

НОВЫЕ МИНЕРАЛЫ, КЛАССИФИКАЦИЯ И НОМЕНКЛАТУРА МИНЕРАЛОВ

УДК 549.02

© Д. чл. С. А. РЕПИНА, д. чл. В. И. ПОПОВА, * Е. И. ЧУРИН, *
д. чл. Е. В. БЕЛОГУБ, * В. В. ХИЛЛЕР**

ФЛОРЕНСИТ-(Sm), (Sm,Nd)Al₃(PO₄)₂(OH)₆ — НОВЫЙ МИНЕРАЛ ГРУППЫ АЛУНИТА—ЯРОЗИТА С ПРИПОЛЯРНОГО УРАЛА¹

* Институт минералогии УрО РАН, 456317, г. Миасс, Челябинская обл.;
e-mail: repina@mineralogy.ru

** Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург

Новый минерал подгруппы флоренсита — флоренсит-(Sm) [идеализированная формула (Sm,Nd)Al₃(PO₄)₂(OH)₆] — найден в ассоциации с ксенотимом-(Y) в кварцевых жилах участка Сводовый на хребте Малдынырд (Приполярный Урал).

Ключевые слова: флоренсит-(Sm), Приполярный Урал, участок Сводовый.

S. A. REPINA, V. I. POPOVA, E. I. CHURIN, E. V. BELOGUB, V. V. CHILLER. FLORENCITE-(Sm),
(Sm,Nd)Al₃(PO₄)₂(OH)₆ — A NEW MINERAL OF ALUNITE—JAROSITE GROUP
FROM THE SUBPOLAR URALS

Florencite-(Sm) is the new mineral of florencite subgroup. It was found in association with xenotime-(Y) in quartz veins at Svodovoy area on the Maldynyrd Ridge (the Subpolar Urals). Florencite-(Sm) forms thin zones within sharp rhombohedra crystals of florencite-(Ce) with particular faceting by {0111} и {1012}. The thickness of florencite-(Sm) zones is 0.01—0.1 mm. The total thickness of Sm-enriched zones is 1—3 mm. Florencite-(Sm) is colorless, its massive materials are pale-pink or pale-yellow. Streak is white. Mons' hardness 5.5—6. Density: measured 3.70 g/cm³, calculated 3.743 g/cm³. Mineral is transparent, non-pleochroic, uniaxial (positive), $n_o = 1.704(2)$, $n_e = 1.713(2)$. Electron beam fluorescence spectrum: 592 nm (intense green luminescence of Sm³⁺) and 558 nm (yellow luminescence of Nd³⁺). Chemical composition (microprobe, average from 2 WDA, wt %): La₂O₃ 0.62, Ce₂O₃ 3.29, Pr₂O₃ 1.05, Nd₂O₃ 10.31, Sm₂O₃ 12.62, Eu₂O₃ 0.41, Gd₂O₃ 2.30, Dy₂O₃ 0.13, SrO 0.71, CaO 0.35, Al₂O₃ 29.89, P₂O₅ 26.14, SO₃ 0.85, SiO₂ 0.09; total 88.76; H₂O (meas.) 10.74. Empirical formula (for 14 anions): (Sm_{0.38}Nd_{0.32}Gd_{0.07}Ce_{0.10}Pr_{0.03}La_{0.02}Eu_{0.01}Sr_{0.04}Ca_{0.03})_{1.00}Al_{3.04}(P_{1.91}Si_{0.05}Si_{0.01})_{1.97}O₁₄H_{5.92}. Idealized formula: (Sm,Nd)Al₃(PO₄)₂(OH)₆. Trigonal, space group $R\bar{3}m$, $a = 6.972(4)$, $c = 16.182(7)$ Å, $V = 681.2$ Å³, $Z = 3$. XRD-pattern, d/n (hkl): 2.925 (10) (113), 1.881(6) (303), 2.161 (5) (107), 5.65 (4) (101), 3.479 (4) (110). IR-spectrum: 466, 510, 621, 1036, 1105, 1223, 2957, 3374 cm⁻¹.

Key words: florencite-(Sm), Subpolar Urals, Maldynyrd Ridge, Svodovoy area.

Флоренсит-(Ce) на Среднем Урале был найден в 1938 г. в россыпях по р. Койве А. Н. Лабунцовым (1949), флоренсит-(La) и флоренсит-(Nd) — на Глинском проявлении изумруда и хризоберилла (Попов, Канонеров, 2000). На Полярном Урале флоренсит-(Ce) выявлен в Литовшинском проявлении вторичных кварцитов (Силаев и др., 2001). Флоренсит-(Ce) известен также в карбонатитах Восточного Саяна (Сомина, Булах, 1996). Флоренситы сложного состава широко распространены на Приполярном Урале (рис. 1), где они встречаются в метасоматитах, карцевых жилах и рудных телах на площади Au-REE-рудных полей (Мельникова и др., 2005; Репина, Юзеева, 2005;

¹ Новый минерал флоренсит-(Sm) и его название одобрены Комиссией по новым минералам РМО 9 сентября 2009 г. и утверждены Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации минералов МАА 30 ноября 2009 г. IMA No 2009-074.

