

УДК 549.755.224

© Д. чл. И. В. ПЕКОВ,* д. чл. Р. А. ВИНОГРАДОВА,* Н. В. ЧУКАНОВ,** И. М. КУЛИКОВА***

О МАГНЕЗИАЛЬНЫХ И КОБАЛЬТОВЫХ АРСЕНАТАХ ГРУПП ФАЙРФИЛДИТА И РОЗЕЛИТА

I. V. PEKOV, R. A. VINOGRADOVA, N. V. CHUKANOV, I. M. KULIKOVA. ON MAGNESIAN
AND COBALT ARSENATES OF THE FAIRFIELDITE AND ROSELITE GROUPS

* Московский университет, геологический ф-т, 119899, Москва, Воробьевы горы

** Институт проблем химической физики РАН, 142432, Московская обл., п. Черноголовка

*** Институт минералогии, геохимии, кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ) РАН, 121357,
Москва, ул. Вересаева, 15

The newly obtained data on triclinic arsenates from the talmessite — roselite-beta series of the fairfieldite group have been generalized, together with previously published information about them, and compared with data on their monoclinic analogues—minerals—members of the roselite group. In the whole, there were studied minerals of the talmessite — roselite-beta series from ore deposits of Morocco (Bou-Azzer, Ambed-3, Irtem) and Ni-Co deposit Khovu-Aksy (Tuva, Russia), roselite and wendwilsonite from Co-Fe deposit Dashkesan (Azerbaijan). Reliable criteria for diagnostics of triclinic and monoclinic arsenates of these groups, in their mixtures also, have been elaborated on the base of analyzed experimental and theoretical X-ray powder diagrams. For the first time, IR spectroscopic study has been also carried out for these minerals. Chemical composition of arsenates of both groups shows the continuous isomorphism between roselite-beta and talmessite. The Ni-rich roselite-beta has been discovered for the first time. For magnesian and cobalt-bearing arsenates of fairfieldite and roselite groups questions of their genesis are discussed.

Арсенаты групп розелита и файрфилдита имеют общую формулу $Ca_2M^{2+}(AsO_4)_2 \cdot 2H_2O$, где M^{2+} — Co, Mg, Mn, Zn. Группа розелита объединяет моноклинные розелит, вэндвилсонит (уэндуилсонит), брандтит и цинкрозелит, группа файрфилдита — триклинные розелит-бета, талмессит, парабрандтит и гейтит (табл. 1). Таким образом, мы видим четыре пары диморфных соединений. Кобальтовые и магниевые представители встречаются на целом ряде месторождений, остальные минералы очень редки. Арсенаты обеих групп, особенно триклинные, изучены недостаточно, определенную сложность представляет их диагностика. Для некоторых из них известны только старые анализы, выполненные методами мокрой химии, ИК-спектроскопические данные по большинству их этих минералов отсутствуют, развернутый сравнительный анализ моноклинных и триклинных арсенатов групп файрфилдита и розелита не проводился. Эти очевидные пробелы и побудили нас к выполнению данной работы, в которой сделана попытка обобщить опубликованные сведения по арсенатам серии талмессит—розелит-бета и, дополнив эти материалы новыми данными, охарактеризовать триклинные минералы в сравнении с их моноклинными аналогами, предложить надежные критерии диагностики представителей обеих групп. В какой-то мере интересным представляется и описание новых находок магниевых и кобальтовых членов групп файрфилдита и розелита.

История исследования. Из восьми арсенатов групп файрфилдита и розелита два моноклинных минерала известны с прошлого века — это розелит, первое описание которого датировано 1824 г., и брандтит, открытый в 1888 г. (Дэна и др., 1954). В 1955 г. К. Фрондель охарактеризовал первый триклинный арсенат, принадлежащий

Таблица 1

Сравнительная характеристика арсенатов групп розелита и фэйрфилдита
Comparative characteristics of arsenates from the roselite and fairfieldite groups

Характеристика	Группа розелита				Группа фэйрфилдита			
	Моноклинная, $P2_1/c$, $Z=2$				Триклинная, $P-1$, $Z=1$			
Симметрия, Z								
Минерал Формула	Розелит $\text{Ca}_2\text{Co}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Вендвилсонит $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Брандтит $\text{Ca}_2\text{Mn}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Цинкрозелит $\text{Ca}_2\text{Zn}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Розелит-бета $\text{Ca}_2\text{Co}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Талмессит $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Парабрандтит $\text{Ca}_2\text{Mn}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Гейтит* $\text{Ca}_2\text{Zn}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Параметры элементарной ячейки								
a , Å	5.801	5.806	5.899	5.832	5.87	5.91	5.89	5.90
b , Å	12.989	12.912	12.968	12.889	6.97	6.99	7.03	7.61
c , Å	5.617	5.623	5.684	5.644	5.52	5.56	5.64	5.57
α , град					97.4	97.3	96.77	111.67
β , град	107.42	107.40	108.05	107.72	108.6	108.8	109.32	70.83
γ , град					108.1	108.2	108.47	119.47
Оптические свойства								
N_p	1.725	1.694	1.709	1.707	1.723	1.672—1.675	1.701	1.713
N_m	1.728	1.703	1.711	1.710	1.737	1.685—1.688	1.721	1.730
N_z	1.735	1.717	1.724	1.720	1.756	1.698—1.704	1.751	1.730
$2V$, град	+60	+87	+23	+50	+80—90	± 90	+80	+88
Окраска	Красный до розового	Розовый до красного	Бесцветный до белого	Бесцветный	Розовый до красного	Бесцветный белый, розовый, светло-зеленый	Бесцветный	Белый до бесцветного
Местонахождение**	<i>Шнееберг, Германия; Молвиза, Испания; Дашкесан, Азербайджан и др.</i>	<i>Стерлинг Хилл, Нью Джерси, США; Бу-Аззер, Марокко; Коауила, Мексика; Дашкесан, Азербайджан</i>	<i>Харстиг и Лонгбан, Швеция; Стерлинг Хилл, Нью-Джерси, США; Шнееберг, Германия и др.</i>	<i>Цумб, Намибия</i>	<i>Шнееберг, Германия; Бу-Аззер и Амбел-3, Марокко; другие находки требуют подтверждения</i>	<i>Хоу-Аксы, Тува; Талмесси, Иран; м-ния района Бу-Аззер, Марокко и др.</i>	<i>Стерлинг Хилл, Нью-Джерси, США</i>	<i>Цумб, Намибия</i>
Основные источники	Дэна и др., 1954; Nawotme, Ferguson, 1977 г.; Dana's., 1997; наши данные	Dunn e. a., 19876; наши данные	Дэна и др., 1954; Dana's., 1997	Keller e. a., 1986	FrondeI, 1955; наши данные	Яхонтова, Сидоренко, 1956; Bariant, Herpin, 1960; Pietrot, 1964; наши данные	Dunn e. a., 1987a	Sturman, Dunn, 1980

Примечание. Параметры элементарной ячейки для розелита-бета и талмессита приведены в соответствии с нашими данными (ан. 2 и 5 соответственно в табл. 5); * — элементарная ячейка для гейтита выбрана в оригинальном описании (Sturman, Dunn, 1980) иначе, чем для остальных арсенатов группы фэйрфилдита; ** — курсивом даны первоначальные местонахождения.

