерно 1						Зерно 2			Зерно 3		Зерно 4		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
CaO	12.10	11.99	12.29	10.03	8.39	6.86	12.48	7.71	7.23	12.30	7.76	11.84	9.26	10.43
SrO	1.21	1.27	1.26	4.46	4.80	5.66	1.26	6.01	5.29	1.53	5.73	1.41	2.11	2.66
BaO	—	—	—	1.30	4.01	4.52	0.20	3.18	5.88	—	3.51	—	0.78	0.22
K <sub>2</sub> O	0.07	0.07	0.27	0.14	—	—	0.10	—	—	0.19	—	0.11	0.26	0.07
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.59	0.57	1.00	0.40	0.57	1.79	0.42	1.55	2.18	0.91	2.57	0.81	14.19	8.54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34.86	34.18	34.34	33.05	32.95	31.57	34.57	30.28	30.29	35.27	30.04	33.58	31.05	33.32
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	32.08	31.91	31.04	31.62	31.29	30.99	31.84	30.99	30.37	32.57	30.58	31.37	27.23	30.40
SO <sub>3</sub>	1.43	0.95	1.29	0.58	0.48	0.21	1.32	0.19	0.23	1.57	0.42	1.62	0.81	1.01
SiO <sub>2</sub>	0.59	0.62	1.41	0.37	0.26	0.70	0.31	0.60	0.34	0.38	0.16	0.97	0.95	0.52
As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	—	0.66	—	—	—	—	—	—	—	0.24	—	0.38	0.28	0.38
UO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	1.79	—	0.84	1.31	—	1.60	—	—	—
Сумма	82.93	82.22	82.90	81.95	82.75	84.09	82.50	81.35	83.12	84.96	82.35	82.09	86.92	87.55
H <sub>2</sub> O	17.07	17.78	17.10	18.05	17.25	15.91	17.50	18.65	16.18	15.04	17.65	17.91	13.08	12.45
Коэффициенты в формулах (рассчитаны на 6 катионов)														
Ca <sup>2+</sup>	0.92	0.93	0.93	0.80	0.68	0.56	0.95	0.64	0.60	0.92	0.64	0.92	0.71	0.77
Sr <sup>2+</sup>	0.05	0.05	0.05	0.19	0.21	0.25	0.05	0.27	0.24	0.06	0.26	0.06	0.09	0.11
Ba <sup>2+</sup>				0.04	0.12	0.14	0.01	0.10	0.18	—	0.11		0.02	0.01
K <sup>+</sup>	0.01	0.01	0.02	0.01						0.02		0.01	0.02	0.01
Fe <sup>3+</sup>	0.03	0.03	0.05	0.02	0.03	0.10	0.02	0.09	0.14	0.05	0.17	0.05	0.76	0.49
Al <sup>3+</sup>	2.92	2.91	2.87	2.88	2.92	2.84	2.91	2.78	2.77	2.91	2.74	2.86	2.62	2.72
P <sup>5+</sup>	1.93	1.95	1.87	1.98	1.99	2.00	1.92	2.04	2.00	1.93	2.01	1.92	1.65	1.78
S <sup>6+</sup>	0.11	0.05	0.10	0.05	0.04	0.02	0.10	0.01	0.02	0.08	0.03	0.13	0.04	0.07
Si <sup>4+</sup>	0.04	0.04	0.10	0.03	0.02	0.05	0.02	0.05	0.03	0.03	0.01	0.07	0.07	0.04
As <sup>5+</sup>		0.02								0.01		0.01	0.01	0.01
U <sup>4+</sup>						0.03		0.01	0.02		0.03			
Миналы, мол. %														
Крандаллит	95	95	95	78	67	60	95	64	60	94	64	94	91	89
Сванбергит	5	5	5	5	5	2	5	1	2	6	3	6	7	11
Гояцит				13	16	24		25	23		22			
Горсейсит				4	12	14		10	15		11		2	

Примечание. Содержание H<sub>2</sub>O рассчитано путем приведения суммы анализа к 100%. Прочерк – содержание компонента ниже предела обнаружения. Точки анализов см. рис. 4.

контур границы зубчатый, во втором – в форме ромбов в центре сечения. Изменения под сферолитами развиты на глубину до 30 мкм.

По сравнению с измененными гранями в сферолитах больше примесей Ba, Sr, U и меньше Si, S. Минальный состав сферолитов (мол. %): крандаллит 60–64, гояцит 22–24, горсейсит 11–15 и сванбергит 2–3 (табл. 1, ан. 6, 9, 11).



