

— калийсадангаит — отмечен в амфиболовом миаските близ контакта его с фирситом.  
Для миаскитов характерны амфиболы: гастингсит, ферритарамит, калийсадангаит в зоне контакта с фирситом, а также калийферритарамит в жильных телах. Саданагаит и ферропаргасит являются породообразующими минералами фирситов. Различие составов амфиболов миаскитов и фирситов может свидетельствовать о различии *P—T* условий образования этих пород при формировании миаскитового комплекса, что соответственно определяет фазовые переходы составов амфиболов.

#### Список литературы

- Баженов А. Г., Баженова Л. Ф., Поляков В. О. Саданагаит из щелочного комплекса Ильменских гор // ЗВМО. 1988. Вып. 1. С. 74—78.
- Баженов А. Г., Баженова Л. Ф., Кримова Т. В., Хворов П. В. Калийферрисаданагаит  $(K,Na)Ca_2(Fe^{2+},Mg)_3(Fe^{3+},Al)_2[Si_5Al_3O_{22}(OH)_2]$  — новый минеральный вид в группе амфиболов (Ильменские горы, Урал) // ЗВМО. 1999. № 4. С. 50—55.
- Левин В. Я. Щелочная провинция Ильменских—Вишневых гор (формация нефелиновых сиенитов Урала). М.: Наука, 1974. 223 с.
- Лик Б. Е. и др. Номенклатура амфиболов: доклад подкомитета по амфиболам Комиссии по новым минералам и названиям минералов Международной Минералогической Ассоциации (КНМНМ ММА) // ЗВМО. 1997. № 6. С. 82—102.
- Никандров С. Н., Вализер П. М., Кобяшев Ю. С. Матричная модель номенклатуры амфиболов // Изв. Челябин. науч. центра. 1999. Вып. 1. С. 40—47.
- Саданагаит. Минералы: Справочник. Т. IV, вып. 3. М.: Наука, 1996. С. 351—353.
- Поляков В. О., Баженов А. Г. Первая находка магниосаданагаита в России // Урал. минер. сб. № 8. Миасс: Имин УрО РАН, 1998. С. 249—251.
- Domeneghetti M. C., Oberli R., Ungaretti Ghezzi C., Memmi I., Ricci C. Chemical variations in the amphiboles of an equilibrated amphibolite from north-eastern Sardinia (Italy): crystalchemical and petrological implications // «14<sup>th</sup> Gen. Meet. Int. Miner. Assoc., Stanford, Calif., 13—18 July, 1986. Abstr. Program.» Washington, D., C., 1986. P. 92.
- Leake B. E. e. a. Nomenclature of amphiboles: report of the Subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on new minerals and mineral names // Canad. Miner. 1997. Vol. 35. N 1. P. 219—246.
- Mogessie A., Purtscheller F., Tessardi R. High alumina calcic amphiboles (aluminopargasite-magnesiosadanaagaite) from metabasites and metacarbonates of Central Oetztal, Eastern Alps (Northern Tyrol, Austria) // Neues Jahrb. Miner. Abh. 1986. Bd 154. N 1. S. 21—39.
- Shimazaki H., Bunno M., Ozawa T. Sаданагаит and magnesio-sаданагаит, new silica-poor members of calcic amphibole from Japan // Amer. Miner. 1984. Vol. 69. N 5—6. P. 465—471.

Поступила в редакцию  
14 сентября 1999 г.

УДК 549.754

ЗВМО, № 1, 2001 г.  
Proc. RMS, N 1, 2001

© Д. члены В. И. СИЛАЕВ, В. Н. ФИЛИПPOB, М. Ю. СОКЕРИН

### ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ ВУДХАУЗЕИТ—СВАНБЕРГИТ—ФЛОРЕНСИТ ВО ВТОРИЧНЫХ КВАРЦИТАХ

V. I. SILAEV, V. N. FILIPPOV, M. Yu. SOKERIN. SOLID SOLUTIONS  
OF WOODHOUSEITE—SVANBERGITE—FLORENCITE IN SECONDARY QUARTZITES

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 167982, Сыктывкар, Первомайская, 54,  
E-mail: Sokerin@geo.komisc.ru

Aluminium sulphate-phosphates association of variable composition has been found, reflecting a nearly continuous transition from florencites to REE-bearing woodhouseite-svanbergites (hartites) and further to Sr woodhouseite. The studied minerals occur as homogeneous ordered solid solutions, which composition varies depending on heterovalent combinatory isomorphism according to the following scheme:  $(Ca, Sr, Ba)^{2+}[SO_4]^{2-} \leftrightarrow REE^{3+}[PO_4]^{3-}$ .