Таблица 2

Химический состав (мас. %) розелита-бета и талмессита (литературные данные)
 Chemical composition (wt %) of roselite-beta and talmessite (after published data)

Компо- нент	Анализ образца								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CaO	26.29	27.20	28.11	26.08	26.97	29.5	26.7	27.3	26.6
MgO	0.92	9.39	10.53	9.07	8.81	7.5	9.5	8.6	4.9
FeO	0.32	—	—	—	—	—	—	—	—
CoO	13.28	0.00	0.64	Следы	—	—	—	8.6	0.3
NiO	1.43	0.00	0.00	0.75	—	0.8	—	—	7.3
As ₂ O ₅	49.66	52.51	50.91	51.85	54.76	47.7	54.9	55.9	51.3
H ₂ O ⁺	8.41	7.93	7.75	8.18	9.55	6.70	—	—	8.2
F	—	1.12	1.08	1.38	—	—	—	—	—
-O=F ₂	—	-0.47	-0.46	-0.58	—	—	—	—	—
Сумма	100.31	99.76*	100.58*	100.24*	100.09	95.4*	91.3*	100.4**	99.6*

Примечание. Ан. 1 — розелит-бета; 2—9 — талмессит; ан. 7 выполнен электронно-зондовым методом, остальные — методами мокрой химии; ан. 1 — Шнееберг, Германия (FrondeI, 1955); ан. 2—5 — Хову-Аксы, Тува (ан. 2—4 — Яхонтова, Сидоренко, 1956; ан. 5 — Pietrot, 1964; образец Е. И. Нефедова); ан. 6, 7 — Талмессит, Иран (6 — Variand, Herpin, 1960); 7 — Pietrot, 1964); ан. 8, 9 — Агбар, рудный район Бу-Аззер, Марокко (8 — Variand, Herpin, 1960); 9 — Cesbron e. a., 1972); * — в сумму анализа входят также (мас. %): SrO 0.2 (ан. 7); BaO 3.2 (ан. 6); MnO 0.03 (ан. 2); Al₂O₃ 0.44 (ан. 2), 0.12 (ан. 3), 1.83 (ан. 4); Fe₂O₃ 0.21 (ан. 2), 0.91 (ан. 4); SiO₂ 0.14 (ан. 2), 0.08 (ан. 3), 0.33 (ан. 4); CO₂ 1.0 (ан. 9); H₂O 1.26 (ан. 2), 1.82 (ан. 3), 0.44 (ан. 4); ** — по данным анализа обезвоженной пробы. Прочерк означает, что в оригинальной работе сведений о содержании данного компонента не приводится.

к структурному типу файрфилдита, — розелит-бета (FrondeI, 1955). В 50-х годах развернулась и сложная история идентификации и изучения талмессита. Остальные четыре арсената из этих групп описаны в 80-х годах (табл. 1).

Розелит-бета был открыт в Шнееберге, Саксония, Германия (FrondeI, 1955). Позже он кратко описывался в рудном районе Бу-Аззер в Марокко: в жиле 7 месторождения Бу-Аззер (Permingeat, 1956) и в месторождении Агбар (Gaufrey, de Trey, 1963), но, как справедливо замечает Ж. Палли, обе находки не подтверждены определениями состава и вполне могут относиться к кобальтистой разновидности талмессита (Pallix, 1978). Это же касается и упоминаний о находках розелита-бета в Кокимбо, Чили (Variand, Herpin, 1960) и Цумебе, Намибия (Gebhard, 1991). В месторождении Хову-Аксы в Туве отмечен розелит-бета с 10.5 % CoO и 2.65 % MgO (Боришанская и др., 1981). Однако химический состав, приведенный в первоначальном описании розелита-бета (FrondeI, 1955), до сих пор оставался единственным опубликованным для этого минерала.

Минерал, позже названный талмесситом, впервые был описан как «беловит» в 1953 г. Е. И. Нефедовым, обнаружившим его в зоне окисления месторождения Хову-Аксы. В кратком сообщении (Нефедов, Мокиевский, 1953) были приведены только идеализированная формула Ca₂Mg(AsO₄)₂ · 2H₂O, физические свойства и оптические константы. По сходству типа химической формулы Е. И. Нефедов включил свой новый минерал в группу розелита — вместе с розелитом и брендтитом. Годом позже была опубликована статья Л. С. Бородина и М. Е. Казаковой (1954) о новом REE-Na-Sr-фосфате из группы апатита, который эти исследователи независимо тоже назвали беловитом. В 1956 г. Л. К. Яхонтова и Г. А. Сидоренко, подробно изучившие минерал Е. И. Нефедова из Хову-Аксы, предложили называть его «арсенат-беловитом», чтобы отделять от «фосфат-беловита» Л. С. Бородина и М. Е. Казаковой. Для «арсенат-беловита» приведены три химических анализа (табл. 2), порошковая диаграмма без индексов *hkl*, термические и оптические данные (Яхонтова, Сидоренко, 1956). Позже Л. К. Яхонтова (1968) дала и генетическую характеристику минерала из Хову-Аксы.

В 1960 г. П. Барриан и П. Херпин описали новый минеральный вид из месторождения Талмессии в Центральном Иране, назвав его талмесситом. Эти исследователи определили триклинную симметрию своего минерала, проиндицировали рентгенограмму, вычислили параметры элементарной ячейки и указали на то, что он изоструктурен с розелитом-бета. Опираясь на приведенный здесь же анализ высококобальтистой разновидности талмессита из Бу-Аззера, они предположили существование изоморфного ряда между новым минералом и розелитом-бета (Barriand, Herpin, 1960). В 1964 г. Р. Пьерро, переизучив «арсенат-беловит» из Хову-Аксы, талмессит из Талмессии, розелит-бета из Шнееберга и розелит из Бу-Аззера, показал, что «арсенат-беловит» и талмессит являются одним и тем же минералом, изоструктурным розелиту-бета, а не розелиту, как это предполагал Е. И. Нефедов (Pierrot, 1964). Решением Комиссии по новым минералам и названиям минералов ММА за триклинным арсенатом состава $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ было закреплено название талмессит, а термин «беловит» — за REE-Ba-Sr-фосфатом из группы апатита, открытым Л. С. Бородиным и М. Е. Казаковой. Позже талмессит был установлен и в ряде других месторождений (Bonnicci, Pierrot, 1965; Cesbron e. a., 1972; Лузгин, 1975; Feraud e. a., 1976; Dana's..., 1997). Кристаллическая структура талмессита решена для высококобальтистой разновидности на образце П. Барриана и П. Херпина из Бу-Аззера (Catti e. a., 1977) (см. ан. 8 в табл. 2), структура розелита-бета не исследовалась.

Новый материал. Нами детально изучены минералы ряда талмессит—розелит-бета из трех никель-кобальтовых месторождений рудного района Бу-Аззер в Марокко (жила 2 Восточная месторождения Бу-Аззер, Амбед-3, Иртем), проведено ревизионное исследование талмессита из Хову-Аксы, а также кратко охарактеризованы розелит и вендвилсонит из зоны окисления кобальтоносных скарнов Дашкесана, Азербайджан. В образцах из Марокко установлен практически весь ряд составов от талмессита до розелита-бета (табл. 3).