**Таблица 2.** Химический состав (мас. %) крандаллита, аугелита (ан. 16) и флоренсита (ан. 21, 22)  
**Table 2.** Chemical composition (wt %) of crandallite, augelite (an. 16), and florencite (an. 21, 22)

Анализ	Зерно 5		Зерно 6											
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
CaO	11.14	—	9.68	10.85	7.54	6.39	1.47	1.17	10.90	10.89	11.11	11.01	11.16	10.12
SrO	2.53	0.64	0.90	0.68	3.92	5.29	5.36	5.66	2.24	1.91	2.25	2.44	0.97	3.29
BaO	—	—	—	0.13	1.10	1.67	—	—	—	—	—	—	—	0.28
K <sub>2</sub> O	0.23	—	—	—	0.03	0.07	—	—	0.05	0.15	0.18	0.20	—	0.08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.99	0.37	8.67	5.71	7.39	1.27	1.19	0.27	2.20	3.59	1.46	1.99	5.51	0.40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32.37	45.70	31.45	33.62	28.95	29.54	30.29	30.51	31.31	31.37	31.73	32.73	30.74	32.77
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	30.39	33.97	36.31	35.63	26.94	28.58	27.56	26.78	25.88	24.99	27.87	28.59	33.27	30.80
SO <sub>3</sub>	0.89	—	—	—	0.87	1.18	2.93	3.18	0.66	0.65	1.00	1.20	0.14	0.65
SiO <sub>2</sub>	1.06	1.18	0.47	0.37	0.71	0.28	0.29	0.42	7.71	9.97	4.49	3.44	0.31	0.65
UO <sub>2</sub>	—	—	—	—	0.27	0.19	—	—	—	—	—	—	—	0.28
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	0.44	0.44	1.94	1.89	—	—	—	—	—	—
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	0.81	1.50	7.69	7.99	—	—	—	—	—	—
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	0.28	0.19	1.21	1.59	—	—	—	—	—	—
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	0.79	1.39	6.91	8.65	—	—	—	—	—	—
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	0.50	1.92	2.58	—	—	—	—	—	—
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	0.61	0.59	—	—	—	—	—	—
Сумма	80.10	82.66	88.44	86.99	82.60	82.94	89.37	91.28	80.95	83.52	80.09	81.60	82.10	79.32
H <sub>2</sub> O	19.90	17.34	11.56	13.01	17.40	17.06	10.63	8.72	19.05	16.48	19.91	18.40	17.90	20.68
Коэффициенты в формулах														
Ca <sup>2+</sup>	0.89	—	0.71	0.81	0.64	0.56	0.13	0.10	0.85	0.83	0.88	0.86	0.88	0.82
Sr <sup>2+</sup>	0.11	0.01	0.04	0.03	0.18	0.25	0.25	0.26	0.09	0.08	0.10	0.10	0.04	0.14
Ba <sup>2+</sup>	—	—	—	—	0.03	0.05	—	—	—	—	—	—	—	0.01
K <sup>+</sup>	0.02	—	—	—	0.01	—	—	—	—	0.01	0.02	0.02	—	0.01
Fe <sup>3+</sup>	0.06	0.01	0.45	0.30	0.44	0.08	0.07	0.02	0.13	0.21	0.09	0.12	0.34	0.02
Al <sup>3+</sup>	2.85	1.90	2.54	2.75	2.70	2.84	2.84	2.85	2.70	2.62	2.76	2.80	2.65	2.92
P <sup>5+</sup>	1.92	1.02	2.11	2.09	1.80	1.97	1.86	1.80	1.60	1.50	1.74	1.76	2.06	1.97
S <sup>6+</sup>	0.07	—	—	—	0.05	0.07	0.25	0.27	0.05	0.05	0.08	0.09	0.01	0.05
Si <sup>4+</sup>	0.08	0.04	0.03	0.03	0.06	0.02	0.02	0.03	0.56	0.71	0.33	0.25	0.02	0.05
La <sup>3+</sup>	—	—	—	—	0.01	0.01	0.06	0.06	—	—	—	—	—	—
Ce <sup>3+</sup>	—	—	—	—	0.02	0.04	0.22	0.23	—	—	—	—	—	—
Pr <sup>3+</sup>	—	—	—	—	0.01	0.01	0.04	0.05	—	—	—	—	—	—
Nd <sup>3+</sup>	—	—	—	—	0.02	0.04	0.20	0.25	—	—	—	—	—	—
Sm <sup>3+</sup>	—	—	—	—	—	0.01	0.05	0.07	—	—	—	—	—	—
Gd <sup>3+</sup>	—	—	—	—	—	—	0.02	0.02	—	—	—	—	—	—
Миалы, мол. %														
Крандаллит	89	—	96	97	58	57	14	10	90	90	90	90	96	85
Сванбергит	11	—	—	—	5	7	22	25	6	6	7	8	—	9
Гояцит	—	—	4	3	11	19	4	—	4	4	3	2	4	5
Горсейксит	—	—	—	—	3	5	—	—	—	—	—	—	—	1
Флоренсит	—	—	—	—	5	11	60	65	—	—	—	—	—	—