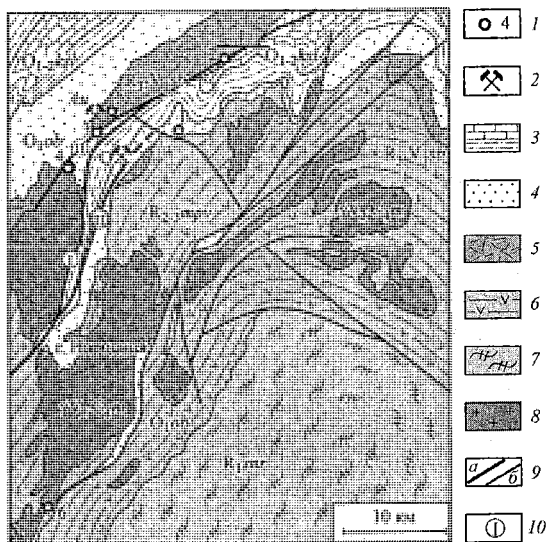


Рис. 1. Локализация проявлений флоренсита на Приполярном Урале.

1 — проявления флоренсита: 1 — горы Черной, 2 — горы Варсанофьевой, 3 — кара Грубелендиты, 4 — участка Сводовый, 5 — участка Алькесвож, 6 — горы Пирамида; 2 — месторождения: жильного кварца Желанное (Q) и Au-Pd-REE Чудное (Au); 3 — кожимская и салецкая свиты ($O_{1-2}ksf$): известняки, алевросланцы; 4 — обейская свита (O_{1ob}): кварцитоесчанники, гравелиты, конгломераты; 5 — саблегорская свита (R_3-V_1sb): кислые и основные эффузивы, туфосланцы; 6 — моринская, хобенинская и пуйвинская свиты (R_2-puyv): мраморы, кварциты, филлиты, сланцы; 7 — шокуринская и няртинская свиты (R_1-shr): сланцы, гнейсы, амфиболиты; 8 — граниты, гранодиориты, диориты малдинского и кожимского комплексов (γV_2-C_1m); 9 — тектонические нарушения (a) и геологические границы (б); 10 — главные разломы: I — Малдинский, II — Озерный, III — Желаннинский. Схема по «Геологической карте Урала», м 1 : 200 000 (2000 г.) с дополнениями С. А. Репиной.

Fig. 1. Florentite locations at the Subpolar Urals.

Репина, 2010, и др.). Наиболее детально изучены флоренситы из карбонатитов Восточного Саяна (Сомина, Булах, 1966).

Наиболее крупные (до 3 см) кристаллы розоватого флоренсита-(Ce) с внутренними зонами флоренсита-(Nd) найдены в 2004 г. в развалах гидротермальных кварцевых жил на участке Сводовом хребта Малдынырд на Приполярном Урале (Репина, Юзеева, 2005). Жилы локализованы в кварцевых конгломератах обейской свиты нижнего ордовика O_{1ob} вблизи контакта с подстилающими высокоглиноземистыми метасоматитами, образованными по слюдиристо-гравийным отложениям алькесвожской свиты C_3-O_{1al} . Жилы мощностью до 3 м сложены молочно-белым и слабо-дымчатым гигантокристаллическим кварцем. В зальбандах жил кварц образует сростания с голубым турмалином-асбестом (дравитом), а в средней части жил в нем содержатся крупные вроски флоренсита и ксенотима-(Y) ранней генерации; в центре жил и на их выклинивании встречаются щелевидные полости с мелкими кристалликами горного хрусталя в сростании с флоренситом-(Ce) и ксенотимом-(Y) поздней генерации, размер которых не превышает 0.5 см.

При изучении состава и строения минералов раннего парагенезиса в крупных кристаллах флоренсита были выявлены зоны роста, обогащенные самарием (Репина, 2010). Детальное исследование таких участков привело к установлению нового самарий-доминантного члена подгруппы флоренсита — флоренсита-(Sm).

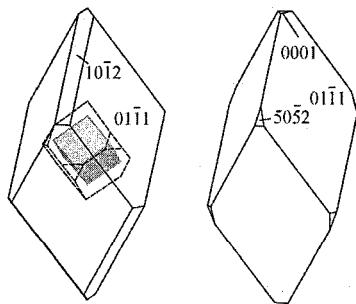


Рис. 2. Идеализированная форма кристаллов флоренцита-(Ce) с внутренними зонами флоренцита-(Sm).

Fig. 2. Idealized shape of florencite-(Ce) crystals with florencite-(Sm) zones.

Физические свойства. Флоренсит-(Sm)

образует тонкие зоны в остроромбоэдрических кристаллах флоренцита-(Ce) (рис. 2), преимущественно в средней части секторов роста ромбоэдров $\{10\bar{1}1\}$, не проявленных или слабо развитых в ограничении кристаллов, которые часто характеризуются преоблада-

нием индукционных поверхностей сокристаллизации с кварцем и ксенотимом-(Y) (рис. 3). Толщина отдельных зон флоренцита-(Sm) составляет от 0.01—0.1 мм, а суммарная мощность группы сближенных зон может достигать 1—3 мм. В сколах кристаллов по спайности эти зоны выделяются среди розоватой массы желтовато-белесым оттенком и отчетливо видны в характеристическом рентгеновском излучении SmL_α (рис. 4). Сам флоренсит-(Sm) бесцветный, в массе от бледно-розового до бледно-желтого, черта белая, блеск стеклянный жирный, твердость 5.5—6 (по Моосу). Минерал прозрачный до полупрозрачного, хрупкий, излом неровный, спайность хорошая по $\{0001\}$, отдельно по $\{1120\}$. Плотность микрорезерн $3.60(1) \text{ г/см}^3$ измерена уравниванием в водном растворе Клеричи с $n = 1.622$, расчетная плотность $3.666\text{—}3.743 \text{ г/см}^3$ (на основе эмпирических формул). В пламени паяльной трубки флоренсит оплавлялся с трудом, в закрытой трубке выделяет много воды; очень слабо растворяется в HCl и HNO_3 .