Материал из жилы 2 Восточной месторождения Бу-Аззер, любезно предоставленный Б. В. Образцовым (обр. 1, 2, 2/1 и 3), — это штуфы массивного крупнозернистого розовато-кремового жильного доломита состава $\text{Ca}_{0.99}(\text{Mg}_{0.96}\text{Mn}_{0.03}\text{Fe}_{0.02})_{1.01}(\text{CO}_3)_2$, содержащего вкрапленность скуттерудита и сафлорита и множество каверн, стенки которых выстланы щетками доломита, реже кварца. В этих полостях развит комплекс гипергенных минералов, самыми ранними из которых являются оксиды — гематит и гетерогенит, а уже на них нарастают арсенаты. Среди последних наиболее распространен бурый охристый минерал типа смольяниновита, нередко ярко-вишневый эритрин, а самыми поздними являются члены серии талмессит—розелит-бета: они нарастают на все перечисленные минералы. В четырех изученных образцах арсенаты группы фэйрфилдита различаются по окраске, но практически идентичны по формам обособления и размерам индивидов. Обычно они дают сплошные параллельно-шестоватые и сферолитовые корки, сложенные упрощенно-призматическими кристаллами до 0.5 мм, реже до 1 мм, нередко расщепленными. Реже встречаются отдельные кристаллы такого же размера, имеющие призматический, таблитчатый или клиновидный облик, их сростки (рис. 1, а), пучки, сферолиты диаметром до 2 мм. Талмессит и розелит-бета водяно-прозрачные, со стекляннм блеском; хорошо видна совершенная спайность. В обр. 1 минерал вишневый до бледно-розового, в обр. 2 — розовый, в обр. 2/1 — бесцветный. В обр. 3 обнаружены три разноокрашенные разновидности — бесцветная, розовая и яркая вишнево-красная, причем в некоторых корках наблюдается зональность: в основании лежит густоокрашенная зона, промежуточные части кристаллов розовые, а периферические — бесцветные (см. табл. 3).

В обр. 3/11 из месторождения Амбед-3 скопления розелита-бета до 1 см в поперечнике, ассоциирующие с агрегатами гетерогенита, аннабергита и минерала типа смольяниновита, находятся среди частично оталькованного серпентинита. Некоторые каверны целиком заполнены мелкозернистым агрегатом розелита-бета, в других этот минерал выстилает стенки и слагает перегородки, поверхность которых представляет собой щеточки призматических кристаллов, достигающих 0.05—0.1 мм в

Таблица 3

Химический состав (мас. %) Mg-Co-арсенатов групп фэйрфилдита и розелита (наши данные)
 Chemical composition of Mg-Co-arsenates of the fairfieldite and roselite and roselite groups (our data)

Компо- нент	Анализ образца																	
	1		2				2/1	3				3/1			4	Х-А	Д	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
CaO	25.34	26.18	26.77	26.84	26.04	25.96	26.31	24.32	26.14	26.39	26.33	24.86	24.00	25.70	26.66	24.98	26.46	
MgO	4.99	6.88	7.07	4.61	8.86	5.26	8.67	1.00	7.44	9.29	2.12	0.57	2.59	6.86	9.40	3.32	8.31	
MnO	0.30	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.19	Н. о.	Н. о.	0.02	0.32	Н. о.	Н. о.	0.09	Н. о.	Н. о.	Н. о.	
FeO	0.05	0.06	0.05	0.13	» »	» »	0.03	» »	» »	Н. о.	Н. о.	» »	» »	0.81	» »	0.03	0.01	
CoO	6.15	3.54	2.16	6.55	1.16	5.45	0.37	13.13	2.77	0.06	9.61	8.80	8.11	3.66	0.01	10.22	2.24	
NiO	0.93	0.63	0.66	1.23	0.67	1.35	0.57	0.72	0.58	0.15	1.96	5.96	3.75	0.33	Н. о.	0.09	0.03	
ZnO	Н. о.	0.01	0.02	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.03	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	Н. о.	0.06	0.01	Н. о.	Н. о.	
As ₂ O ₅	51.95	52.58	51.59	51.12	52.72	51.78	53.55	49.77	52.71	53.57	50.50	49.93	50.24	53.32	54.99	51.68	53.55	
Сумма	89.71	89.88	88.32	90.48	89.45	89.80	89.72	88.94	89.64	89.48	90.84	89.85	88.69	90.83	91.07	90.32	90.60	
Формульные коэффициенты, расчет на 2 атома As																		
Ca	2.01	2.03	2.13	2.15	2.02	2.13	2.01	2.00	2.03	2.02	2.14	2.04	1.96	1.99	2.00	2.00	2.02	
Mg	0.55	0.74	0.78	0.51	0.95	0.58	0.92	0.11	0.80	0.98	0.24	0.07	0.29	0.73	0.98	0.37	0.88	
Mn	0.02	—	—	—	—	—	0.01	—	—	—	0.02	—	—	—	—	—	—	
Co	0.36	0.21	0.13	0.39	0.07	0.32	0.02	0.81	0.16	—	0.58	0.54	0.49	0.21	—	0.60	0.13	
Ni	0.06	0.04	0.04	0.07	0.04	0.08	0.03	0.05	0.03	0.01	0.12	0.35	0.23	0.02	—	—	—	
ΣM	0.99	0.99	0.95	0.97	1.06	0.98	0.98	0.97	0.99	0.99	0.96	0.96	1.01	1.01*	0.98	0.97	1.01	
Цвет минерала																		
	Виш- не- вый	Блед- но- розо- вый	Розо- вый	Розо- вый	Розо- вый	Розо- вый	Бесцв.	Крас- ный	Розо- вый	Бесцв.	Ярко- розо- вый	Блед- но-ро- зовый	Блед- но-ро- зовый	Розо- вый	Белый	Розо- вый	Бесцв.	

Примечание. Ан. 1—15 — минералы ряда талмессит—розелит-бета; ан. 16 — розелит; ан. 17 — вендвилсонит; обр. 1, 2, 2/1, 3 — жила 2 Восточная, Бу-Аззер; обр. 3/11 — Амбед-3; обр. 44 — Иртем (все — рудный район Бу-Аззер, Марокко); обр. Х-А — Хову-Аксы, Тува; Д — Дашкесан, Азербайджан; ΣM = Mg+Mn+Co+Ni; * — в сумму входит также 0.05 форм. ед. Fe; н. о. — компонент не обнаружен.

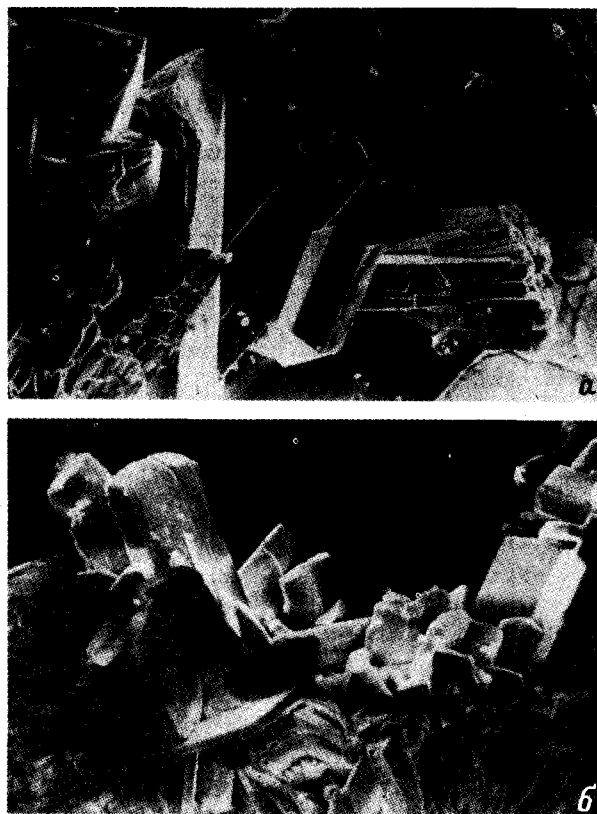


Рис. 1. Сrostки кристаллов минералов ряда талмессит—розелит-бета из месторождений Марокко (РЭМ-фото).

a — талмессит, жила 2 Восточная месторождения Бу-Аззер (обр. 2/1), увел. 100; *б* — розелит-бета. Амбед-3 (хорошо видны двойники, обр. 3/11), увел. 200.

