

УДК 549.612

© Д. члены А. Г. БУЛАХ* Т. Г. ПЕТРОВ**

**ХИМИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ МИНЕРАЛОВ ГРУППЫ ЭВДИАЛИТА, ИХ
РАНГОВЫЕ ФОРМУЛЫ И ХИМИКО-СТРУКТУРНЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ
МИНЕРАЛЬНЫХ ВИДОВ**

**A. G. BULAKH, T. G. PETROV. CHEMICAL VARIABILITY OF THE EUDIALYTE
GROUP MINERALS, RANK FORMULAS OF THEIR COMPOSITIONS AND
CHEMICAL-STRUCTURAL VARIETIES
OF THEIR MINERAL SPECIES**

** Кафедра минералогии и ** НИИ земной коры Санкт-Петербургского
государственного университета, 199034, Санкт-Петербург,
Университетская наб., 7/9; * bulakh@AB5062.spb.edu*

Only 58 analyses of eudialyte minerals, among 309 ones analyzed in the whole world, make the collection of representatives with the analytical sum more than 97.5 %. And totally, there are 29 chemical elements discovered in composition of this mineral. Now, after excluding hydro-eudialyte and minerals of alluaivite-eudialyte raw, 49 probes will rest. O, Si and Na are the principal elements, invariably present in composition of all eudialytes. Measured in atomic percent's, O, Si, Na are the major chemical elements also, and all those 49 probes can be subdivided, by cations, into following groups: CaFe — 30 probes, CaMn — 10, CaSr — 2, CaAl — 1, MnCa — 6, MnREE — 1 mineral species. The minor element Nb exists in all eudialytes, whereas W (tungsten) was detected in CaSr probes only. These minerals could be classified as chemical-structural varieties of the mineral species eudialyte, the same are the samples with doubled *c* parameter.

ВВЕДЕНИЕ

Эвдиалит — специфический минерал пород нефелин-сиенитового семейства, одинаково привлекателен как своей неповторимой красотой, так и удивительно сложным и меняющимся химическим составом. Химические формулы минералов группы эвдиалита неоднотипны, и нет простой и единой системы их расчета. А между тем становится все более доступным массовое выполнение химического анализа эвдиалита, как, впрочем, и других минералов, и получение результатов для больших серий проб. Поэтому важно разработать метод унифицированного и достаточно простого объективного сравнения цифр химического состава любой по объему серии проб любых минералов.

В этой статье в центре внимания находятся минералы группы эвдиалита. Ранее по этой же методике исследованы вариации состава моноклинных пироксенов (Петров, Золотарёв, 2000) и скаполита (Петров и др., 2000; Золотарёв и др., 2003). Выполненные для эвдиалитов, пироксенов и скаполитов расчеты и сопоставления, на взгляд авторов, применимы и к другим минералам.

СТРУКТУРА И ХИМИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА ЭВДИАЛИТА

Известны две формулы эвдиалита, обоснованные расшифровкой структуры минерала (Giusipetti e. a., 1971; Гольшев и др., 1971, 1972; Johnsen & Grice, 1999):

- 1) $\text{Na}_{12}\text{Ca}_6\text{Fe}_3\text{Zr}_3[\text{Si}_3\text{O}_9]_2[\text{Si}_9\text{O}_{24}(\text{OH})_3]_2(+\text{Si})$,
- 2) $\text{Na}_{15}\text{Ca}_6\text{Fe}_3\text{Zr}_3\text{Si}[\text{Si}_{25}\text{O}_{73}](\text{O},\text{OH},\text{H}_2\text{O})(\text{OH},\text{Cl})_2$.