Спектр флуоресценции порошка флоренцита-(Sm) получен на импульсном катодолюминесцентном анализаторе КЛАВИ-Р и содержит две четкие полосы (рис. 5): 592 нм (интенсивная зеленая люминесценция Sm^{3+}) и 558 нм (желтая люминесценция Nd^{3+}).

Инфракрасный спектр минерала (рис. 6, а) в таблетке с КВг снят на ИК-Фурье спектрометре NIKOLET NEXUS с микроскопом CONTINUUM. Согласно данным И. И. Плюсниной (1977) и консультации Н. В. Чуканова, в фосфатах интенсивная полоса при 621 см^{-1} и полоса 921 см^{-1} вызваны деформационными колебаниями PO_4^{3-} и O—P—OH соответственно; интенсивные полосы 1036 , 1105 и 1223 см^{-1} — валент-

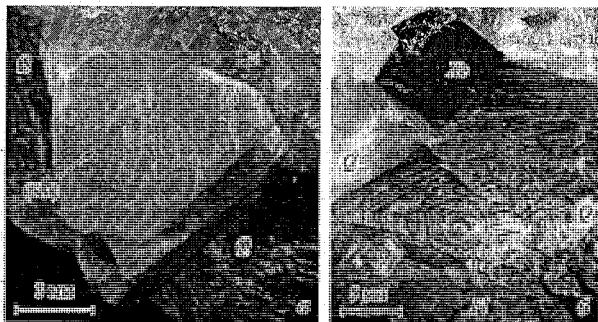


Рис. 3. Светлые зоны флоренцита-(Sm) (Sm) в сколе кристалла флоренцита (Fl) (а) и вид индукционной поверхности (б) флоренцита с ксенотимом (Xe) и кварцем (Q).

Fig. 3. Light zones of florencite-(Sm) (Sm) in chipped florencite crystal (Fl) (a) and the view of inductive surface of florencite (b) with xenotime (Xe) and quartz (Q).

а

б

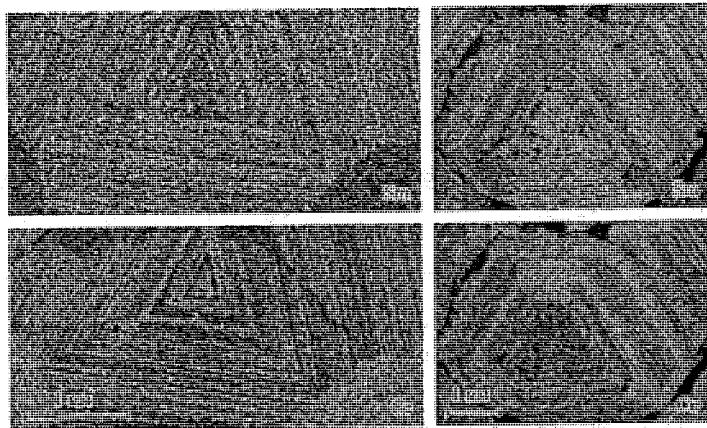


Рис. 4. Центральные участки двух кристаллов флоренсита с зонами флоренсита-(Sm) в характеристическом излучении $CeLa_1$, $SmLa_1$.

Fig. 4. Central parts of two florencite crystals with florencite-(Sm) zones in characteristic emission $CeLa_1$, $SmLa_1$.

ными колебаниями P—O; 2957 и 3374 cm^{-1} — валентными колебаниями изолированных групп O—H. Полосы 466 и 510 cm^{-1} (средней интенсивности), как мы предполагаем, могут быть вызваны колебаниями Ln—O. Слабая полоса в диапазоне 1600—1700 cm^{-1} указывает на присутствие небольшого количества молекул H_2O . В ИК-спектре флоренсита-(Sm) нет полос карбонатных групп в диапазоне 1400—1500 cm^{-1} , характерных для бразильского флоренсита-(La) (рис. 6, б).

На термограмме, полученной из навески 1583 мг на дериватографе Q-1500 D в диапазоне температур 13—984 °C, проявлен эндотермический эффект при 760 °C, обусловленный потерей воды 10.74 мас. % (рис. 7).

Оптические свойства исследованы в препаратах с иммерсионными жидкостями стандартного набора ИЖ-1 Львовского завода «Реактив». Флоренсит-(Sm) в иммерсии бесцветный, прозрачный, неплеохроирующий, одноосный положительный, $n_o = 1.704(2)$, $n_e = 1.713(2)$, дву-преломление 0.009(2).

Морфология и кристаллография.