Fig. 1. Crystal growths of minerals of talmassite—roselite-beta series from Morocco (SEM-photo).

длину (рис. 1, *б*). Минерал прозрачный или полупрозрачный, бледно-розовый до ярко-розового.

В обр. 44 из месторождения Иртем корочки Со-содержащего талмессита инкрустируют стенки мелких полостей непосредственно в агрегатах массивного скуттерудита. Особенно много талмессита в кавернах на контакте скуттерудитовой руды с мелкозернистым жильным доломитом. В состав гипергенной ассоциации входят также гетерогенит, эритрин, бурый охристый Со-арсенат. Талмессит образует корочки, состоящие из мелких (до 0.5 мм) сферолитов, в некоторых полостях развиваются его «ящичные» агрегаты. Минерал окрашен в разные тона розового цвета — от почти белого до лососевого и ярко-розового с фиолетовым оттенком.

В обр. X-A из Хову-Аксы, любезно предоставленном Л. К. Яхонтовой, прожилки белого талмессита секут карбонатную матрицу с гнездами арсенатов, заместивших Fe-Co-Ni-арсениды. В полостях наблюдаются почки талмессита диаметром до 5 мм. Фотография этого штуфа приведена на рис. 4 в статье Л. К. Яхонтовой (1968).

Представители моноклинного ряда розелит—вендвилсонит установлены в материале из Верхне-Дашкесанского месторождения в Азербайджане (обр. Д). Скопления гипергенных кобальтовых минералов наблюдаются здесь вместе с кальцитом и гипсом в трещине магнетитового скарна. Розовые до бесцветных корочки розелита—вендвилсонита, состоящие из сферолитов до 0.5 мм в диаметре, нарастают на агрегаты эритрина и смольяниновита и ассоциируют со сферокобальтитом.

Диагностические рефлексы порошковых рентгенограмм Mg-Co-арсенатов групп фэйрфилдита и розелита

Diagnostic reflections in X-ray powder diagrams of Mg-Co-arsenates from the fairfieldite and roselite groups

Анализ									
1		2		3		4		5	
<i>I</i>	<i>d</i> , Å	<i>I</i>	<i>d</i> , Å	<i>I</i>	<i>d</i> , Å	<i>I</i>	<i>d</i> , Å	<i>I</i>	<i>d</i> , Å
—	—	17	4.95	—	—	10	4.95	—	—
28	4.60	—	—	9	4.639	—	—	6	4.619
—	—	12	4.33	—	—	10	4.34	—	—
—	—	9	4.20	—	—	10	4.20	2	4.193
13	3.94	—	—	6	3.972	—	—	4	3.957
—	—	19	3.74	—	—	15	3.75	—	—
38	3.56*	—	—	19	3.587	—	—	22	3.569
31	3.56*	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	31	3.40	—	—	35	3.40	6	3.387
100	3.08**	—	—	25	3.088	—	—	30	3.075
33	3.07**	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	100	2.99	—	—	100	2.99	10	2.993

Примечание. Ан. 1 — фрагмент теоретической рентгенограммы кобальтсодержащего талмессита, рассчитанной нами из структурных данных (Catti e. a., 1977) для состава $\text{Ca}_2(\text{Mg}_{0.65}\text{Co}_{0.35})(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; ан. 2 — фрагмент теоретической рентгенограммы высокомагнезильного розелита, рассчитанной нами из структурных данных (Hawtorne, Ferguson, 1977) для состава $\text{Ca}_2(\text{Co}_{0.515}\text{Mg}_{485})(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; ан. 3 — фрагмент дифрактограммы талмессита из Хову-Аксы, Тува (наши данные), обр. X-A); ан. 4 — фрагмент дифрактограммы розелита из Шнееберга, Германия (Hawtorne, Ferguson, 1977); ан. 5 — фрагмент дифрактограммы образца кобальтсодержащего талмессита, содержащего вставки моноклинного минерала ряда розелит—вендвисонит, из Бу-Аззера, Марокко (наши данные, обр. 3); *, ** — пары рефлексов, которые на экспериментальных порошкограммах, как правило, сливаются в одну линию.

Рентгеновские данные. Порошковые рентгенограммы арсенатов групп фэйрфилдита и розелита, в том числе кобальтовых и магнезильных, приведены во многих работах (Яхонтова, Сидоренко, 1956; Variand, Herpin, 1960; Pierrot, 1964; Hawtorne, Ferguson, 1977; Dunn e. a., 1987). Расшифрованы и кристаллические структуры некоторых представителей групп фэйрфилдита и розелита, в том числе талмессита (Catti e. a., 1977) и розелита (Мустафаев и др., 1964; Hawtorne, Ferguson, 1977).

Между собой порошкограммы моноклинных и триклинных минералов различаются, и на этом основании можно уверенно отнести исследуемый арсенат к одной из групп. Однако здесь приходится сталкиваться с рядом затруднений, которые вызваны следующими обстоятельствами: 1) низкой симметрией, приводящей к появлению большого числа отражений; 2) присутствием ряда общих черт в рентгеновских картинах моноклинных и триклинных минералов, а также заметным перераспределением интенсивностей рефлексов от образца к образцу; 3) нередко встречающимися микрорастаниями диморфных моноклинных и триклинных минералов.

Важной задачей приведенного нами рентгеновского исследования явилось установление надежных критериев отнесения минерала к одной из двух групп. На основе наборов координат атомов, опубликованных для талмессита (Catti e. a., 1977) и розелита (Hawtorne, Ferguson, 1977) — представителей разных структурных типов, — нами рассчитаны теоретические рентгенограммы и проведено их сопоставление как между собой, так и с экспериментальными рентгенограммами (литературными и нашими) арсенатов обеих групп. Сравнительный анализ позволил выявить для каждой группы набор надежных диагностических отражений (табл. 4). Выбранные рефлексы отвечают следующим требованиям: 1) достаточно высокая и устойчи-

вая интенсивность; 2) отсутствие поблизости отражений диморфного минерала. Все эти рефлексы лежат в интервале от 5.0 до 2.9 Å. Диагностика по отражениям с меньшими значениями межплоскостных расстояний представляется ненадежной из-за множественных перекрытий линий моноклинных и триклинных минералов. Анализ литературных данных показывает, что предположенные наборы рефлексов можно с соответствующими поправками на сдвиги величин d/n , вызываемые катионным изоморфизмом, использовать для определения симметрии не только магнетитовых и кобальтовых, но и других арсенатов групп фэйрфилдита и розелита.

Рентгеновское исследование нашего материала из месторождений Марокко показало, что в обр. 1, 2, 2/1 и 44 арсенаты представлены только триклинными минералами, а в обр. 3 и 3/11 наряду с преобладающими триклинными присутствуют и моноклинные минералы (табл. 5).