В настоящее время известно множество природных арсенат-сульфат-фосфатных соединений, общую формулу которых можно представить как  $RA_3X_2(OH)_6$ , где R — Ca, Sr, Ba, Pb, Bi, REE, K, Na, NH<sub>4</sub>, H<sub>3</sub>O; A — Al, Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, X — комплексные анионы  $[PO_4]^{3-}$ ,  $[HPO_4]^{2-}$ ,  $[SO_4]^{2-}$ ,  $[SiO_4]^{4-}$ ,  $[AsO_4]^{3-}$ . Центральное

место среди упомянутых соединений занимают вудхаузит —  $\text{CaAl}_3[\text{PO}_4][\text{SO}_4](\text{OH})_6$ , сванбергит —  $\text{SrAl}_3[\text{PO}_4][\text{SO}_4](\text{OH})_6$  и флоренситы —  $(\text{Ce, La, Nd})\text{Al}_3[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_6$ , выявленные и описанные в самых разных по генезису геологических объектах (Буканов и др., 1973; Булгакова, 1973; Гладковский, Храмов, 1968; Гладковский и др., 1971; Сомина, Булах, 1966; Казисын, 1965; Кузнецова и др., 1976; Луканина, 1969; Никитина и др., 1963; Гладковский и др., 1971; Швецова и др., 1989; Gomes, 1968; Fijal, Nies, 1977; Ygeberg, 1965; Switzer, 1949).

Алюминиевые сульфат-фосфаты (или APS-минералы, по: Stroffregen, Alpers, 1987) являются строго изоструктурными соединениями, кристаллизующимися в тригональной сингонии, дитригонально-скеленоэдрическом виде симметрии, пр. гр.  $R\bar{3}m$  (Pabst, 1947; Белов, 1967; Kato, 1971; Kato, Miura, 1977). Тем не менее вопреки структурной тождественности эти минералы традиционно относят к разным минеральным группам и даже классам (Lemmon, 1937; Поваренных, 1966; Кашкай, 1969; Wise, 1975; Минералогические таблицы, 1981; Флейшер, 1990) на основании, вероятно, представлений об их химической индивидуальности. Последнее, однако, уже подвергалось серьезному сомнению (Stroffregen, Alpers, 1987), а в настоящее

время может быть решительно оспорено. Проведенные нами исследования Литошкинского<sup>1</sup> проявления вторичных кварцитов на Полярном Урале показали, что вудхаузит, сванбергит и флоренситы образуют на самом деле единую систему упорядоченных твердых растворов, в которых почти непрерывно и согласованно происходят изоморфные замещения как в катионной (Ca, Sr, REE), так и анионной (P, S) подрешетках.

### ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МИНЕРАЛОПРОЯВЛЕНИЯ

Исследуемое проявление приурочено к южному крылу Лонготьяганского глубинного разлома и локализуется в подвергнувшихся гранитизации вулканогенно-осадочных породах среднего-позднего рифея (рис. 1, А). Здесь откартировано линзовидное тело вторичных, интенсивно минерализованных кварцитов, субсогласно залегающее среди метаандезитобазальтов и аповулканогенных сланцев. Общая протяженность линзы достигает 500 м, мощность колеблется от 10 м на участке пережима до 20—25 м в раздувах (рис. 1, Б). Кварциты представляют собой массивные, иногда с тенденцией к грубой плитчатости тонко-среднезернистые породы сероватого или серовато-кремового цвета, разбитые штокверком секущих и субсогласных жил и прожилков молочно-белого кварца. ореол наложенного окварцевания выходит далеко за пределы кварцитов, образуя во вмещающих сланцах самостоятельную систему кварцевых жил. Мощность таких жил достигает 0.5 м.