Примечание. Содержание As<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (мас. %): ан. 15 – 0.50 (0.02 к. ф.); ан. 16 – 0.80 (0.02 к. ф.); 19. 20 – 0.26 (0.01 к. ф.). Содержание Na<sub>2</sub>O (мас. %): ан. 17 – 0.96 (0.13 к. ф.). Содержание H<sub>2</sub>O рассчитано путем приведения суммы анализа к 100%. Формулы рассчитаны на 6 катионов для крандаллита и флоренсита, на 3 катиона для аугелита. Точки анализов см. рис. 5.

Аугелит  $\text{Al}_2\text{PO}_4(\text{OH})_3$  по данным нескольких анализов имеет состав, соответствующий формуле (табл. 2, ан. 16). В нем содержатся примерно такие же элементы-примеси (Sr, Fe, S, Si, As), что и в ромбоэдрах крандаллита, но с меньшими концентрациями.

*Ромбоэдры крандаллита, покрытые тонкими корочками* толщиной порядка 150 мкм, установлены при расшифровке сложных по рисунку электронных изображений. Задача оказалась нетривиальной и потребовала проведения онтогенического анализа по снимкам в отраженных электронах.

Сечение кристалла имеет вид вытянутого треугольника, оно было получено при продольном стачивании ребра ромбоэдра (рис. 5, б). В плоскости сечения выделяется ярко-белый пятнистый рисунок, повторяющий контуры среза и тем самым напоминающий зональность в кристалле. Но зональностью этот рисунок не может быть, так как ширина и глубина выделяемых зон не выдержаны, а их границы резко прерывистые. Чтобы расшифровать изображение, необходимо выяснить: как ориентировано сечение относительно граней кристалла и что за элементы отражены в плоскости.

Контур сечения образован торцами трех граней, разделяющими поверхность на три сектора: правый, левый и верхний. Ярко-белый рисунок в сечении имеет симметричное строение, плоскостью симметрии которого является плоскость срезанного ребра. Вершина ромбоэдра и плоскости двух других ребер на снимке не проявлены. Судя по ассиметричному положению плоскости ребра в срезе, сектор слева рассечен вдоль наслоения, сектора сверху и справа — поперек. Торцы граней справа и слева имеют сильно неровную поверхность и поэтому не могут быть плоскими гранями.

Справа от плоскости ребра дешифрируется еще одна линия — вероятно, это торец захороненной грани, рассеченной поперек. Грань последовательно перекрывается несколькими слоями крандаллита: кристаллами-зародышами, зоной симплектитовых сростков, сферолитами и кристаллами-присыпками. Все вместе эти наросты образуют единую корочку на поверхности ромбоэдра.

В правом верхнем углу выделяются два ярко-белых прямоугольника величиной по 100 мкм каждый. Судя по размеру, форме и составу — это мельчайшие ромбоэдры крандаллита; обозначим их как кристаллы-зародыши. На увеличенном изображении можно увидеть, что кристаллы-зародыши состоят из двух зон — внутренней и внешней. Внутренняя зона является крандаллитом с примесями легких лантаноидов (LREE), Sr, Ba (табл. 2, ан. 20). В пересчете на миналы зародыши состоят из (мол. %): крандаллита (57), гоацита (19), флоренсита-(Ce) (11), горсейкита (5).

Внешняя зона в кристаллах-зародышах имеет характер оторочки, ее толщина около 50 мкм. Зона состоит из чередующихся белых и серых пластинок, ориентированных по нормали к подстилающей поверхности. Толщина пластинок 1–2 мкм. Белые пластинки по составу соответствуют флоренситу-(Ce), серые — крандаллиту. Подробная характеристика пластинок приведена ниже. С кристаллов-зародышей зона плавно переходит в сектор правой грани, где на поверхности захороненной грани принимает форму пирамидальных выступов. Подобную форму зона-оторочка могла унаследовать от кристаллов-зародышей, находящихся под ее покровом.