Инфракрасная спектроскопия. Ни в одной из работ, посвященных арсенатам групп фэйрфилдита и розелита, не приведено данных по ИК-спектроскопии. Между тем наши исследования показывают, что для определения симметрии этих минералов ИК-спектроскопический метод не менее эффективен, чем рентгеновский. На рис. 2 и в табл. 6 видно, что ИК-спектры моноклинных и триклинных арсенатов образуют две обособленные группы. Наиболее наглядно различия между арсенатами групп фэйрфилдита и розелита проявлены в областях валентных и деформационных колебаний AsO_2 -тетраэдров — 780—1000 и 400—500 cm^{-1} соответственно. В обеих областях ИК-спектры моноклинных минералов отличаются более сложной картиной расщеплений полос (рис. 2, табл. 6). Так, на месте одиночного интенсивного максимума при 430—435 cm^{-1} , наблюдаемого у минералов ряда талмессит—розелит-бета, спектры моноклинных аналогов содержат хорошо разрешенный триплет. Различаются минералы этих двух групп и по положению главных полос поглощения в области валентных колебаний молекул H_2O — 2800—3700 cm^{-1} (табл. 6).

В ИК-спектрах талмессита и розелита-бета присутствуют сильные полосы O—H-валентных (2880—2940 cm^{-1}) и деформационных (1530—1540 cm^{-1}) колебаний молекул воды, образующих весьма прочные водородные связи, и слабые полосы, отвечающие еще более прочным водородным связям, образуемым кислотными группами As—OH (2270—2450 cm^{-1}). Можно предположить существование в этих минералах равновесия $H—O—H^{+\delta} \dots O—AsO_3 \leftrightarrow HO \dots HO—AsO_3$. В ИК-спектре розелита в области O—H-валентных колебаний наблюдаются только полосы с частотами выше 3000 cm^{-1} , относящиеся к относительно слабым водородным связям. В ИК-спектрах арсенатов группы фэйрфилдита интенсивность полосы As—O-валентных колебаний при 868 cm^{-1} положительно коррелирует с содержанием кобальта: для Co-содержащего талмессита наблюдается лишь плечо при 870 cm^{-1} , а в спектре чистого талмессита эта полоса не наблюдается вовсе.

Химический состав наших образцов изучен с помощью электронно-зондового микроанализатора Camebax micro beam, результаты приведены в табл. 3. Кратко охарактеризуем основные особенности состава исследованных арсенатов.

1. Все эти минералы имеют устойчивую стехиометрию. Соотношения катионов в них таковы: $Ca : \Sigma(Mg + Mn + Fe + Co + Ni) : As \approx 2 : 1 : 2$. Дефицит суммы анализов варьирует от 0 до 11 мас.%. Прямое определение содержания воды (метод Пенфильда, аналитик С. П. Пурусова) для обр. 3 (усредненная проба, включавшая разноокрашенные кристаллы) показало цифру 8.6 мас.%, что приблизительно соответствует 2.1 H_2O при расчете формулы на два атома мышьяка. Фосфор, ванадий, хлор и фтор не обнаружены.

2. Среди мелких двухвалентных катионов (изоморфные Mg, Co, Ni, Mn, Fe, Zn) видообразующими являются Mg и Co, иногда наблюдается существенная примесь Ni, а содержания Mn, Fe и Zn во всех образцах весьма малы, или же эти компоненты не обнаруживаются вовсе. Соотношение Mg и Co колеблется в очень широких пределах.

Суммируя химические, рентгеновские и ИК-спектроскопические данные, можно сделать вывод, что марокканские образцы сложены минералами серии талмессит—розелит-бета (иногда с вростками моноклинных минералов), образец из Хову-Аксы

Таблица 5

Результаты расчета порошковых рентгенограмм и параметры элементарных ячеек минералов
ряда талмессит—розелит-бета

X-ray powder data and unit cell parameters of minerals of the talmessite—roselite-beta series

Анализ										
1		2		3		4		5		hkl
I	d, Å	I	d, Å	I	d, Å	I	d, Å	I	d, Å	
2	6.40	22	6.41	21	6.41	13	6.43	20	6.386	010
1	5.66*			6	5.14			11	5.160	100
3	5.12	100	5.06	21	5.06	11	5.09	32	5.076	001
								39	5.040	1 $\bar{1}$ 0
1	4.68	7	4.62	6	4.62	9	4.64	28	4.603	10 $\bar{1}$
								8	4.574	01 $\bar{1}$
				2	4.193**					
4	3.98	4	3.949	4	3.957	6	3.972	13	3.936	1 $\bar{1}$ $\bar{1}$
6	3.59	26	3.569	22	3.569	19	3.587	38	3.561	011
								31	3.560	11 $\bar{1}$
		4	3.425	4	3.436	4	3.447	5	3.435	110
						6	3.387**			
3	3.38	63	3.344	40	3.344	23	3.345	42	3.329	1 $\bar{2}$ 0
		8	3.303					10	3.300	1 $\bar{1}$ 1
4	3.22	48	3.204	100	3.204	100	3.213	58	3.193	020
				3	3.138**					
9	3.08	40	3.079	30	3.075	25	3.088	100	3.078	101
								33	3.074	02 $\bar{1}$
		5	2.993**	10	2.993**					
		26	2.814	20	2.814	16	2.814	5	2.824	2 $\bar{1}$ $\bar{1}$
								52	2.805	1 $\bar{2}$ 1
								8	2.781	2 $\bar{1}$ 0
10	2.75	47	2.774	37	2.774	39	2.785	74	2.766	20 $\bar{1}$
		15	2.739	15	2.739	12	2.749	36	2.764	1 $\bar{2}$ $\bar{1}$
								62	2.727	10 $\bar{2}$
2	2.61	7	2.605	12	2.592	5	2.586	20	2.593	01 $\bar{2}$
		11	2.580					18	2.580	200
		5	2.529	1	2.544			3	2.538	002
1	2.52	7	2.515	7	2.515	8	2.521	13	2.503	12 $\bar{1}$
1	2.45	10	2.445	7	2.442	7	2.450	18	2.432	2 $\bar{2}$ $\bar{1}$
		3	2.354	2	2.359	2	2.359	3	2.350	120
1	2.33	5	2.327	4	2.329	5	2.339	13	2.324	21 $\bar{1}$
		5	2.305	6	2.305	3	2.310	3	2.294	1 $\bar{3}$ 0
1	2.13	5	2.165	6	2.165	9	2.171	27	2.153	12 $\bar{2}$
		3	2.130	1	2.136	2	2.142	3	2.131	210
		4	2.118	3	2.098			3	2.115	2 $\bar{2}$ 1
2	2.08	23	2.073	9	2.073	5	2.075	15	2.064	2 $\bar{3}$ 0
		5	2.022	6	2.026	7	2.026	12	2.034	1 $\bar{3}$ 1
1	2.02	3	2.010	5	2.011	5	2.015	9	2.015	1 $\bar{3}$ $\bar{1}$
								18	2.003	1 $\bar{2}$ $\bar{2}$
								4	1.968	2 $\bar{2}$ $\bar{2}$
4	1.89	10	1.891	9	1.891	9	1.894	21	1.890	121
								5	1.882	3 $\bar{2}$ $\bar{1}$
1	1.87	5	1.865	5	1.867	7	1.871	15	1.862	22 $\bar{1}$
								3	1.828	10 $\bar{3}$
		9	1.830	5	1.828	2	1.835	10	1.826	3 $\bar{2}$ 0
		4	1.805	3	1.801	3	1.802	10	1.795	1 $\bar{3}$ 2

Таблица 5 (продолжение)