Рассматриваемая минерализация установлена как в кварцитах, так и в более поздних кварцевых жилах. В обеих ситуациях она определяется весьма редким и сложным парагенезисом гематита и рутила с железомagneзиальными, редкометалльными и редкоземельными алюмосиликатами, алюминиевыми фосфатами и сульфат-фосфатами. Подобные парагенезисы обнару-

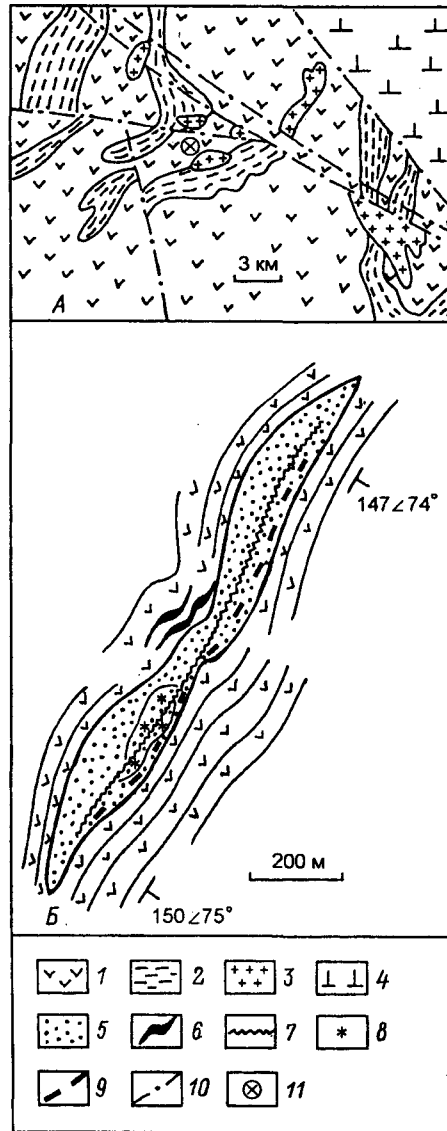


Рис. 1. Геологическая позиция (А) и строение Литошкинского проявления (Б) вторичных кварцитов.

1, 2 — вулканогенная (1) и терригенно-карбонатная (2) свиты среднего-позднего рифея (няровейский комплекс); 3 — гранитные интрузии; 4 — гипербазиты массива Сымкеу; 5 — вторичные кварциты; 6 — жилы молочно-белого кварца; 7 — присоевая зона пиритизации; 8 — богатая минерализация лазулита; 9 — обогащение крупнопластинчатым гематитом и хлоритом; 10 — тектонические нарушения; 11 — местоположение Литошкинского проявления на геологическом плане.

Fig. 1. Geological setting (А) and the structure (Б) of Litozhinskoye occurrence of secondary quartzites.

<sup>1</sup> Названо по фамилии первооткрывателя Д. Н. Литошко.

жены к настоящему времени лишь на нескольких объектах в США, Швеции и России (Рипп, Канакин, 1998). В состав исследуемой минеральной ассоциации входят дистен, хлоритоид, Sc-Nf цирконы, апатит, минералы серии лазулит—скорцалит—барбосалит, саркопсид, чилдренит, алюминиевые сульфат-фосфаты, ксенотим, монацит, беловит, стерретит и некоторые другие (Литошко, Буханов, 1989).

Распределение основных из перечисленных минералов в плане и разрезе кварцовой линзы Литошкинского проявления характеризуется нечетко выраженной зональностью (рис. 1, Б). Лежащий бок линзы несколько обогащен гематитом и хлоритоидом, приосевая часть — лазулитом, висячий бок — дистеном и алюминиевыми сульфат-фосфатами. Кроме того, вдоль осевой линии линзы протягивается маломощная (до 0.5 м) зона интенсивной пиритизации кварцитов, практически не содержащих фосфатной минерализации. Онтогенетические исследования показали, что отмеченная выше сульфат-фосфатная и алюмосиликатная минерализация является наложенной на кварциты и, вероятно, сопряженной по времени с поздним гнездово-прожилковым окварцеванием.

## РАЗМЕР, МОРФОЛОГИЯ, СОСТАВ И ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ВЫДЕЛЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СУЛЬФАТ-ФОСФАТОВ

Исследуемые минералы представлены редкой вкрапленностью отдельных зерен субмикронно-миллиметровых размеров. Их изучение проводилось ИК спектроскопическим методом и на сканирующем электронном микроскопе JSM-6400, оснащенный энергетическим спектрометром фирмы Link и волновым — Microscop. В качестве объектов изучения использовались полированные препараты. Измерение концентраций элементов осуществлялось с применением аттестованных стандартов. Формулы минералов рассчитывались на основе атомных количеств  $P + S = 2$ , что считается наиболее предпочтительным с кристаллохимической точки зрения (Jambor, 1999). Содержание OH-групп определялось по балансу зарядов.