В первой из них (по Голышеву и др.) указаны два комплексных иона. Они отвечают тройному и девятёрному кольцам кремниево-кислородных тетраэдров в структуре минерала. Во второй (по Ёнсену и Грайс) эти комплексные ионы объединены. В первой формуле число атомов Si составляет 24. Подразумевается, что в центре большого (девятёрного) кольца есть позиция, вакантная для размещения в ней 25-го атома кремния (он обозначен нами рядом с формулой символом +Si). Во второй формуле число атомов в кольцах обязательно равно 25 и есть еще одна совершенно особая дополнительная позиция для 26-го атома кремния. Она одна на множество других позиций в громадном объеме элементарной ячейки минерала. В сходной позиции M(3) также размещаются то Nb, то W, то другие изоморфные с ними химические элементы. Еще одним различием двух приведенных выше типовых формул эвдиалита является коэффициент для Na — 12 в первой и 15 — во второй. Также различно общее число анионов в обеих формулах. В первой оно равно 72 (из них 66 атомов кислорода в каркасе структуры + дополнительные анионы), во второй это уже 76 (73 кислорода в каркасе + дополнительные анионы).

Существует титановый аналог эвдиалита аллуайвит. Переходы между ними происходят даже в пределах одного зерна (Агеева, 2002).

ИСХОДНЫЙ МАССИВ АНАЛИТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

В нашем распоряжении были цифры 34 средних составов, рассчитанных по 238 первичным анализам из разных месторождений (Екименкова, 2000), а также 71 анализ из других работ. Цифры 34 средних составов и 71 индивидуального анализа были взяты нами за исходные для их рассмотрения ниже. Они характеризуются разной полнотой набора химических определений и разными суммами — от 85.6 до 100.71 % (поправка на фтор, хлор, серу не вычтена). Если бы мы подошли к их оценке со строгими критериями (100 ± 0.5 %), у нас осталось бы всего 25 из них. Мы решили снизить требования и включили в дальнейшее рассмотрение цифры с суммами не менее 97.5 %. В результате в выборке осталось 58 составов (табл. 1), наибольшее количество элементов — 20 — имеется в пяти из них.

Всего в минерале обнаружено 29 следующих элементов: O, Si, Na, Ca, Fe, Mn — везде в табл. 1, Zr (57 раз), Cl (56), Nb (54), K (54), La (52), Ti (49), H (45), Sr (40), Ce (39), Hf (32), Y (28), Nd (26), Ta (20), Ba (18), Al (16), Mg (13), W (11), F (10), S (8), Pr (1), Gd (2), Dy (2), Th (1). Не всегда ясна причина отсутствия элемента в результатах — его нет или он не определялся? В отброшенных нами 47 составах с суммой цифр менее 97.5 % для следующих химических элементов чаще всего стоит ноль или прочерк: F, Al, K, Sr, Ti, Nb, Ta, W, Ba, H₂O.

Насколько нам известно, никто ни разу не проверял воспроизводимости результатов анализа одних и тех же проб эвдиалита и их точности. И для других минералов такие работы единичны — мы можем назвать только две публикации (Fairbrain *et al.*, 1951; Булах, 1984). Методика внутреннего и внешнего контроля результатов анализов, способы оценки значимости коэффициентов в формулах, приемы расчета их доверительных интервалов описаны подробно (Булах и др., 1995), но они трудоемки. В полном объеме они выполнялись пока лишь для амфиболов (Булах, 1964, 1967; Bulach, 1970), апатита (Булах, 1984), микроклина (Булах и др., 1995). Это — особая и трудная проблема, она выходит далеко за рамки настоящей статьи. Поэтому авторам пришлось использовать цифры из публикаций без критической оценки их достоверности.

Таблица 1

Химический состав (мас. %) минералов группы эвдиалита
Chemical composition of eudialyte-group minerals