1		2		3		4		5		hkl		
I	d, Å	I	d, Å	I	d, Å	I	d, Å	I	d, Å			
4	1.71	4	1.786	5	1.785	4	1.792	12	1.781	022		
		15	1.718	10	1.719	7	1.722	5	1.780	222		
		6	1.701	9	1.714	8	1.714	3	1.773	302		
				9	1.709	9	1.717	18	1.720	300		
3	1.70	4	1.688	7	1.696	1	1.636	9	1.709	220		
				15	1.703			15	1.703	3 2 2		
		22	1.692	22	1.692			141				
		8	1.691	8	1.691			123				
1	1.60	5	1.604	10	1.605	7	1.607	5	1.650	023		
		5	1.583	8	1.583	7	1.585	5	1.623	222		
		3	1.539	3	1.543	2	1.548	8	1.597	312		
		3	1.537	3	1.537	2	1.540	6	1.591	6	1.574	040
										16	1.574	321
		6	1.534	4	1.534	4	1.534	7	1.539	6	1.543	2 4 1
										6	1.534	223
		5	1.529	4	1.521	2	1.518	2	1.499	7	1.539	202
						5	1.529	5	1.518	6	1.534	303
		5	1.518	4	1.521	1	1.497	1	1.484	4	1.534	2 2 3
						2.5	1.499			5	1.529	3 3 2
		2	1.487	5	1.484	3	1.484	4	1.484	5	1.518	331
2	1.487					2	1.499			1 2 3		
4	1.478	2	1.463	4	1.461	4	1.484	4	1.480	232		
								2	1.463	4	1.478	122
2	1.460	5	1.463	4	1.461	5	1.458	4	1.478	340		
				2	1.460			2	1.463	221		
5	1.458	2	1.454	2	1.454	5	1.460	2	1.460	032		
				5	1.458			5	1.458	4 2 1		
5	1.444	2	1.432	4	1.432	5	1.455	5	1.455	4 1 1		
								2	1.444	2	1.444	3 2 3
9	1.428	2	1.432	4	1.432	5	1.428	5	1.428	322		
								9	1.424	9	1.424	142
3	1.412	3	1.409	4	1.408	3	1.412	3	1.412	4 2 2		
								13	1.402	13	1.402	242

Параметры триклинной ячейки

a, Å	5.87(3)	5.87(2)	5.88(1)	5.91(2)	5.874(7)
b, Å	7.01(3)	6.97(3)	6.97(2)	6.99(3)	6.943(11)
c, Å	5.55(3)	5.52(2)	5.54(1)	5.56(2)	5.537(6)
α, град	97.0(2)	97.4(1)	97.4(1)	97.3(1)	97.3(1)
β, град	108.7(2)	108.6(1)	108.9(1)	108.8(1)	108.7(1)
γ, град	108.6(1)	108.1(1)	108.1(1)	108.2(1)	108.1(2)
V, Å ³	198.8	197.0	197.6	199.7	196.8

Примечание. Ан. 1 — розелит-бета, Шнееберг, Германия: дебаграмма, Fe-антикатод (Frondel, 1955); ан. 2—4 — наши данные (дифрактометр ДРОН УМ-1, Со_{Kα}-излучение, Fe-фильтр): ан. 2 — розелит-бета, м-ние Амбед-3, Марокко (обр. 3/11); ан. 3 — розовый кобальтсодержащий талмессит, м-ние Бу-Аззер, Марокко (обр. 3); ан. 4 — талмессит без примесей, Хову-Аксы, Тува (обр. X-A); ан. 5 — теоретическая рентгенограмма (для Со_{Kα}-излучения), рассчитанная нами из структурных данных М. Катти с соавт. (Catti e. a., 1977), исследованной кобальтсодержащий талмессит состава Са₂(Mg_{0.65}Со_{0.35})(AsO₄)₂ · 2H₂O; в интервале d > 1.5 Å даны все рефлексы с интенсивностью ≥ 3%, в интервале 1.5—1.4 Å — с интенсивностью ≥ 2%; * — рефлекс с d = 5.66 Å рентгенограммы розелит-бета, опубликованной К. Фронделем, не индицируется в ячейках арсенатов групп фэйр-филдита и розелита; возможно, это β-линия, соответствующая рефлексу с d = 5.12 Å розелита-бета, или же рефлекс, относящийся к механической примеси другого минерала; ** — рефлексы, относящиеся к механической примеси моноклинного минерала серии розелит—вендвилсонит.

Таблица 6
 Частоты (cm^{-1}) основных полос поглощения в ИК-спектрах талмессита (1), розелита-бета (2) и розелита (3)
 Frequencies (cm^{-1}) of main bands in IR spectra of talmessite (1), roselite-beta (2), and roselite (3)

Частота, cm^{-1}		
1	2	3
		3682
		3638
3400		<u>3444</u>
		<u>3175</u>
		<u>3030</u>
<u>2940</u>	<u>2880</u>	
2450	2425	
	2270	
		1675
		1625
<u>1530</u>	<u>1540</u>	<u>1583</u>
1360		
		1083
968	<u>986</u>	948
912		892
870	868	
847	843	837
<u>805</u>	<u>796</u>	<u>783</u>
		700
		601
533		567
		<u>451</u>
<u>433</u>	<u>432</u>	<u>436</u>
		419

Примечание. Подчеркнуты главные максимумы.

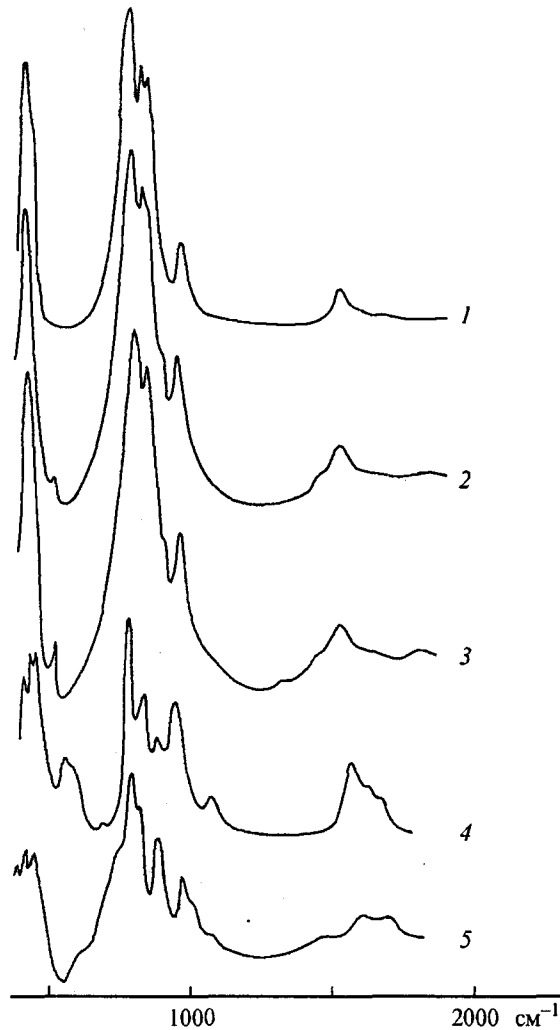


Рис. 2. ИК-спектры розелита-бета (1), высококобальтистого талмессита (2), беспримесного талмессита (3), розелита (4) и брандтита (5).

Fig. 2. IR spectra of roselite-beta (1), Co-rich talmessite (2), end-member talmessite (3), roselite (4) and brandtite (5).

состоит из талмессита, имеющего состав, близкий к идеальному, а в дашкесанском материале присутствуют розелит и вендвилсонит.