Проведенные исследования показали, что все зерна алюминиевых сульфат-фосфатов могут быть подразделены на три типа: гетерофазные, гомофазные неоднородные и гомофазные однородные по составу.

Гетерофазные зерна представляют собой субизометричные, часто псевдокубического габитуса выделения, размер которых варьирует от  $15 \times 15$  до  $150 \times 150$  мкм, составляя в среднем  $60 \times 60$  мкм (рис. 2). По своей морфологии рассматриваемые зерна отвечают «кубооктаэдрическому» типу выделений поздней генерации флоренсита в карбонатитах (Сомина, Булах, 1966). Эмпирические формулы минералов, рассчитанные по данным рентгеноспектрального анализа, в точках, указанных на рис. 2, следующие:

- 1.1 —  $(Ca_{0.19}Sr_{0.02}La_{0.31}Ce_{0.41}Nd_{0.05})_{0.98}Al_{2.89}(PO_4)_{1.9}(SO_4)_{0.1}(OH)_{5.5}$
- 1.2 —  $(Ca_{0.41}Sr_{0.27}La_{0.04}Ce_{0.11}Nd_{0.05})_{0.88}Al_{2.93}(PO_4)_{1.33}(SO_4)_{0.67}(OH)_{5.42}$
- 1.3 —  $(Ca_{0.54}Sr_{0.28}Ce_{0.06}Nd_{0.03})_{0.91}Al_{2.97}Al_{2.97}(PO_4)_{1.22}(SO_4)_{0.78}(OH)_{5.6}$
- 1.4 —  $(Ca_{0.51}Sr_{0.33}Ce_{0.04}Nd_{0.01})_{0.89}Al_{2.97}[(PO_4)_{1.1}(SO_4)_{0.9}](OH)_{5.64}$
- 1.5 —  $(Ca_{0.93}Sr_{0.05})_{0.98}Al_{2.83}[(PO_4)_{1.36}(SO_4)_{0.64}](OH)_{5.09}$
- 2.1 —  $(Ca_{0.2}Sr_{0.13}La_{0.16}Ce_{0.32}Nd_{0.08})_{0.89}Al_{2.68}Fe_{0.25}2.93[(PO_4)_{1.66}(SO_4)_{0.27}](OH)_{5.61}$
- 2.2 —  $(Ca_{0.33}Sr_{0.48}Ce_{0.04}Nd_{0.03})_{0.88}Al_{2.94}Fe_{0.02}2.96[(PO_4)_{1.14}(SO_4)_{0.77}(SiO_4)_{0.09}](OH)_{5.75}$
- 2.3 —  $(Ca_{0.5}Sr_{0.46}Ba_{0.03})_{0.99}Al_{2.93}Fe_{0.05}2.98[(PO_4)_{1.58}(SO_4)_{0.35}(SiO_4)_{0.07}](OH)_{5.2}$
- 3.1 —  $Ca_{0.06}La_{0.23}Ce_{0.46}Pr_{0.05}Nd_{0.15}0.95Al_{2.91}[(PO_4)_{1.92}(SO_4)_{0.08}](OH)_{5.37}$
- 3.2 —  $(Ca_{0.26}Sr_{0.27}La_{0.08}Ce_{0.2}Pr_{0.03}Nd_{0.07})_{0.91}Al_{2.59}Fe_{0.39}2.98[(PO_4)_{1.44}(SO_4)_{0.56}](OH)_{5.7}$