Поверхность зоны-оторочки заселяют сферолиты крандаллита; один из них размером 120 мкм показан на увеличенном снимке (рис. 5, в). Сферолит имеет ядро и внешнюю зону. Структура ядра неразличима, в его составе существенно больше примесей:  $\text{SiO}_2$  8–10 мас. % и  $\text{FeO}$  2.2–3.6 мас. % (табл. 2, ан. 23, 24). Во внешней радиально-лучистой зоне концентрация этих же примесей снижена вдвое:  $\text{SiO}_2$  3.5–4.5 мас. %,  $\text{FeO}$  1.5–2.0 мас. % (табл. 2, ан. 25, 26).

Сферолиты полностью перекрываются кристаллами-присыпками крандаллита. Их состав почти ничем не отличается от состава ромбоэдров: им также свойственны высокие концентрации  $\text{FeO}$  (5.1–7.8 мас. %) и низкие — Sr, S, Si (табл. 2, ан. 27).

Общая толщина корочек, состоящих из четырех слоев, порядка 150 мкм.

Рассмотрим, как эти же корочки выглядят в секторе левой грани. Здесь в продольном срезе корочек выделяется три слоя. Первый слой развит фрагментарно, он также имеет однородное строение и представлен REE-содержащим крандаллитом (табл. 2, ан. 22). Выше этот слой перекрывается зоной-оторочкой, симметрично обрамляющей плоскость ребра. В данном случае агрегат чередующихся пластинок вскрыт поперек. Белые пластинки толщиной около 1 мкм имеют прямолинейную или слабоизогнутую форму; соприкасаясь, они сливаются в пучки, что позволило выполнить их анализ (рис. 5, б, в). Белые пластинки сложены флоренситом-(Ce), в котором редкие земли соотносятся как  $Ce \geq Nd \gg La$  (табл. 2, ан. 21, 22). Флоренсит содержит примеси (мас. %): SrO 5.4–5.7, CaO 1.2–1.5,  $SO_3$  2.9–3.2. Серые пластинки, разделяющие белые, являются обычным крандаллитом (табл. 2, ан. 17, 18). Границы между пластинками неровные, возможно, индукционные. Совместный рост флоренсита и крандаллита, одинаковая ориентировка и взаимное прораствание, дают основание для отнесения пластинчатых сростков к симплектитам.

Из разреза корочек выпадает слой со сферолитами, которые в данной плоскости либо отсутствуют, либо срезаны. Верхний слой образован крандаллитом обычного состава, с чуть большим количеством примесей Sr, Ba и U (табл. 2, ан. 28). Повышенное количество примесей, а также развитие каверн у поверхности могут быть результатом гидротермального изменения, которому подвергался кристалл.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Хрусталеносные кварцевые жилы формировались в несколько стадий – кварцево-жильную, хрусталеносную и постхрусталеносную. Выполнение кварцем трещинных структур происходило в условиях существования длительных напряжений, когда одни и те же трещины многократно приоткрывались и выполнялись шестоватыми агрегатами кварца. Одновременно с отложением кварца в основании жил на участке пересечения раствороподводящих и жилоконтролирующих структур под воздействием кремнещелочных растворов формировались серицитолиты – плотные породы, состоящие из серицита, турмалина, гематита, рутила, циркона, монацита и других минералов (Репина, 2016). Начало кварцеобразующего процесса маркируется в серицитолитах отложением турмалина, завершение – гематитом.

В процессе затухания тектоно-гидротермальной активности на участках наибольших тектонических напряжений возникали хрусталеносные полости, чаще всего приуроченные к нижнему выклиниванию жил. Деформации не прекращались и после образования кварцевых жил, но притока флюидов уже не было. В результате приоткрывания трещин и падения давления в системе остаточные резко недосыщенные растворы растворяли вмещающие породы и метасоматиты, и переотлагали минеральное вещество во вновь появившиеся трещинные пустоты – обычно в зальбанды хрусталеносных гнезд. Формировались гетитовые порошки внутри полостей, а также пленки по трещинам; монацит образовывал скопления в зальбандах гнезд.

Наиболее распространенным минералом кварцевожильного поля, наряду с кварцем и турмалином, является гематит, но настолько крупные и плотные агрегаты гематита как на Зоне 25 ранее не находили. Гематитовый агрегат не затронут вторичными изменениями, что может быть результатом слабо проявленных хрусталеносных и постхрусталеносных процессов. Красновато-бурую окраску ему придают щетки ромбоэдров и тонкозернистые корочки крандаллита на стенках углублений. До сих пор считалось, что отложением гематита и монацита в серицитолитах завершалось образование кварцевых жил. Крандаллит и флоренсит дополняют установленный перечень, а вместе с тем пополняют его другими минералами парагенезиса: лазулитом, аугелитом, бирюзой, апатитом и другими включениями в жильном кварце на периферии месторождения Желанное. Ранее время отложения этих минералов было неопределенным.