Все составы наших триклинных арсенатов из месторождений Марокко лежат в полях талмессита и розелита-бета. Существование изоморфного ряда между этими минералами предполагалось и ранее на основании находки в Бу-Аззере кобальтсодержащего талмессита с составом $\text{Ca}_2(\text{Mg}_{0.65}\text{Co}_{0.35})(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Bariand, Herpin, 1960). Новые данные по составу талмессита и розелита-бета вкупе с ранее опубликованными (табл. 2 и 3, рис. 3) на сегодняшний день свидетельствуют о том, что изоморфный ряд между этими минералами протягивается от конечного магниального члена (талмессит из Хову-Аксы и из Талмесси) до розелита-бета с соотношением $\text{Co} : \text{Mg} \approx 8$ как минимум (Шнееберг; Бу-Аззер). Таким образом, непрерывный изоморфизм между $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Ca}_2\text{Co}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ранее установленный для природной моноклинной серии вендвилсонит—розелит (Dunn e. a., 1987)

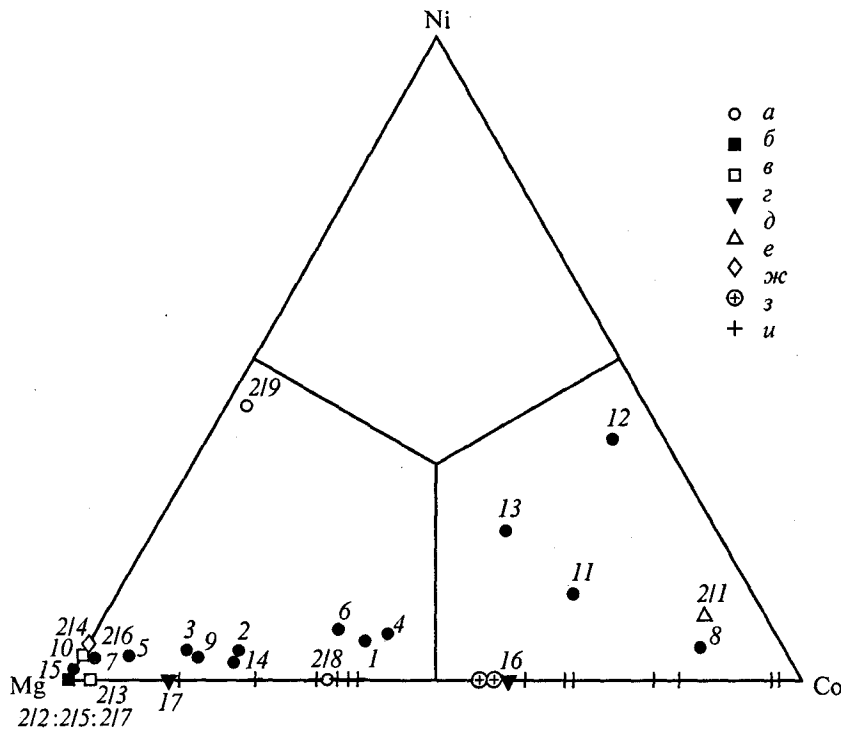


Рис. 3. Соотношения Mg, Co и Ni в магниальных и кобальтовых арсенатах групп фэйрфилдита и розелита. *a, a, d* — наши данные; *b, z, e, ж, з, и* — литературные данные; 1—17 соответствуют номерам в табл. 3, 2/1—2/9 — в табл. 2; *a, б* — рудный район Бу-Аззер, Марокко; *a, z* — Хову-Аксы, Тува; *d* — Дашкесан, Азербайджан; *e* — Шнееберг, Германия; *ж* — Талмессит; *z* — розелит, Шнееберг (Дэна и др., 1954); *и* — минералы ряда розелит—вендвилсонит из разных месторождений (Dunn e. a., 1987a, б).

Fig. 3. Correlation of Mg, Co and Ni in magnesian and cobalt arsenates of fairfieldite and roselite groups.

(рис. 3), оказался характерен и для триклинной; члены ряда с $Mg > Co$ встречаются чаще.

Для всех образцов талмессита и розелита-бета из месторождений Марокко характерна примесь никеля. Минералы из жилы 2 Восточной месторождения Бу-Аззер и из Иртема бедны этим элементом (0.1—1.4 % NiO), а розелит-бета из Амбеда-3 содержит до 6 % NiO (атомное отношение $Ni/Co = 0.65$) — табл. 3, рис. 3. Еще более высокое содержание никеля — 7.3 % NiO ($Ni/Mg = 0.80$) было зафиксировано ранее в талмессите из месторождения Агбар (Cesbron e. a., 1972) (ан. 9 в табл. 2). Существование высоконикелистых разновидностей талмессита и розелита-бета и расположение точек, соответствующих составам этих образцов, на диаграмме Mg—Co—Ni у границ с полем гипотетического минерала $Ca_2Ni(AsO_4)_2 \cdot 2H_2O$ (рис. 3) говорит о достаточно широком изоморфизме между Mg, Co и Ni в арсенатах группы фэйрфилдита. Весьма вероятно, что в природе будет найден и никель-доминантный член этой изоморфной системы — такое предположение уже высказывалось (Cesbron e. a., 1972; Pallix, 1978). Отметим, что для членов ряда розелит—вендвилсонит П. Данн с соавторами не приводит сведений о содержании никеля и вообще не обсуждает этот вопрос (Dunn e. a., 1987), хотя в изученной им коллекции присутствуют и образцы из классических никель-кобальтовых месторождений — Шнееберга и Бу-Аззера. Точки составов моноклинных минералов, нанесенные в соответствии с данными этих исследователей на диаграмму Mg—Co—Ni, оказываются лежащими на прямой линии, соединяющей точки магниального и кобальтового конечных членов (рис. 3). Таким образом, остается пока неясным, действительно ли арсенаты группы розелита не содержат никеля, и это — их специфическая особенность в

отличие от триклинных аналогов, или же данный компонент при изучении минералов ряда розелит—вендвилсонит ранее просто не определялся.

Отметим вполне закономерную связь состава минералов серии талмессит—розелит-бета с их окраской (рис. 3). Так, бесцветные и белые разновидности содержат наименьшее количество кобальта и характеризуются составом, максимально приближенным к магнезиальному конечному члену (ан. 7, 10, 15 в табл. 3). Наиболее обогащенные кобальтом кристаллы окрашены в густой вишнево-красный цвет (ан. 8 в табл. 3). Для промежуточных членов ряда характерен розовый цвет разных оттенков. К сожалению, даже приблизительно оценивать по этим оттенкам соотношение Co и Mg не представляется возможным: в табл. 3 видно, что минерал приобретает розовый цвет уже при содержании 1—2 % CoO и сохраняет его вплоть до составов с $\text{Co} > \text{Mg}$. Примесь никеля сильно понижает интенсивность розовой окраски: обогащенный этим элементом розелит-бета даже при очень низком содержании магния все равно остается бледноокрашенным (ан. 12 в табл. 3).