№ ана- лиза	SiO ₂	ZrO ₂	HfO ₂	TiO ₂	ThO ₂	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	WO ₃	Al ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Dy ₂ O ₃
1	51.83	13.35	0.51	0.51	0.00	1.33	0.13	0.08	0.00	0.32	0.80	0.00	0.00	0.09	0.26
2	51.27	14.99	0.56	0.55	0.00	1.41	0.11	0.10	0.00	0.39	0.95	0.00	0.22	0.00	0.20
3	51.60	14.79	0.73	0.53	0.00	1.81	0.00	0.00	0.00	0.44	0.88	0.00	0.19	0.16	0.13
4	52.54	11.16	0.07	0.95	0.00	0.15	0.04	0.19	0.08	0.07	0.22	0.00	0.07	0.00	0.00
5	52.08	9.73	0.17	1.79	0.00	1.23	0.23	0.32	0.08	0.40	0.52	0.00	0.18	0.00	0.00
6	53.49	8.61	0.03	2.16	0.00	1.25	0.13	0.18	0.03	0.37	0.38	0.00	0.11	0.00	0.00
7	53.11	5.59	0.09	4.02	0.00	1.71	0.18	0.13	0.05	0.27	0.69	0.00	0.12	0.00	0.00
8	54.24	3.47	0.02	5.64	0.00	2.02	0.35	0.21	0.04	0.23	0.64	0.00	0.06	0.00	0.00
9	56.40	1.94	0.01	6.53	0.00	2.37	0.15	0.11	0.06	0.23	0.54	0.00	0.16	0.00	0.00
10	56.40	0.56	0.00	7.26	0.00	2.51	0.32	0.08	0.00	0.23	0.51	0.00	0.22	0.00	0.00
11	55.84	0.29	0.03	7.17	0.00	2.90	0.18	0.00	0.00	0.18	0.53	0.00	0.41	0.00	0.00
12	54.17	0.00	0.00	6.76	0.00	3.61	0.00	0.00	0.00	0.27	0.14	0.00	0.22	0.00	0.00
13	46.14	11.02	0.19	0.07	0.00	1.99	0.00	0.00	0.34	1.14	1.91	0.00	0.45	0.00	0.00
14	49.10	11.66	0.00	0.98	0.00	0.29	0.00	0.00	0.19	0.83	0.83	0.00	0.00	0.00	0.00
15	49.08	11.03	0.00	0.33	0.00	0.82	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	49.04	10.53	0.35	0.42	0.00	0.89	0.00	0.00	0.12	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00
17	48.92	11.32	0.00	0.30	0.00	0.67	0.00	0.00	0.08	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00
18	46.74	9.86	0.00	0.69	0.00	2.91	0.00	0.00	0.04	0.25	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00
19	48.82	11.09	0.38	0.37	0.00	1.03	0.00	0.00	0.11	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00
20	45.26	11.31	0.45	0.44	0.00	2.19	0.00	0.00	0.31	2.33	2.39	0.00	0.62	0.00	0.00
21	45.60	11.04	0.19	0.66	0.00	2.31	0.00	0.00	0.14	2.08	2.52	0.00	0.76	0.00	0.00
22	49.69	11.42	0.59	0.21	0.00	0.30	0.00	0.00	0.24	0.25	0.58	0.00	0.30	0.00	0.00
23	47.14	11.70	0.67	0.00	0.00	1.85	0.00	0.00	0.18	0.43	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00
24	47.38	11.15	0.46	0.09	0.00	1.83	0.00	0.00	0.13	1.00	1.82	0.00	0.52	0.00	0.00
25	48.82	11.65	0.58	0.00	0.00	0.77	0.00	0.00	0.50	0.47	0.90	0.00	0.41	0.00	0.00
26	47.87	11.44	0.71	0.00	0.00	1.16	0.00	0.00	0.39	0.32	0.73	0.00	0.00	0.00	0.00
27	49.76	11.14	0.42	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00
28	46.25	11.21	0.23	0.67	0.00	1.27	0.00	0.00	0.18	0.20	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00
29	49.75	10.98	0.75	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.15	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00

Таблица 1
(продолжение)