Как уже отмечалось, габитус кристаллов флоренсита остроромбоздрический, но участки собственных граней на них редки. Измерения форм минерала выполнены с применением столика Е. С. Федорова в качестве гониометра, а включения зерен флоренсита в крупных кусках

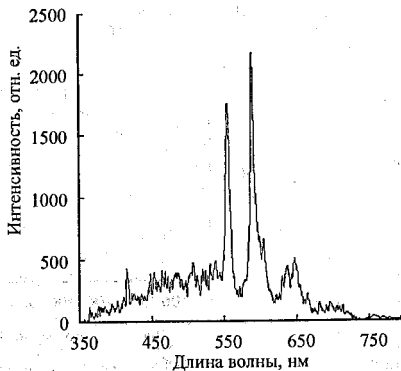


Рис. 5. Спектр катодолуминесценции флоренсита-(Sm).

Fig. 5. Cathodoluminescence spectrum of florencite-(Sm).

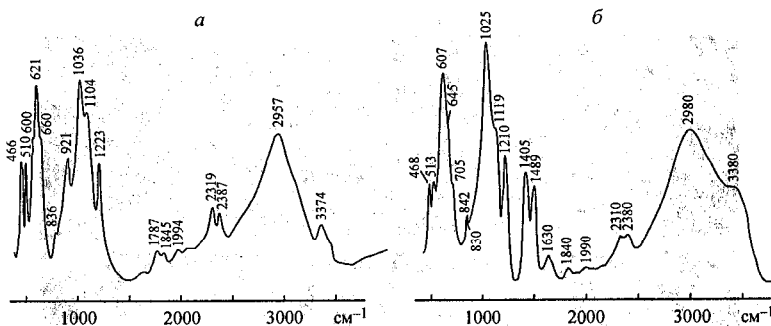


Рис. 6. ИК-спектр флоренцита-(Sm) (а) и флоренцита-(La) (б).

Fig. 6. IR spectrum of florencite-(Sm) (a) and florencite-(La) (b).

кварца — прикладным гониометром. Построение кристаллов выполнено по программе Shape 7.1 при рентгеновском соотношении $a:c = 1:2.32$. Это позволило уточнить ранее опубликованные данные (Репина, Юзеева, 2005; Репина, 2010) и установить, что на кристаллах развиты участки габитусных граней ромбоэдра $\{01\bar{1}1\}$ и редки участки узких граней $\{10\bar{1}2\}$, еще реже — крошечных граней $\{5052\}$ и $\{0001\}$ (см. рис. 2); двойники не встречены. Зоны флоренцита-(Sm) в основном проявлены в средней части секторов роста $\{10\bar{1}2\}$, но встречаются и как сплошные зоны в наиболее развитых ромбоэдрах — $\{10\bar{1}2\}$ и $\{01\bar{1}1\}$ (рис. 3, а, 4).

По аналогии с синтетическим флоренцитом-(Sm) (Schwab et al., 1990) и другими членами подгруппы флоренцита сингония природного флоренцита-(Sm) тригональная, пространственная группа $R\bar{3}m$; монокристалльная съемка не проводилась.

Рентгеновские данные. Дифрактограмма порошка флоренцита-(Sm) снята на дифрактометре Shimadzu XRD-6000, $\text{Cu K}\alpha_1$ с монохроматором, скорость съемки 0.5 град/мин, внутренний стандарт — Ge; параметры ячейки $a = 6.972(4)$, $c = 16.182(7)$ Å рассчитаны методом наименьших квадратов по 17 однозначно диагностированным отражениям, начиная с $d = 3.479$ Å (табл. 1); отражения 5.65 и 5.36 Å в расчет не включены из-за большей погрешности определения d в малоугловой области. Результаты анализа показывают, что межплоскостные расстояния природного

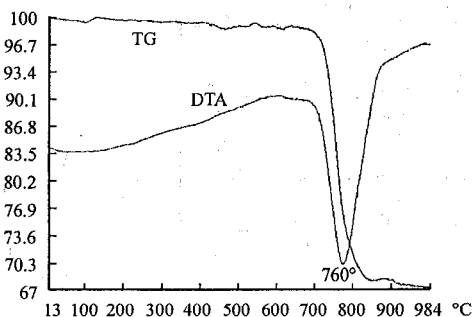


Рис. 7. Термограмма флоренцита-(Sm).

Fig. 7. Thermogram of florencite-(Sm).

Межплоскостные расстояния и параметры элементарной ячейки флоренсита-(Sm) в сопоставлении с синтетическими $\text{SmAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$, $\text{NdAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$ и природным $\text{CeAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$

X-ray powder patterns and lattice constants of the florencite-(Sm) in comparison with synthetic $\text{SmAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$, $\text{NdAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$ and native $\text{CeAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$