Генетические особенности. Арсенаты групп розелита и фэйрфилдита в большинстве своем являются гипергенными минералами, лишь марганцевые члены — брандтит и парабрандтит — чаще связаны со специфической скарноидной формацией, характеризующейся дефицитом серы и повышенным окислительным потенциалом, что приводит к появлению здесь скоплений эндогенных арсенатов. Примерами таких объектов являются Лонгбан, Якобсберг и Харстиг в Швеции, Франклин и Стерлинг Хилл в Нью-Джерси (США), Ушкатын-3 в Центральном Казахстане. Магнезиальные и кобальтовые арсенаты обеих групп формируются в зоне окисления рудных тел, содержащих первичную мышьяковую минерализацию (исключение составляет, может быть, лишь вендвилсонит из Стерлинг Хилл, для которого не исключено гидротермальное происхождение). Очевидно, эти минералы, особенно магнезиальные, распространены шире, чем это представляется сейчас, но пропускаются из-за сложности диагностики. Анализ литературных и наших данных показывает, что наиболее характерны они для зоны гипергенеза месторождений, где арсениды кобальта приурочены к доломитовым жилам или же ассоциируют с водными магнезиальными силикатами — серпентином, тальком (Бу-Аззер, Хову-Аксы, Шнееберг). Талмессит без кобальта возникает там, где отсутствуют первичные минералы этого элемента: например, в одном из мышьяково-ртутных рудопроявлений России (Лузгин, 1975), в карстованных доломитизированных известняках с реальгаром и аурипигментом во Французских Альпах (Feraud e. a., 1976). В целом, соотношение кобальта и магния в этих арсенатах может очень сильно варьировать не только внутри месторождения, но даже в пределах одного образца (табл. 3): очевидно, изоморфизм между Co^{2+} и Mg^{2+} здесь осуществляется очень легко, вследствие чего состав минералов оказывается крайне чувствительным к локальным колебаниям химизма среды.

Л. К. Яхонтова (1968) отмечает, что в окисляющихся рудах Хову-Аксы талмессит («арсенат-беловит») замещает жильные карбонаты, а одновременно с ним или позже образуются другие арсенаты — эритрин, аннабергит и пикрофармаколит. В наших образцах из Бу-Аззера и Дашкесана наблюдается обратная картина: розелит-бета и талмессит, розелит и вендвилсонит кристаллизовались последними, завершая формирование ансамбля гипергенных минералов. Они нарастают не только на другие арсенаты Co^{2+} (эритрин), но и на оксиды Co^{3+} и Fe^{3+} (гетерогенит, гематит). Такая последовательность представляется закономерной при эволюции гипергенных минеральных ассоциаций: простые по составу минералы сменяются более сложными по мере вовлечения в процесс все новых компонентов.

Авторы признательны Б. В. Образцову и Л. К. Яхонтовой, предоставившим часть материала, а также В. Г. Шлыкову и Л. А. Паутову за помощь.

Список литературы

- Боришанская С. С., Виноградова Р. А., Крутов Г. А. Минералы никеля и кобальта. М., 1981. 222 с.
- Бородин Л. С., Казакова М. Е. Беловит — новый минерал из щелочных пегматитов // Докл. АН СССР. 1954. Т. 96. № 3. С. 613—616.
- Дэна Дж. Д., Дэна Э. С., Пэлач Ч. и др. Система минералогии. Т. II. Полутом 2, М., 1954. 590 с.
- Лузгин Б. Н. Арсенат-беловит и мансфилдит из рудопроявления ртути и мышьяка // ЗВМО. 1975. Вып. 1. С. 101—106.
- Мустафаев Н. М., Ильохин В., Белов Н. В. Кристаллическая структура розелита $\text{Ca}_2\text{Co}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ // Докл. АН СССР. 1964. Т. 155. № 2. С. 353—356.
- Нефедов Е. И., Мокиевский В. А. Сообщение об открытии новых минералов на научной сессии Федоровского института совместно с Всесоюзным минералогическим обществом // ЗВМО. 1953. Вып. 4. С. 311—317.
- Яхонтова Л. К. Магний-кальциевые и кальциевые арсенаты из зоны окисления арсенидного месторождения // Тр. Минер. музея АН СССР. 1968. № 18. С. 154—167.
- Яхонтова Л. К., Сидоренко Г. А. О новом минерале арсенат-беловите // ЗВМО. 1956. Вып. 3. С. 297—302.
- Bariand P., Herpin P. Un arseniate de calcium et de magnesium isomorphe de la β roselite // Bull. Soc. franc. Miner. Crist. 1960. Т. 83. P. 118—121.
- Bunnici J. P., Pierrot R. Belovite et vladimirite d'Irthem: in Description provisoire des especes minerales du Maroc. XIII // Notes Serv. geol. Maroc. 1965. Т. 24. N 183. P. 103.
- Catti M., Ferraris G., Ivaldi G. Hydrogen bonding in the crystalline state. Structure of talmessite, $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Co})(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and crystal chemistry of related minerals // Bull. Soc. franc. Miner. Crist. 1977. Т. 100. P. 230—236.
- Cesbron F., Pallix G., Permingeat F., Vachey H. Une nouvelle variete de talmessite: la talmessite nickelifere d'Arhbar (district de Bou-Azzer, Anti-Atlas) // Notes Serv. geol. Maroc. 1972. Т. 32. N 241. P. 67—72.
- Dana's New Mineralogy. Eight Edition (by Caines R. V. e. a.). New York, 1997. 1819 p.
- Dunn P. J., Peacor D. R., Su S.-C. e. a. Parabrandtite, the manganese analogue of talmessite, from Sterling Hill, Ogdensburg, New Jersey // N. Jb. Miner. Abh. 1987a. Vol. 157. N 2. P. 113—119.
- Dunn P. J., Sturman B. D., Nelen J. A. Wendwilsonite, the Mg analogue of roselite, from Morocco, New Jersey, and Mexico, and new on roselite // Amer. Miner. 1987b. Vol. 72. N 1/2. P. 217—221.
- Feraud J., Pillard F., Vernet J. La talmessite $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ du karst antre — albien a barytine de Luceram (Alpes Maritimes) // Bull. Soc. franc. Miner. Crist. 1976. Т. 99. P. 331—333.
- Fronde! C. Neomesselite and beta-roselite: two new minerals of the fairfieldite group // Amer. Miner. 1955. Vol. 40. N 9/10. P. 828—833.
- Gaudefroy C., de Trey M. Description de mineraux d'Arhbar, region de Bou-Azzer: cobalto-calcite, roselite-beta, conicalcrite, lavendulanite et une dizaine d'autres mineraux // Notes Serv. geol. Maroc. 1963. Т. 22. N 170. P. 108—109.
- Gebhard G. Tsumeb: eine deutsch-afrikanische Geschichte. Obenwehnrath, 1991. 239 p.
- Hawtorne F. C., Ferguson R. B. The crystal structure of roselite // Canad. Miner. 1977. Vol. 15. Pt 1. P. 36—42.
- Keller P., Innes J., Dunn P. J. Zincroselite, $\text{Ca}_2\text{Zn}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, a new mineral from Tsumeb, Namibia // N. Jb. Miner. Mh. 1986. H. 11. P. 523—527.
- Pallix G. Famous mineral localities: Bou—Azzer, Morocco // Miner. Record. 1978. Vol. 9. N 2. P. 69—73.
- Permingeat F. Beta-roselite de Bou-Azzer // Notes Serv. geol. Maroc. 1956. Т. 14. N. 133. P. 141—142.
- Pierrot R. Contribution a la mineralogie des arseniates calciques et calciomagnesiens naturels // Bull. Soc. franc. Miner. Crist. 1964. Т. 87. P. 169—211.
- Sturman B. D., Dunn P. J. Gaitite, $\text{H}_2\text{Ca}_2\text{Zn}(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_2$, a new mineral from Tsumeb, Namibia (South West Africa) // Canad. Miner. 1980. Vol. 18. Pt 2. P. 197—200.

Поступила в редакцию
18 июля 2000 г.