Возможно, существует две генерации гематита: ранний гематит отлагался совместно с монацитом, поздний – с глиноземсодержащими фосфатами.

По способу отложения разновидности крандаллита разделяются на две группы: первые кристаллизовались из растворов в пограничном интервале кварцевожильной и хрусталеносной стадий, вторые были переотложены в постхрусталеносную стадию.

В первой группе минералов выделяется пять типов крандаллита, образующих две генерации. *Первая генерация* представлена ромбоэдрическими кристаллами, на их долю приходится около 80% от всей крандаллитовой минерализации. Им свойственно однородное строение и низкое содержание примесей.

*Вторая генерация* крандаллита представлена корочками толщиной около 150 мкм на ребрах и гранях ромбоэдров. Корочки неоднородные и состоят из четырех слоев. Первый слой образуют кристаллы-зародыши REE-содержащего крандаллита с примесями Sr, Ba, U.

Второй слой в виде зоны-оторочки покрывает кристаллы-зародыши и поверхность основного ромбоэдра. Зона состоит из тонких чередующихся пластинок крандаллита и флоренсита-(Ce), по нормали ориентированных к поверхности наслоения. Флоренсит-(Ce) обогащен Nd, Sm, Sr и S, что является характерной особенностью флоренситов на Малдинской золоторудной площади. На проявлениях Желаннинского кварцевожильного поля флоренсит-(Ce) установлен впервые.

К моменту отложения второго слоя растворы достигали насыщения не только по крандаллитовой, но и по флоренситовой молекуле, что стало причиной одновременной кристаллизации двух минералов. Агрегат флоренсита и крандаллита, с учетом микронного размера пластинок, тесного срастания двух минералов и спутанно-волокнистой структуры, является симплектитом. Термин симплектит является общим для целого ряда микроструктур, имеющих различный генезис: распад твердых растворов, эвтектическая кристаллизация остаточных расплавов, метасоматоз, твердофазные метаморфические реакции и т.д.

Третий слой представлен сферолитами, погребенными внутри корочек. В этих сферолитах в несколько раз выше содержание примеси кремния (мас. %): в ядре  $\text{SiO}_2$  8–10, в оболочке – 3.5–4.5. Большое содержание примеси кремния вследствие гетерометрии могло привести к расщеплению кристаллов крандаллита и образованию сферолитов. Размеры эффективных радиусов ионов  $\text{P}^{5+}$  (0.17 Å) и  $\text{Si}^{4+}$  (0.26 Å) существенно различаются.

Четвертый слой является последним в структуре корочек. Он состоит из кристалликов крандаллита, полностью покрывающих сферолиты и поверхность ромбоэдров. В верхнем слое широко развиты каверны, отмечаются примеси Sr, Ba и U, что вероятно является следствием гидротермального изменения поверхности корочек. Если поверхность не изменена, то ее состав не отличается от состава ромбоэдрических кристаллов.

В некоторых друзьях пространство между ромбоэдрами заполняют халцедоновидные массы, подобные корочкам крандаллита, но их количество невелико.

Изменение химического состава в последовательных образцованных разновидностях крандаллита указывает на эволюцию состава растворов в системе кристаллизации – по мере высаживания одних компонентов, другие накапливались. Так, в первом слое корочек редкие земли были только примесью в крандаллите, а во втором они активно участвуют в кристаллизации флоренсита. Отложение слоев, обогащенных REE и S, сопровождалось накоплением Si в растворах. В последующем слое избыточный Si вошел в состав сферолитов.

*Третью генерацию* представляют сферолиты, нарастающие ребра ромбоэдров и зоны наложенных изменений внутри кристаллов. Данные разновидности являются результатом переотложения ранних генераций крандаллита в постхрусталеносную стадию. Одновременность образования сферолитов и метасоматитов подтверждается

совместным нахождением и примерно одинаковым содержанием примесей Sr, Ba, U. Такие же примеси содержат редкоземельный крандаллит и флоренсит, а также халцедоновидные массы крандаллита, заполняющие промежутки в друзах. Возможно, что именно эти разновидности крандаллита, содержащие в своем составе REE, Sr, Ba, U, подвергались растворению и переотложению вещества в виде сферолитов. Причиной неустойчивости минералов могли стать повышенные концентрации стронция и бария, крупные катионы которых при селективной концентрации способны приводить к дефектности структуры. В 12-кратной координации катионы имеют эффективные радиусы (Å):  $Ba^{2+}$  1.61,  $Sr^{2+}$  1.44,  $Ca^{2+}$  1.34. В сферолитах второго типа довольно много примесей SrO (4–6 мас. %) и BaO (3.5–6 мас. %); они также могли привести к ростовым напряжениям и расщеплению в сферолитах.