Флоренсит-(Sm)				SmAl ₃ (PO ₄) ₂ (OH) ₆			NdAl ₃ (PO ₄) ₂ (OH) ₆			CeAl ₃ (PO ₄) ₂ (OH) ₆		
<i>l</i>	<i>d</i> _{изм.} , Å	<i>hkl</i>	<i>d</i> _{расч.} , Å	<i>l</i>	<i>d</i> , Å	<i>hkl</i>	<i>l</i>	<i>d</i> , Å	<i>hkl</i>	<i>l</i>	<i>d</i> , Å	<i>hkl</i>
43	5.65	101	5.657	80	5.636	101	60	5.650	101	80	5.65	101
7	5.36	003	5.394	5	5.329	003				5	5.42	003
							<5	4.828	012	5	4.85	012
37	3.479	110	3.486	65	3.475	110	45	3.483	110	60	3.48	110
11	3.363	104	3.351				5	3.351	104	15	3.36	104
100	2.925	113	2.924	100	2.911	113	100	2.924	113	100	2.93	113
9	2.822	202	2.827	85	2.816	202	15	2.828	202	15	2.83	015
16	2.700	006	2.686	10	2.665	006	10	2.686	006	15	2.71	006
12	2.418	024	2.416	15	2.402	024	10	2.415	024	20	2.42	024
8	2.255	211	2.260	19	2.251	211	10	2.260	211	10	2.26	211
17	2.206*	205	2.203							25	2.202	122
22	2.191	122	2.196	40	2.187	122	35	2.197	122			
46	2.161	107	2.151	30	2.135	107	25	2.152	107	40	2.170	107
15	2.132	116	2.128	15	2.113	116	10	2.128	116	10	2.139	116
							<5	2.012	030			
12	1.984	214	1.986	10	1.976	214	10	1.985	214	10	1.990	214
										5	1.927	018
58	1.881	303	1.885	40	1.877	303	35	1.885	303	40	1.886	303
										5	1.868	125
20	1.738	220	1.743	30	1.737	220	25	1.743	220	30	1.742	220
4	1.680	131	1.666							10	1.685	208
										5	1.661	223
6	1.623	217	1.621				5	1.621	217	10	1.627	217
7	1.599	119	1.593	10	1.581	119	<5	1.593	119	10	1.604	119
				5	1.479	315				5	1.570	1.0.10
				10	1.478	042	<5	1.484	042	15	1.486	042
				5	1.455	226	<5	1.462	226	15	1.466	226
a6.972(4) c16.182(7)Å V=681.20Å ³ Z=3 a:c=1:2.3210 Наши данные				a6.947(1) c15.982(3)Å V=667.97Å ³ Z=3 a:c=1:2.3006 Schwab et al., 1990			a6.972(1) c16.116(3)Å V=678.43Å ³ Z=3 a:c=1:2.3115 Schwab et al., 1990			a6.971(8) c16.262(5)Å V=684.36Å ³ Z=3 a:c=1:2.3328 PDF № 43-0673		

Примечание. Дифрактометр Shimadzu XRD-6000, монохроматизированное $\text{CuK}\alpha$ -излучение, 0,5 град/мин, аналитик Е. В. Белогуб; Отражения Ge 3.269 и 2.000 Å опущены. Звездочкой отмечены индексы отражения, рассчитанные по реальным параметрам элементарной ячейки.

флоренсита-(Sm) с существенной долей Nd близки синтетическому $\text{SmAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$ или являются промежуточными между ним и $\text{NdAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$. В области 2.19—2.20 Å на дифрактограмме флоренсита-(Sm) присутствуют два отражения в отличие от одного, характерного для эталонных флоренситов. В то же время на эталонных дифрактограммах некоторых представителей группы алуниита—ярозита, кристаллизующихся в той же пространственной группе, одновременно присутствуют отражения 205 и 122, например, в биверите (PDF № 47-1817), синтетическом фло-

Состав флоренсита-(Sm) с Приполярного Урала (ан. 1—8, мас. %)
Composition of florencite-(Sm) from the Subpolar Urals (analyses 1—8, wt %)

Компо- нент	Микрозонд с ЭДС						Микрозонд с ВДС			
	1	2	3	4	5	среднее	6	7	8	среднее
La ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	0.60	0.54	0.73	0.62
Ce ₂ O ₃	1.62	0.78	2.81	3.04	1.33	1.92	3.31	2.94	3.61	3.29
Pr ₂ O ₃	0.80	—	—	—	—	0.16	1.07	0.98	1.11	1.05
Nd ₂ O ₃	11.11	7.94	10.85	9.93	7.57	9.35	10.20	10.42	10.30	10.31
Sm ₂ O ₃	13.29	12.72	11.93	13.37	13.47	12.96	12.03	13.32	12.52	12.62
Eu ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	0.43	0.40	0.39	0.41
Gd ₂ O ₃	2.86	3.01	2.28	2.16	2.42	2.55	2.47	2.29	2.13	2.30
Dy ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	0.40	—	—	0.13
SrO	1.92	2.74	1.64	0.58	2.65	1.91	0.72	0.72	0.68	0.71
CaO	0.52	1.49	0.53	0.31	1.02	0.77	0.41	0.32	0.31	0.35
Al ₂ O ₃	28.33	29.19	29.30	32.01	32.19	30.20	30.44	29.30	29.92	29.89
P ₂ O ₅	28.33	27.69	27.42	27.06	25.42	27.18	25.80	26.53	26.08	26.14
SO ₃	1.70	3.33	1.12	1.13	3.37	2.13	0.83	0.81	0.92	0.85
SiO ₂	—	—	—	—	—	—	0.09	0.06	0.12	0.09
H ₂ O	—	—	—	—	—	10.74*	—	—	—	10.74*
Сумма	90.48	88.99	87.87	89.59	89.44	99.87	88.80	88.63	88.82	99.50

Примечание. H₂O определена методом ДТА (рис. 7). Прочерк — содержание элемента ниже предела обнаружения. As, Ba, Pb, F, Cl не обнаружены. Микрозонд: JXA-733 с ЭДС INCA, оператор Е. И. Чурин; SX-100 Cameca с ВДС, оператор В. В. Хиллер.

ренсита-(La) (Schwab et al., 1990). При индцировании обоих отражений достигнуто удовлетворительное соответствие наблюдаемых и расчетных межплоскостных расстояний. Присутствие в изученном материале микровключений флоренсита-(Ce) с межплоскостным расстоянием 2.202 Å и индексами 122 не подтверждается, так как других индивидуализированных отражений этого минерала нет.