- 3.3 —  $(Ca_{0.35}Sr_{0.32}La_{0.06}Ce_{0.14}Nd_{0.07})_{0.94}Al_{2.74}Fe_{0.21}2.95[(PO_4)_{1.4}(SO_4)_{0.6}](OH)_{5.6}$
- 3.4 —  $(Ca_{0.34}Sr_{0.44}Ce_{0.01})Al_{2.78}[(PO_4)_{0.93}(SO_4)_{1.07}](OH)_{5.0}$
- 3.5 —  $(Ca_{0.88}Sr_{0.07})_{0.95}Al_{2.95}[(PO_4)_{1.1}(SO_4)_{0.9}](OH)_{5.65}$
- 4.1 —  $(Ca_{0.07}Sr_{0.04}La_{0.12}Ce_{0.48}Nd_{0.16})_{0.87}Al_{2.84}[(PO_4)_{1.92}(SO_4)_{0.08}](OH)_{5.1}$
- 4.2 —  $(Ca_{0.26}Sr_{0.32}La_{0.07}Ce_{0.15}Nd_{0.08})_{0.88}Al_{2.65}Fe_{0.28}2.93[(PO_4)_{1.44}(SO_4)_{0.56}](OH)_{5.41}$
- 4.3 —  $(Ca_{0.39}Sr_{0.53})_{0.92}Al_{2.99}[(PO_4)_{1.1}(SO_4)_{0.9}](OH)_{5.71}$
- 4.4 —  $(Ca_{0.8}Sr_{0.16})_{0.96}Al_{2.98}[(PO_4)_{1.06}(SO_4)_{0.94}](OH)_{5.8}$
- 5.1 —  $(Ca_{0.27}Sr_{0.34}La_{0.07}Ce_{0.15}Nd_{0.04})_{0.87}Al_{2.93}[(PO_4)_{1.4}(SO_4)_{0.6}](OH)_{5.39}$
- 5.2 —  $(Ca_{0.31}Sr_{0.31}La_{0.04}Ce_{0.15}Nd_{0.08})_{0.89}Al_{2.9}[(PO_4)_{1.38}(SO_4)_{0.62}](OH)_{5.37}$
- 5.3 —  $(Ca_{0.5}Sr_{0.32}Ce_{0.06}Nd_{0.03})_{0.91}Al_{2.96}[(PO_4)_{1.19}(SO_4)_{0.81}](OH)_{5.6}$
- 5.4 —  $(Ca_{0.55}Sr_{0.33}Ce_{0.03})_{0.91}Al_{2.97}Fe_{0.01}2.98[(PO_4)_{1.11}(SO_4)_{0.89}](OH)_{5.68}$
- 5.5 —  $(Ca_{0.53}Sr_{0.36})_{0.89}Al_{2.96}Fe_{0.02}2.98[(PO_4)_{1.0}(SO_4)_{1.0}](OH)_{5.72}$
- 5.6 —  $(Ca_{0.86}Sr_{0.1})_{0.96}Al_{2.95}[(PO_4)_{1.07}(SO_4)_{0.93}](OH)_{5.7}$
- 6.1 —  $(Ca_{0.27}Sr_{0.45}La_{0.03}Ce_{0.05}Nd_{0.05})_{0.85}Al_{2.96}[(PO_4)_{1.32}(SO_4)_{0.68}](OH)_{5.39}$
- 6.2 —  $(Ca_{0.24}Sr_{0.49}Ce_{0.08}Nd_{0.05})_{0.86}Al_{2.97}[(PO_4)_{1.27}(SO_4)_{0.73}](OH)_{5.49}$
- 6.3 —  $Ca_{0.31}Sr_{0.53}Ce_{0.03}Nd_{0.03}0.9Al_{2.97}[(PO_4)_{1.19}(SO_4)_{0.81}](OH)_{5.58}$
- 6.4 —  $(Ca_{0.4}Sr_{0.51})_{0.91}Al_{2.99}[(PO_4)_{1.17}(SO_4)_{0.83}](OH)_{5.62}$