Минералы группы плюмбогуммита образуются в условиях высокой активности ионов  $PO_4^{3-}$  и  $SO_4^{2-}$ , относительно высокого кислородного потенциала и широкого диапазона pH (3–8) флюида (Рипп и др., 1998). Предполагается, что крандаллит и флоренсит-(Ce) из кварцевых жил проявления Зона 25 кристаллизуются в сходных условиях. Присутствие в жильном кварце хлоритоида, пирофиллита, кианита, свидетельствует о том, что образование минеральной ассоциации осуществляется в ограниченном интервале pH равном 3–5 (Сорока, 1998). После обеднения растворов Ca и  $PO_4^{3-}$  и обогащения LREE, Sr и  $SO_4^{2-}$  кристаллизуются флоренсит, либо сванбергит.

Крандаллит и флоренсит найдены в небольших количествах, что никак не уменьшает их значимости. Судя по высоким содержаниям минералов гоэцита и горсейксита, стоит ожидать находки этих минералов в качестве самостоятельных выделений. Высокая изоморфная емкость и чувствительность минералов к изменению условий кристаллизации позволяют использовать их в качестве индикаторов в процессах минералообразования. Проявления гидроксилсодержащих алюмофосфат-сульфатов кальция, редких земель и стронция, с присущим им парагенезисом минералов, находятся на периферии месторождения Желанное; на самом же объекте их нет. Сама по себе эта особенность указывает на существование минералогической зональности в пределах Желаннинского кварцевожильного поля и определяет его внешние границы.

Автор выражает глубокую благодарность В.А. Попову за обсуждение результатов исследований и ценные подсказки в ходе написания статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Избродин И.А., Рипп Г.С., Карманов Н.С.* Фосфатная и сульфат-фосфатная минерализация силлиманитсодержащих пород Кяхтинского месторождения (Западное Забайкалье) // ЗРМО. **2008**. Т. 137. № 3. С. 94–106.

*Лабунцов А.Н.* О кристаллах флоренсита // Тр. Минер. музея АН СССР. **1950**. Т. 2. С. 135–136.

*Лиферович Р.П., Яковенчук В.Н., Пахомовский Я.А., Богданова А.Н.* Минералы группы крандаллита из Ковдорского массива // Вестник МГТУ. **2000**. Т. 3. № 2. С. 263–272.

*Моралев Г.В., Борисов А.В., Суренков С.В., Нагаева С.П., Тарбаев М.Б., Кузнецов С.К., Онищенко С.А., Ефанова Л.И., Соболева А.А.* Распределение и формы нахождения редкоземельных элементов на Au-Pd-REE рудопрооявлениях Чудное и Нестеровское (хребет Малдынырд, Приполярный Урал) // Геохимия. **2005**. Т. 43. № 11. С. 1175–1195.

*Никулова Н.Ю., Ефанова Л.И., Швецова И.В.* Сванбергит в песчаниках тельпосской свиты на Приполярном Урале / Сыктывкарский минералогический сб. Сыктывкар, **2003**. № 33. С. 143–148.

*Попова В.И., Литовшко Д.Н.* Аугелит Приполярного Урала / Уральский минералогический сб. Екатеринбург, **1993**. № 1. С. 71–74.

*Попова В.И., Попов В.А., Клочков И.К., Пожидаев Н.А.* Редкие фосфаты Приполярного Урала (лазулит, скорцалит, аугелит, сванбергит, крандаллит, бирюза) / Уральский минералогический сб. Екатеринбург, **1993**. № 2. С. 62–77.

*Репина С.А., Юзеева Н.С.* Флоренсит в породах зоны межформационного несогласия на Приполярном Урале / Уральский минералогический сб. Миасс, **2005**. № 13. С. 91–113.

Репина С.А., Попова В.И., Чурин Е.И., Белогуб Е.В., Хиллер В.В. Флоренсит-(Sm) – (Sm,Nd)Al<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub> – новый минерал группы алуниита-ярозита с Приполярного Урала // ЗРМО. 2010. Т. 139. № 4. С. 16–25.

Репина С.А. Фракционирование РЗЭ в парагенезисе ксенотима и флоренсита на U-REE рудопроявлениях Приполярного Урала // Геохимия. 2011. Т. 49. № 9. С. 919–938.

Репина С.А., Попова В.И. Алюмосульфат-фосфаты в хрусталеносных жилах Желаннинского рудного поля (Приполярный Урал) // Минералогия. 2015. № 4. С. 123–134.