№ ана- лиза	SiO ₂	ZrO ₂	HfO ₂	TiO ₂	ThO ₂	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	WO ₃	Al ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Dy ₂ O ₃
30	48.70	11.28	0.37	0.08	0.00	1.07	0.00	0.00	0.13	0.46	0.74	0.00	0.31	0.00	0.00
31	47.26	11.39	0.38	0.08	0.00	2.05	0.00	0.00	0.14	1.29	2.20	0.00	0.53	0.00	0.00
32	48.26	11.42	0.54	0.00	0.00	1.72	0.00	0.00	0.15	0.90	1.40	0.00	0.45	0.00	0.00
33	44.36	10.56	0.58	0.00	0.00	2.88	0.00	0.00	0.07	2.55	3.70	0.00	0.93	0.00	0.00
34	47.26	12.33	0.00	0.00	0.00	1.74	0.00	0.00	0.11	1.58	2.70	0.00	0.82	0.00	0.00
35	44.00	11.48	0.00	0.00	0.00	2.91	0.00	0.00	0.11	2.87	5.11	0.00	1.38	0.00	0.00
36	45.34	11.08	0.36	0.56	0.00	2.26	0.00	0.00	0.21	2.23	2.44	0.00	0.69	0.00	0.00
37	43.70	10.62	0.18	0.11	0.00	1.33	0.02	3.80	0.09	0.21	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00
38	42.98	10.43	0.17	0.02	0.00	1.58	0.03	4.48	0.02	0.12	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
39	43.46	11.44	0.16	0.00	0.00	3.48	0.14	0.00	0.18	2.88	5.14	0.48	1.45	0.20	0.00
40	49.16	14.17	0.00	0.72	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	2.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
41	50.88	12.23	0.00	1.13	0.00	0.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
42	50.14	11.83	0.00	0.46	0.00	0.11	0.00	0.00	0.07	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
43	48.62	13.98	0.00	0.19	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	2.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
44	49.43	15.30	0.00	1.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
45	48.73	12.33	0.00	0.50	0.00	0.83	0.20	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
46	49.10	9.10	0.00	0.45	0.00	0.08	0.02	0.00	2.09	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
47	48.37	12.10	0.00	0.18	0.00	1.60	0.10	0.00	0.60	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
48	49.44	11.62	0.00	0.00	0.00	1.43	1.61	0.00	2.72	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
49	46.02	10.99	0.00	1.02	0.00	3.68	0.00	0.00	1.82	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	46.76	12.86	0.00	0.74	0.00	0.28	0.00	0.00	0.00	2.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
51	48.00	15.14	0.00	1.42	0.00	0.68	0.00	0.00	0.00	4.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
52	45.73	13.62	0.00	0.08	0.00	2.02	0.14	0.00	0.49	4.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
53	46.48	12.50	0.00	0.16	0.00	2.33	0.12	0.00	0.54	5.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
54	47.85	13.39	0.00	0.11	0.00	1.22	0.00	0.00	0.00	2.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
55	43.40	12.40	0.00	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
56	52.23	11.73	0.00	1.26	0.00	0.10	0.00	0.00	0.45	4.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
57	45.72	12.66	0.00	0.23	0.17	2.74	0.05	0.00	0.18	3.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
58	46.03	12.08	0.28	0.11	0.00	3.72	0.00	0.00	0.00	0.87	1.58	0.00	0.65	0.00	0.00

Таблица 1
(продолжение)