В пределах исследуемых гетерофазных зерен всегда имеется ядро величиной от  $5 \times 8$  до  $40-60$  мкм, отделенное резкой межфазовой границей от окружающей его оболочки. Объемные соотношения ядер с оболочками в изученных нами гетерофазных зернах колебались от 2 до 20 %, лишь изредка достигая 40—45 %. По составу ядра представлены Sr-Ca-содержащими флоренситами и REE-содержащими вудхаузент-сванбергитами, т. е. харттитам (по: Tavora, 1951). В флоренситах доля REE от суммы октаэдрических катионов в позициях R составляет 80—95, а в REE харттитах — 60—70 %. При этом атомное отношение Sr/Ca в ядрах колеблется от 0.1 до 0.71, достигая в среднем 0.25. Сульфат-фосфатная пропорция  $(SO_4/PO_4)$  здесь изменяется в узких пределах — от 0.04 до 0.16, определяясь в среднем как 0.07.

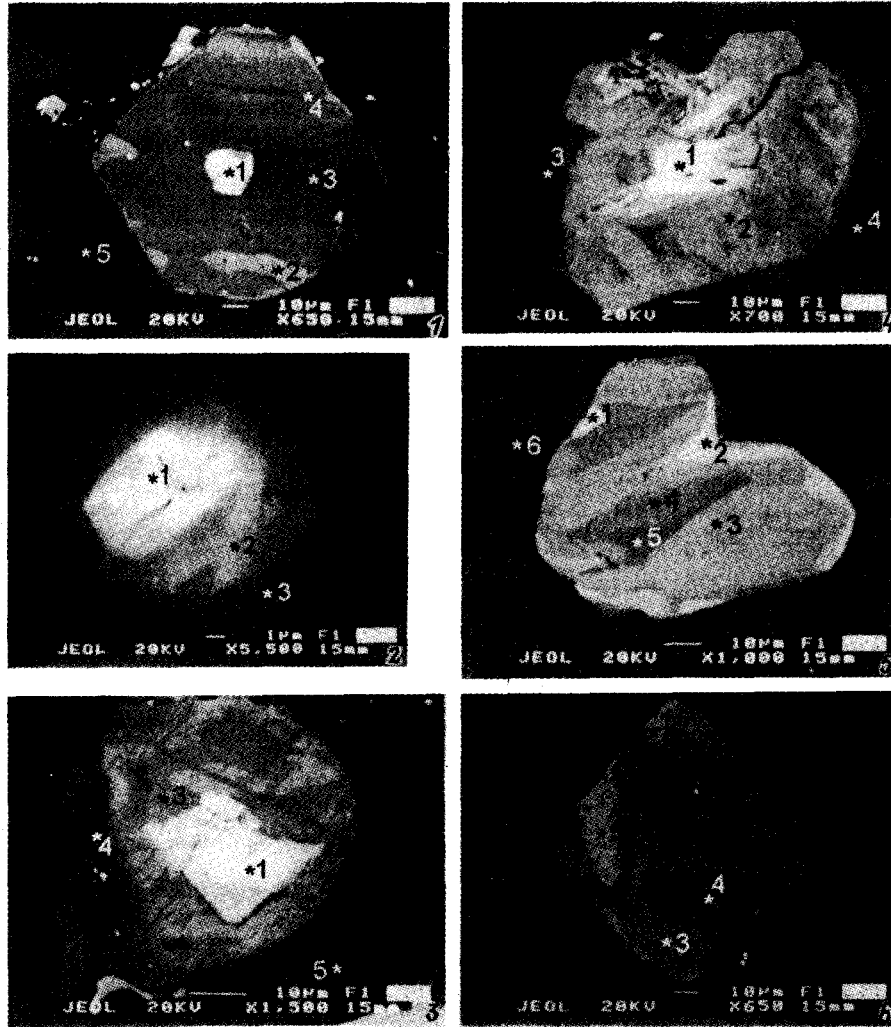


Рис. 2. Морфология и внутреннее строение гетерофазных (1—4) и гомофазных (5, 6) зерен алюминиевых сульфат-фосфатов.

Fig. 2. Morphology and internal structure of heterophase (1—4) and homophase (5, 6) grains of the aluminiferous sulfate-phosphates.

Оболочки в гетерофазных зернах сложены в основном REE-содержащими харттитами и характеризуются мозаичной или ламеллеводной неоднородностью состава. Доля REE от суммы катионов колеблется здесь в пределах 0—40 %, достигая в среднем 18 %. Стронциево-кальциевое отношение определяется интервалом 0.5—1.67 (в среднем — 0.93), а сульфат-фосфатная пропорция варьирует от 0.3 до 1.2, составляя в среднем 0.64.

Следует отметить, что описанная выше зональность гетерофазных зерен алюминиевых сульфат-фосфатов вообще не является единственно возможной. В литературе приведены факты находок подобных зерен и зерен с обратной последовательностью зон, т. е. харттитовыми ядрами и флоренситовыми оболочками (Ширяева и др., 1990).

Гомофазные неоднородные по составу выделения наблюдаются в ассоциации с гетерофазными. Они также представлены отдельными, субизометричными зернами, реже встречаются гломерообразные сростки. В некоторых случаях индивиды имеют, по-видимому, скаленоэдрический габитус (рис. 2). Размер гомофазных зерен изменяется от 15 × 25 до 85 × 90 мкм. В них так же, как и в оболочках гетерофазных зерен, фиксируется мозаичная, ламеллеводная, иногда секторальная неоднородность состава (рис. 2, 5—6). При этом размеры относительно однородных участков колеблются от 1 × 2 до 15 × 55 мкм. По составу гомофазные неоднородные зерна так же, как и оболочки гетерофазных выделений, сложены REE харттитами. В последних доля REE от суммы R-катионов варьирует в интервале 0—30 % (среднее — 14 %), а стронцие-