Химический состав флоренсита-(Sm) был изучен на микрозонде JXA-733 Geol Superprobe с энергодисперсионным спектрометром INCA (ЭДС) при ускоряющем напряжении $U = 20$ кВ, токе зонда $I = 1$ нА и диаметре пучка 2—5 мкм (эталон: SmP₅O₁₄, GdP₅O₁₄, монацит-(Ce), диопсид, целестин, пироп). Средний состав и вариации содержаний компонентов по 5 анализам приведены в табл. 2 (ан. 1—5). Эмпирическая формула для среднего ЭДС-анализа (рассчитанная на 14 анионов) имеет вид: (Sm_{0.37}Nd_{0.28}Gd_{0.07}Ce_{0.06}Pr_{0.01}Sr_{0.09}Ca_{0.07})_{1.95}Al_{2.97}(P_{1.92}S_{0.13})_{2.05}O₁₄H_{2.98}, идеализированная — (Sm,Nd)Al₃(PO₄)₂(OH)₆; расчетная плотность 3.666 г/см³. Коэффициент Гладстоуна — Дэйла согласованности физических свойств K_p и химического состава K_c флоренсита-(Sm) $C = 1 - (K_p/K_c) = -0.0004 \Sigma k_i p_i / 100$, где n — среднее преломление флоренсита, D — плотность, p_i — содержание соответствующего оксида в среднем анализе флоренсита, k_i — энергетический коэффициент соответствующего оксида.

По рекомендации Комиссии ММА проведено доизучение состава редких земель в минерале на микрозонде SX-100 Cameca, укомплектованном пятью волновыми спектрометрами (ВДС). Анализы проводились при $U = 15$ кВ, $I = 20$ нА и диаметре пучка электронов 2 мкм. В качестве эталонов использовались искусственные фоофатные стекла состава MPO₄, где М — редкоземельные элементы от La до Dy, а также CaSiO₃, GaAs, целестин (Sr, S), жадеит (Al, Si). Дополнительные данные близки результатам, полученным на ЭДС, отличаясь немного более значимыми примесями La, Ce, Pr, Eu и, напротив, меньшими Ca, Sr и S (табл. 2, ан. 6—8). Формула флоренсита-(Sm), рассчитанная для среднего ВДС-анализа с учетом содержания H₂O 10.74 мас. % имеет вид (Sm_{0.38}Nd_{0.32}Gd_{0.07}Ce_{0.10}Pr_{0.03}La_{0.02}Eu_{0.01}Sr_{0.04}Ca_{0.03})_{1.00}Al_{3.04}(P_{1.91}S_{0.05}Si_{0.01})_{1.97}O₁₄H_{5.92} и

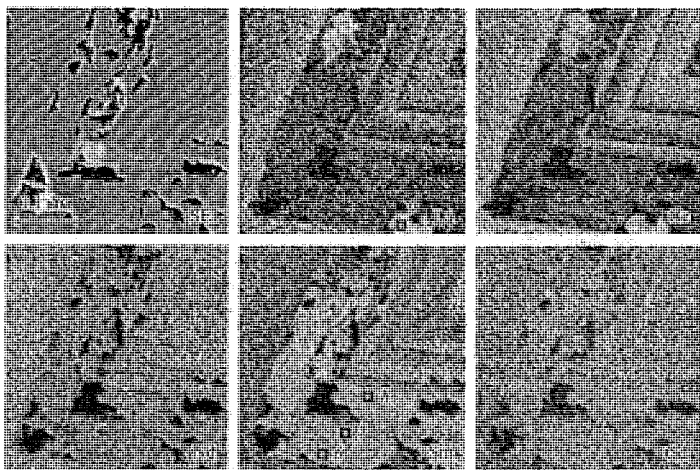


Рис. 8. Строение зон флоренсита-(Sm) во вторичных электронах и в характеристическом излучении редкоземельных элементов.

6, 7, 8 — участки ВДС-анализа (см. табл. 2); 9 — включение флоренсита-(Ce).

Fig. 8. Structure of florencite-(Sm) zones in back-scattered electron image and images in characteristic REE emission.

в целом близка вышеприведенной. По уточненным данным, расчетная плотность флоренсита-(Sm) составила 3.743 г/см^3 , а коэффициент Гладстона—Дэйла $C = -0.028$.

В средней части секторов роста $\langle 1011 \rangle$ отмечается тонкое ритмичное чередование зон флоренсита-(Sm), -(Nd) и -(Ce), имеющее характер осцилляторной зональности (рис. 4). Для этих участков исследованы вариации распределения редких земель в рентгеновском характеристическом излучении элементов и записаны графики относительных концентраций главных РЗЭ — Sm, Nd и Ce (рис. 8 и 9), отражающие преобладание Sm над Nd и Ce и характер изоморфизма во флоренситах.

По данным характеристического рентгеновского излучения, некоторые зоны флоренсита-(Sm) содержат микровключения (0.05 мм) флоренсита-(Ce), существенно обогащенного легкими РЗЭ и примесью As, а концентрация Sm в них ниже предела обнаружения (рис. 8, точка 9); эмпирическая формула $(\text{Ce}_{0.51}\text{La}_{0.30}\text{Nd}_{0.11}\text{Pr}_{0.03}\text{Eu}_{0.01}\text{Gd}_{0.01}\text{Sr}_{0.01}\text{Ca}_{0.01})_{0.99}\text{Al}_3(\text{P}_{1.79}\text{As}_{0.08}\text{S}_{0.06}\text{Si}_{0.06})_{1.99}\text{O}_{14}\text{H}_{6.23}$.