№ ана-лиза	Y ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	SrO	BaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	F	SO ₃	H ₂ O	Сумма
1	0.31	0.00	1.67	0.00	4.39	8.11	0.00	0.00	13.11	0.00	1.93	0.00	0.00	0.00	98.73
2	0.54	0.00	2.91	0.00	3.30	6.44	0.00	0.15	12.97	0.00	1.10	0.00	0.00	0.00	97.91
3	0.49	0.00	2.33	0.00	3.54	6.66	0.00	0.00	13.06	0.00	1.12	0.00	0.00	0.00	98.46
4	0.00	0.00	3.14	0.00	1.56	10.89	1.31	0.46	15.11	0.24	1.79	0.00	0.11	0.00	100.15
5	0.00	0.00	1.43	0.02	2.37	9.49	1.66	0.27	16.60	0.27	1.03	0.00	0.59	0.00	100.46
6	0.00	0.00	1.50	0.06	2.37	9.70	1.50	0.24	16.54	0.24	1.03	0.00	0.66	0.00	100.58
7	0.00	0.00	1.06	0.00	2.33	9.48	1.15	0.18	17.19	0.18	0.97	0.00	1.00	0.00	99.50
8	0.00	0.00	0.65	0.00	2.29	9.48	0.86	0.14	17.49	0.14	0.93	0.00	1.03	0.00	99.93
9	0.00	0.00	0.49	0.00	2.09	9.81	0.62	0.10	16.84	0.10	0.93	0.00	1.23	0.00	100.71
10	0.00	0.00	0.32	0.00	2.03	9.61	0.53	0.08	17.37	0.08	0.79	0.00	1.40	0.00	100.30
11	0.00	0.00	0.20	0.00	1.73	9.80	0.22	0.09	18.36	0.09	0.71	0.00	1.51	0.00	100.24
12	0.00	0.00	0.19	0.00	1.46	10.25	0.00	0.63	19.95	0.05	0.48	0.51	1.65	0.00	99.83
13	0.53	0.00	5.30	0.00	3.32	8.18	0.37	0.00	15.05	0.47	1.03	0.00	0.00	0.28	97.78
14	0.56	0.00	3.37	0.00	5.17	6.75	0.33	0.00	16.18	0.42	0.48	0.00	0.00	0.20	97.85
15	0.24	0.00	4.31	0.00	0.95	11.97	2.62	0.20	15.25	0.43	1.28	0.00	0.00	0.24	98.89
16	0.19	0.00	4.34	0.00	0.93	12.41	2.81	0.20	13.86	0.46	1.33	0.00	0.00	0.22	98.32
17	0.21	0.00	3.68	0.00	1.27	12.41	2.76	0.20	15.18	0.43	1.17	0.00	0.00	0.27	99.09
18	0.20	0.00	2.00	0.00	3.86	11.80	4.91	0.20	13.21	0.37	1.05	0.00	0.00	0.28	98.66
19	0.18	0.00	4.06	0.00	1.14	12.25	2.83	0.20	14.99	0.44	1.26	0.00	0.00	0.24	99.56
20	1.57	0.00	1.67	0.00	7.75	5.48	0.45	0.00	14.22	0.40	0.35	0.71	0.00	0.11	98.01
21	1.31	0.00	1.47	0.00	8.28	5.81	0.50	0.00	14.00	0.42	0.24	0.73	0.00	0.13	98.19
22	0.70	0.00	6.10	0.00	1.14	9.60	0.26	0.00	15.76	0.37	1.93	0.00	0.00	0.07	99.51
23	0.40	0.00	7.08	0.00	1.18	11.79	0.22	0.00	13.34	0.32	1.77	0.00	0.00	0.10	99.07
24	0.43	0.00	5.09	0.00	3.24	8.46	0.95	0.00	14.49	0.39	0.90	0.00	0.00	0.32	98.65
25	0.44	0.00	7.48	0.00	0.47	9.61	0.00	0.00	15.46	0.36	1.34	0.00	0.00	0.22	99.48
26	0.30	0.00	7.30	0.00	0.54	10.27	0.00	0.00	15.17	0.29	1.70	0.00	0.00	0.12	98.31
27	0.00	0.00	6.10	0.00	0.72	10.97	1.84	0.00	15.59	0.93	1.69	0.00	0.00	0.14	99.88
28	0.53	0.00	4.57	0.00	2.84	8.23	4.08	0.40	15.56	0.30	1.40	0.51	0.00	0.05	99.10
29	0.00	0.00	4.25	0.00	2.65	9.97	2.09	0.00	16.03	0.41	1.02	0.00	0.00	0.31	99.29
30	0.21	0.00	3.73	0.00	2.89	9.75	0.48	0.00	16.76	0.38	0.71	0.00	0.00	0.38	98.43
31	0.53	0.00	5.07	0.00	4.01	7.41	0.36	0.00	14.78	0.35	0.85	0.46	0.00	0.12	99.26