Репина С.А., Месторождение жильного кварца и горного хрусталя Желанное. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. 287 с.

Рипп Г.С., Канакин С.В., Щербакова М.И. Фосфатная минерализация в метаморфических высокоглиноземистых породах Ичетуйского проявления // ЗВМО. 1998. № 6. С. 98–107.

Савченко А.А., Рипп Г.С. Алюмофторидная и алюмофосфатная минерализация Жарчихинского молибденового месторождения (Западное Забайкалье) // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2018. № 1. С. 92–101.

Сорока Е.И. Рудноносный комплекс бассейна р. Балбанью (Приполярный Урал) и связь с ним золотого оруденения // Автореф. дис. ... канд. г.-м. н. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1997. 17 с.

Сомина М.Я., Булах А.Г. Флоренсит из карбонатитов Восточного Саяна и некоторые вопросы химической конституции группы крадаллита // ЗВМО. 1966. № 5. С. 537–550.

Чайковский И.И. Редкоземельные алюмофосфаты из алмазных месторождений Урало-Тиманской провинции // ЗВМО. 2003. Т. 132. № 3. С. 101–109.

Юдович Я.Э., Ефанова Л.И., Швецова И.В., Козырева И.В., Котельникова Е.А. Зона межформационного контакта в каре оз. Грубепендиты. Сыктывкар: Геопринт, 1998. 93 с.

## Crandallite and Florencite-(Ce) from a Quartz Vein of the Area Zhelannoye Deposit (Subpolar Ural)

S. A. Repina\*

South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geocology, Ural Branch RAS, Miass, Russia  
\*e-mail: repina@mineralogy.ru

The article displays data on minerals of the plumbogummite group – crandallite and florencite-(Ce). Minerals were found on a fragment of a hematite aggregate recovered from the lower pinch out of a quartz vein of the Zone 25 occurrence. It is situated in close neighborhood to the known Zhelannoye deposit of vein quartz and rock crystals and the Au-Pd-REE ore deposit Chudnoye. Crandallite segregations are represented by two forms: rhombohedral crystals and spherulites. There are distinguished three generations of crandallite: the first one represented by rhombohedral crystals, the second – by crusts on the rhombohedron faces, the third – crandallite spherulites on the surface of rhombohedrons. The crusts, 150 μm thick, consist of four layers: REE-bearing crandallite, symplectite intergrowths of crandallite with florencite-(Ce), spherulites, and powdering of crandallite crystals. The first and second generations of the mineral were crystallized from solutions, the third resulted the re-deposition. There are varying contents of Sr, Ba, REE, U, Fe, S, and Si admixtures in crandallite of different types.

**Keywords:** crandallite, florencite, augelite, plumbogummite group, spherulites, symplectite, quartz veins, Zhelannoye deposit, Subpolar Urals

## REFERENCES

- Chaikovskiy I.I. Rare-earth aluminophosphates from diamond deposits of the Ural-Timan province. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. 2003. Vol. 132. N 3. P. 101–109 (in Russian).
- Fleischer M., Mandarino J. Glossary of Mineral Species. Tucson: The Mineralogical Record Inc., 1995. 280 p.
- Gaboreau S., Beaufort D., Vieillard P., Patrier P. Aluminum phosphate-sulfate minerals associated with Proterozoic unconformity-type uranium deposits in the East Alligator River Uranium Field, Northern Territories, Australia. *Canad. Miner.* 2005. N 43. P. 813–827.
- Georgieva S., Velinova N. Florencite-(Ce,La,Nd) and crandallite from the advanced argillic alteration in the Chelopech highsulphidation epithermal Cu-Au deposit, Bulgaria. *CR Acad. Bulgaria. Sci.* 2014. N 67. P. 1669–1678.

Izbrodin I.A., Ripp G.S., Karmanov N.S. Phosphate and sulfate-phosphate mineralization of sillimanite-bearing schists at the Kyakhtinskoe deposit (southwestern Transbaikalia). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2008**. Vol. 137. N 3. P. 94–106 (in Russian).

Kolitsch U., Pring A. Crystal chemistry of the crandallite, beudantite and alunite groups: a review and evaluation of the suitability as storage materials for toxic metals. *J. Mineral. Petrol. Sci.* **2001**. N 96. P. 67–78.

Labuntsov A.N. On florensite crystals. *Proc. Miner. Museum Acad. Sci. USSR*. **1950**. Vol. 2. P. 135–136 (in Russian).

Liferovich R.P., Yakovenchuk V.N., Pakhomovsky Ya.A., Bogdanova A.N. Minerals of the crandallite group from the Kovdor massif. *Vestnik MSTU*. **2000**. Vol. 3. N 2. P. 263–272 (in Russian).