Сопоставление данных флоренсита-(Sm) с синтетическим $\text{SmAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$ и природным флоренситом-(Nd) показывает, что ряд характеристик флоренсита-(Sm) является промежуточным между ними (табл. 3). Кристаллизация флоренсита-(Sm) возможна из растворов, обогащенных тяжелыми и промежуточными РЗЭ, когда в парагенезисе с ним будут присутствовать минералы, содержащие редкие земли иттриевой подгруппы. Так, на участке Сводовом ассоциирующий с флоренситом ксенотим-(Y) содержит до 11—23 мас. % Gd_2O_3 и 7—8 мас. % Dy_2O_3 (Репина, 2010). Возможно, что формирование зон флоренсита-(Sm) происходило в результате фракционирования лантаноидов и периодического колебания пересыщений на фронте роста кристаллов. Подгруппа флоренсита, представленная флоренситом-(La), -(Ce) и -(Nd), дополнена новым самарий-доминантным аналогом — флоренситом-(Sm). Образец минерала передан в Естественно-научный музей Ильменского государственного заповедника ИМин УрО РАН, г. Миасс (рег. № 17228).

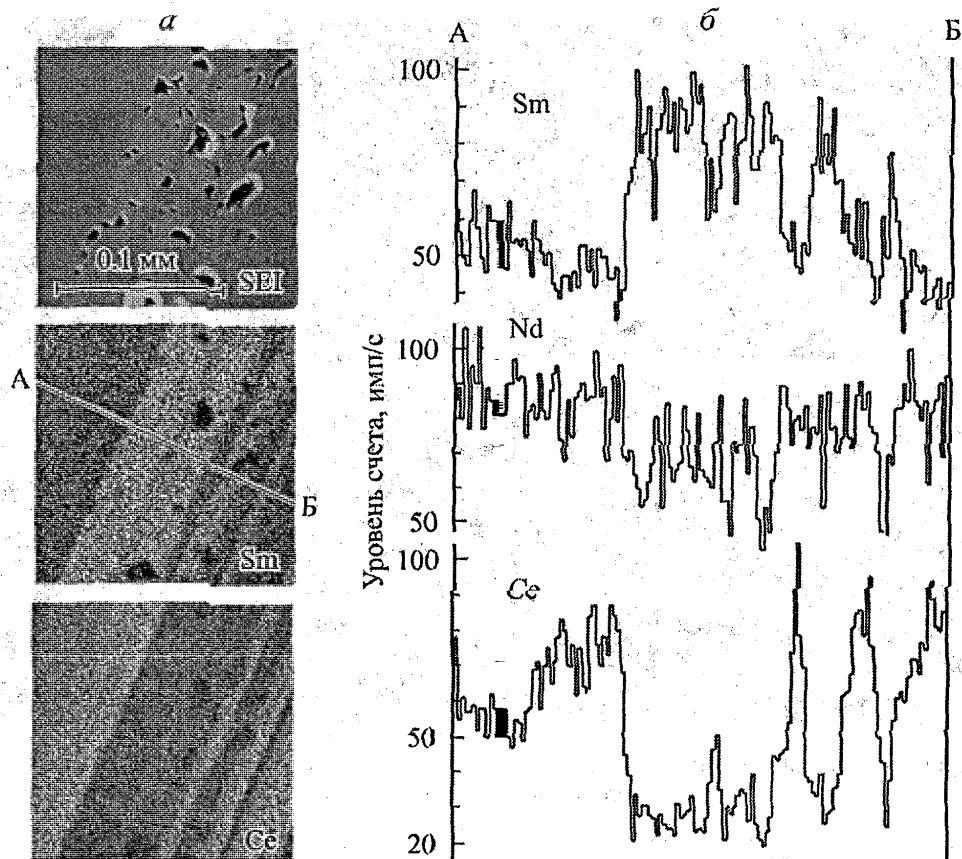


Рис. 9. Чередование зон флоренцита-(Sm), -(Nd) и -(Ce).

a — в характеристическом излучении РЭЭ, *б* — графики относительных концентраций Sm, Nd и Ce по профилю А—Б.

Fig. 9. Alternation of zones of florencite-(Sm), -(Nd) and -(Ce) in characteristic REE emission (*a*), and plots of Sm, Nd and Ce concentrations along the profile A—B (*b*).