ел

Таблица 1
(продолжение)

№ ана-лиза	Y ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	SrO	BaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	F	SO ₃	H ₂ O	Сумма
32	0.37	0.00	2.44	0.00	3.93	9.36	0.37	0.00	16.21	0.26	1.13	0.00	0.00	0.27	99.18
33	0.41	0.00	4.72	0.00	4.08	7.78	0.00	0.00	13.54	0.26	1.10	0.00	0.00	0.25	97.77
34	0.56	0.00	2.87	0.00	6.46	4.06	0.46	0.00	15.60	0.23	0.56	0.00	0.00	0.40	97.74
35	0.74	0.00	3.01	0.00	6.98	3.13	0.00	0.00	14.26	0.23	0.82	0.33	0.00	0.16	97.52
36	1.46	0.00	1.58	0.06	8.01	5.62	0.49	0.00	14.51	0.43	0.29	0.88	0.00	1.28	99.78
37	0.00	0.00	4.33	0.04	1.63	10.42	8.45	0.00	11.35	0.52	0.67	0.00	0.00	0.87	98.52
38	0.00	0.00	2.58	0.00	4.21	10.20	9.17	0.00	10.37	0.41	0.84	0.00	0.00	0.83	98.64
39	0.78	0.00	3.00	0.00	7.70	2.90	0.90	0.00	13.60	0.28	0.76	0.00	0.00	0.63	99.56
40	0.00	0.78	3.57	0.00	1.64	7.01	1.42	0.00	15.82	0.43	2.19	0.00	0.00	1.26	100.29
41	0.00	0.96	3.70	0.27	0.82	15.04	0.00	0.00	11.63	1.10	0.62	0.00	0.00	1.45	100.30
42	0.00	0.50	5.32	0.24	0.60	11.18	0.47	0.00	14.06	1.39	1.82	0.00	0.00	1.19	99.38
43	0.00	0.00	6.08	0.00	1.34	10.86	0.00	0.00	13.75	0.33	0.93	0.00	0.00	1.63	100.23
44	0.00	0.00	5.01	0.00	0.28	12.29	0.00	0.00	13.30	0.00	1.66	0.00	0.00	1.05	99.98
45	0.00	0.76	4.10	0.00	0.78	15.87	0.00	0.00	11.35	0.96	0.82	0.00	0.00	2.26	100.20
46	0.00	4.75	4.50	0.90	0.43	11.87	0.69	0.00	9.20	3.80	1.68	0.00	0.00	1.31	99.80
47	0.00	0.85	4.04	0.19	3.50	11.13	0.00	0.00	12.10	0.49	0.37	0.00	0.00	2.72	100.26
48	0.00	1.47	1.22	0.35	4.58	9.93	0.00	0.00	9.47	1.35	0.92	0.00	0.00	2.97	100.04
49	0.00	1.88	0.00	0.01	10.78	10.96	0.00	0.48	7.47	0.46	0.72	0.00	0.00	2.70	99.62
50	0.00	0.00	3.20	0.24	11.05	5.83	0.00	0.00	13.26	0.53	1.07	0.00	0.00	1.84	100.37
51	0.00	2.74	3.79	0.00	2.34	8.27	0.00	0.00	11.49	0.00	0.00	0.00	0.00	1.94	100.53
52	0.00	3.29	0.94	0.17	7.02	8.32	0.64	0.00	9.99	0.53	0.06	0.07	0.00	3.00	100.71
53	0.00	1.56	2.53	0.00	5.92	7.92	0.61	0.00	11.50	0.55	0.00	0.00	0.00	2.19	100.27
54	3.90	0.00	2.92	0.08	2.69	7.63	0.00	0.00	13.19	0.51	0.43	0.32	0.00	2.64	99.62
55	0.00	3.00	0.00	0.00	7.00	8.30	0.70	0.00	11.57	0.63	2.00	0.00	0.00	0.00	100.74
56	0.00	0.55	0.00	0.00	1.44	11.25	0.43	1.16	2.29	1.09	1.80	0.00	0.00	9.46	99.96
57	0.00	0.77	5.22	0.00	3.66	10.86	2.45	0.00	10.71	0.52	1.00	0.00	0.00	0.48	100.59
58	0.43	0.00	5.57	0.00	2.55	10.73	2.24	0.14	11.03	0.35	1.20	0.35	0.00	0.78	100.69