McKie D. Goyazite and florensite from two African carbonatites. *Miner. Mag.* **1962**. N 33. P. 258–259.

Mills S.J., Kartashov P.M., Kampf A.R., Raudsepp M. Arsenoflorensite-(La), a new mineral from the Komi Republic, Russian Federation: description and crystal structure. *Europ. J. Miner.* **2010**. Vol. 22. N 4. P. 613–621.

Moralev G.V., Borisov A.V., Surenkov S.V., Nagaeva S.P., Tarbaev M.B., Kuznetsov S.K., Soboleva A.A., Onishchenko S.A., Efanova L.I. Distribution and modes of occurrence of REE at the Chudnoe and Nesterovskoe occurrences of Au-Pd-REE ore mineralization in the Maldynyr range, Nether-Polar Urals. *Geochem. Int.* **2005**. Vol. 43. N 11. P. 1078–1097 (in Russian).

Mordberg L.E. Geochemical evolution of a Devonian diasporite-crandallite-svanbergite-bearing weathering profile in the Middle Timan, Russia. *J. Geochem. Explor.* **1999**. N 66. P. 353–361.

Mordberg L.E., Stanley Chris J., Germann K. Rare earth element anomalies in crandallite group minerals from the Schugorsk bauxite deposit, Timan, Russia. *Eur. J. Miner.* **2000**. V. 12. P. 1229–1243.

Nikulova N.Yu., Efanova L.I., Shvetsova I.V. Svanbergite in the sandstones of the Telpos Formation in the Subpolar Urals. *Syktvykar Miner. Coll. Syktvykar*. **2003**. N 33. P. 143–148 (in Russian).

Popova V.I., Litoshko D.N. Augelite in the Subpolar Urals. *Ural Miner. Coll. Yekaterinburg*. **1993**. N 1. P. 71–74 (in Russian).

Popova V.I., Popov V.A., Klochkov I.K., Pozhidaev N.A. Rare phosphates in the Subpolar Urals (lazulite, scorcalite, augelite, svanbergite, crandallite, turquoise). *Ural Miner. Coll. Yekaterinburg*, **1993**. N 2. P. 62–77 (in Russian).

Repina S.A. Deposit of vein quartz and rock crystal named Zhelannoe. Yekaterinburg: Ural Branch RAS, **2016**. 286 p. (in Russian).

Repina S.A. Fractionation of REE in the xenotime and florencite paragenetic association from AU-REE mineral occurrences of the Subpolar Urals. *Geochem. Int.* **2011**. Vol. 49. N 9. P. 868–887.

Repina S.A., Popova V.I. Alumosulfate-phosphates in the crystal-bearing veins of the Zhelanninskoe ore field (Subpolar Urals). *Mineralogy*. **2015**. N 4. P. 123–134 (in Russian).

Repina S.A., Popova V.I., Churin E.I., Belogub E.V., Chiller V.V. Florencite-(Sm) – (Sm, Nd)Al<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub> – a new mineral of alunite-jarosite group from Subpolar Urals. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2010**. Vol. 139. N 4. P. 16–25 (in Russian, English translation: Geol. Ore Deposits. **2011**. Vol. 53. N 7. P. 1–11).

Repina S.A., Yuseeva N.S. Florencite in rocks from a zone of interformation unconformity, Subpolar Ural. *Ural Miner. Coll. Miass*. **2005**. N 13. P. 91–113 (in Russian).

Ripp G.S., Kanakin S.V., Shcherbakova M.I. Phosphate mineralization in metamorphosed high-alumina rocks of Ichetuyskoe ore occurrence (south-west Transbaikali). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1998**. N 6. P. 98–108 (in Russian).

Savchenko A.A., Ripp G.S. Mineral composition of the Zharchikha molybdenum deposit (western Transbaikalia). *Vestnik VSU. Ser. Geol.* **2018**. N 1. P. 92–101 (in Russian).

Somina M.Ya., Bulakh A.G. Florensite from the carbonatites of the Eastern Sayan and some questions of the chemical constitution of the crandallite group. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1966**. N 5. P. 537–550 (in Russian).

Soroka E.I. Ore-bearing complex of the Balbanyu river basin (Subpolar Urals) and the connection of gold mineralization with it. Ph.D. thesis syn. Yekaterinburg, 1997. 17 p. (in Russian).

Yudovich Ya.E., Efanova L.I., Shvetsova I.V., Kozyreva I.V., Kotelnikova E.A. The zone of the interformation contact in the square of the lake Grubependity. **1998**. Syktvykar: Geoprint, 93 p. (in Russian).