Таблица 3

Характеристика флоренцита-(Sm), синтетического $\text{SmAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$ и флоренцита-(Nd)

Characteristic of florencite-(Sm), synthetic $\text{SmAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$, and florencite-(Nd)

Свойство	Флоренцит-(Sm)	$\text{SmAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$	Флоренцит-(Nd)
Формула	$(\text{Sm}, \text{Nd})\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$	$\text{SmAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$	$(\text{Nd}, \text{Ce})\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$
Форма зерна	Зоны (0.01—1 мм) внутри остромбоздрических кристаллов флоренцита-(Ce)	Ромбоздрические кристаллики (3—10 мкм)	Нет данных
Цвет	Бесцветный до бледно-розового и бледно-желтого	Нет данных	Желтый, розовый
Блеск	Стеклянный жирный	» »	Смоляно-жирный
Твердость (Моос)	5.5—6	» »	5—6
Плотность, г/см ³	3.60 (изм.) 3.743 (расч.)	3.903 (расч.)	3.52 (изм.) 3.74 (расч.)
Оптические свойства	n_e 1.713(2), n_o 1.704(2)	Нет данных	n_e 1.73 n_o 1.72
Состав, мас. %	La_2O_3 0.62; Ce_2O_3 3.29; Pr_2O_3 1.05; Nd_2O_3 10.31; Sm_2O_3 12.62; Eu_2O_3 0.41; Gd_2O_3 2.30; Dy_2O_3 0.13; SrO 0.71; CaO 0.35; Al_2O_3 29.81; P_2O_5 26.14, 27.18; SiO_2 0.85; SiO_2 0.09; H_2O (изм.) 10.74; Сумма 99.50	Sm_2O_3 33.3(3); Al_2O_3 28.3(3); P_2O_5 26.9(2); H_2O (изм.) 11.5(1) Сумма 100.0	Ce_2O_3 7.95; Nd_2O_3 24.45; Al_2O_3 29.63; P_2O_5 27.50; H_2O (изм.) 10.47 Сумма 100.0

Таблица 3 (продолжение)

Свойство	Флоренсит-(Sm)	$\text{SmAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$	Флоренсит-(Nd)
Сингония	Тригональная	Тригональная	Тригональная
Пр. группа	$R\bar{3}m$	$R\bar{3}m$	$R\bar{3}m$
Дифрактограмма (главные линии, Å)	2.925, 1.881, 2.161, 5.65, 3.479	2.911, 2.816, 5.636, 3.475, 2.187, 1.877	2.93, 2.17, 5.56
Параметры ячейки	a 6.972(4) Å c 16.182(7) Å V 681.20 Å ³ $Z=3$ $a:c=1:2.3210$	a 6.947(1) Å c 15.982(3) Å V 667.97 Å ³ $Z=3$ $a:c=1:2.3006$	a 6.98 Å c 16.28 Å V 686.90 Å ³ $Z=3$ $a:c=1:2.3324$
Нахождение	В гидротермальных кварцевых жилах среди конгломератов, Приполярный Урал, Россия	Синтетический (Schwab et al., 1990)	В кремнистых сланцах, Калифорния, США (www.webmineral.com/data/Florensite-(Nd).shml)

Авторы благодарны сотрудникам ИМин УрО РАН — П. В. Хворову за выполнение термического анализа, В. Е. Еремяшеву за выполнение ИК-спектроскопии и катодолюминисценции, В. А. Муфтахову и В. А. Попову — за помощь в получении аналитических данных и обсуждение результатов исследований, а также Н. В. Чуканову (ИПХФ РАН) за консультацию по интерпретации ИК-спектра и предоставление из его базы данных (Chukanov, 2006) ИК спектра флоренсита-(La).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 08-05-00361-а.

Список литературы

- Лабунцов А. Н. О кристаллах флоренсита // Тр. Минер. музея АН СССР. 1949. Вып. 2. С. 135—136.
- Мельникова Е. М., Кокарев Г. Н., Князева Д. Н. Флоренсит из гидротермальных метасоматитов Приполярного Урала // ЗВМО. 1975. Вып. 3. С. 341—343.
- 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 рудопроявлениях Чудное и Нестеровское (хребет Малдындыр, Приполярный Урал) // Геохимия. 2005. Т. 43. № 11. С. 1175—1195.
- Плюснина И. И. Инфракрасные спектры минералов. М.: Изд-во МГУ, 1977. 174 с.
- Попов В. А., Канонеров А. А. Самоцветы слюдитов месторождения Глинское // Уральская летняя минералогическая школа-2000. Екатеринбург: УГГТА, 2000. С. 190—194.
- Репина С. А., Юзеева Н. С. Флоренсит в породах зоны межформационного несогласия на Приполярном Урале // Уральский минералогический сборник № 13. Миасс: ИМин УрО РАН, 2005. С. 91—113.
- Репина С. А. Зональность и секториальность минералов групп флоренсита и ксенотима из кварцевых жил (Приполярный Урал) // ЗРМО. 2010. № 1. С. 19—39.
- Силаев В. И., Филиппов В. Н., Сокерин М. Ю. Твердые растворы вудхаузеит—сванбергит—флоренсит во вторичных кварцитах // ЗВМО. 2001. № 1. С. 99—110.
- Сомина М. Я., Булах А. Г. Флоренсит из карбонатитов Восточного Саяна и некоторые вопросы химической конституции группы крандаллита // ЗВМО. 1966. Вып. 5. С. 537—550.
- Florensite-(Nd) ([http://www.webmineral.com/data/Florensite-\(Nd\).shml](http://www.webmineral.com/data/Florensite-(Nd).shml)).
- Chukanov N. V. Contribution of the IR spectroscopy to the characterization of new mineral species // Abstr. of 19th General meeting of the IMA, Kobe, 2006. P. 31.
- Schwab R. G., Gotz C., Herold H. and de Oliveira N. P. Compounds of the crandallite type: synthesis and properties of pure rare earth element-phosphates // Neues Jahrb. für Mineralogie. 1990. Hf. 6. S. 241—254.

Поступила в редакцию
28 марта 2010 г.