Примечание. Литературные источники: ан. 1—3 — Екименкова (2000); ан. 4—12 — Агеева (2002); ан. 13—35 — Johnson (1997); ан. 36 — Johnson e. a. (1998); ан. 37—38 — Johnson e. a. (1999a); ан. 39 — Johnson e. a. (1999b); ан. 40—56 — Минералы (1981); ан. 57 — устное сообщение; ан. 58 — Дорфман и др. (1963). Названия минералов в литературном источнике, ан. 1—10 — эвдиалит, ан. 5—10 — переходы от аллуайвита к эвдиалиту, ан. 11, 12 — аллуайвит, ан. 13—35 — эвдиалит, ан. 36 — кентбруксит, ан. 37 — хомяковит, ан. 38 — манганхомяковит, ан. 39 — онейлит, ан. 40—48 — эвдиалит, ан. 49 — оксиэвдиалит,

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ И ВЫВОД РАНГОВЫХ ФОРМУЛ

Сложность химического состава эвдиалитов, значительность его вариаций, резкие различия в молекулярных весах входящих в минерал компонентов делают неудобным прямое сравнение проб по цифрам весовых (массовых) процентов. Более наглядными являются сравнения атомных процентов. Нами был использован метод РНА (Петров, 2001, 2002 и др.), но только в той его начальной части, которая обозначена в этой аббревиатуре буквой R (от rank = ранг). Идея этой части метода проста. Она заключается в том, что рассчитываются атомные проценты (или, что то же самое, атомные доли), а по ним выписывается ранговая формула состава минерала. Ранговая формула — это ряд химических элементов, расположенных в порядке убывания их атомных процентов (или долей). Затем производится упорядочивание и сопоставление этих формул.

Последовательность действий очевидна и не требует особых пояснений. Переход от атомных процентов к ранговым формулам показан нами для пяти проб в табл. 2 и 3. Методика расчетов описана на учебных примерах в одной из начальных работ Т. Г. Петрова (1972) и в более общей форме — позднее (Петров, 2001). Как видно в табл. 3, на первых местах в ранговых формулах эвдиалита стоят кислород и кремний, что естественно для силикатов. После кислорода и кремния следует Na. Потом начинаются различия.

Таблица 2

Химический состав (ат. %) пяти проб эвдиалита
Chemical composition of five eudialyte specimens, at. %

Компонент	Номер в табл. 1				
	29	36	39	46	54
Si	19.51	18.19	19.16	19.32	18.94
Zr	2.09	2.16	2.27	1.74	2.55
Hf	0.08	0.04	0.02	—	—
Ti	0.19	0.17	0.22	0.05	0.07
Th	—	—	—	—	0.01
Nb	—	0.42	0.64	0.01	0.52
Al	0.09	0.14	0.12	1.31	0.12
La	0.02	0.33	0.44	0.03	0.49
Ce+Pr, Nd	0.02	0.37	1.13	—	—
Y	—	0.31	0.17	—	0.09
Fe ³⁺	—	0.44	0.24	—	—
Fe ²⁺	1.39	0.53	1.02	1.48	1.82
Mn	0.41	1.26	1.22	0.07	0.59
Ca	4.19	2.42	1.26	5.00	4.81
Sr	0.47	0.11	0.21	0.16	0.59
Na	12.17	11.26	10.72	7.00	9.33
K	0.20	0.22	0.15	1.91	0.27
Cl	0.68	0.20	0.52	1.12	0.70
F	—	1.12	—	—	—
H	0.81	3.42	1.71	3.44	1.32
O	57.00	56.67	58.34	57.16	58.47
Сумма	99.29	99.78	99.56	99.80	100.59
-O=C1 ₂ , F ₂	0.34	0.66	0.26	0.56	0.35
Сумма	98.95	99.12	99.26	99.24	100.24

Таблица 3

Ранговые формулы состава пяти минералов группы эвдиалита
Rank formulas of chemical composition of five eudialyte group minerals

ПОЛНЫЕ РАНГОВЫЕ ФОРМУЛЫ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

№ анализа в табл.1	Номер рангов														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
36	O	Si	Na	H	Mn=Ca=	Zr*	F	Fe	Nb	Ce	La	Y	K	Cl	
46	O	Si	Na	Ca	H	Fe	K=	Zr*	Cl	Al	Sr	Mn	Ti	La	Nb
57	O	Si	Na	Ca	Zr	Fe	H=Mn*	Cl	Sr	Nb	La	K	Al	Ti	
29	O	Si	Na	Ca	Zr	Fe	Mn=H*	Cl	Sr	K	Ti	Al	La	Ce	
39	O	Si	Na	Mn	Zr	H	Ca	Fe	Ce	Nb	Cl	La	Sr	Y	K

П р и м е ч а н и е. (*) Знак равенства ставится в случаях, когда содержания соседних элементов отличаются менее чем на 15 относительных процентов.
ЭВДИАЛИТА

Возьмем теперь весь массив ранговых формул для проб в табл. 1. Для его обработки использована специальная компьютерная программа PETROS (Мошкин и др., 2000). Вводятся цифры анализа, машина автоматически получает для них ранговые формулы и распечатывает их в строгом порядке (табл. 4).

Как видим, самый высокий (первый) иерархический уровень представлен одним элементом — кислородом, и это тривиально. В следующем втором иерархическом уровне (скажем так: в классе R2) уже появляется разнообразие: в нем мы имеем два последующих класса, а именно OH, в котором находится один анализ (не удивительно, что это названный так «гидроэвдиалит») и OSi (57 анализов). В свою очередь этот класс OSi распадается в следующем ранге также на два класса: OSiH (3 анализа) и OSiNa (54 анализа). Последнее четко фиксирует известное преобладание в эвдиалите числа атомов натрия над всеми остальными катионами, включая обычно, но не всегда, идущий за ним кальций.

Далее класс OSiNa распадается в следующем ранге на четыре класса: OSiNaH (7 анализов), OSiNaCa (40), OSiNaMn (4) и OSiNaZr (3 анализа). То есть уже на этом — четвертом — весьма низком уровне детальности выделяются шесть классов. Они прослеживаются при просмотре таблицы сверху вниз по смене элементов в четвертом ранге (т. е. под цифрой 4). Другие детали членения исходной совокупности эвдиалитов читатель может выявить сам. Нам хочется обратить внимание на группы проб (21 + 20 + 39 + 35) и (36 + 50) с высоким содержанием марганца. Практически всегда в них присутствует ниобий, причем в пробах 21 и 20 он занимает наиболее высокую ранговую позицию среди циркониевых минералов группы эвдиалита. Еще более высока ранговая позиция ниобия в титановых минералах (пробы 12—10).

Число рангов зависит от целей и степени детальности исследования и потому выбор этого числа субъективен. В табл.4 мы привели только по двенадцать первых в каждом анализе химических элементов. Более полную картину можно дать посредством специальной свертки информации — назовем ее обобщенной ранговой формулой. Эта довольно сложная, на первый взгляд, схема (рис. 1) дает возможность оценить значимость элемента в массиве данных и ее вариативность (т. е. размах колебаний рангов, в которых встречается каждый данный элемент).

На рис. 1 в первом сверху ряду находятся элементы, которые встречаются в ранговых формулах нашей выборки наиболее часто. Под каждым химическим элементом указаны частоты их встречаемости (в процентах от общего числа анализов). j То есть цифра 100 для Si означает то, что во всех пробах (в их 100 %) он был на j первом месте. Во втором ряду выписаны элементы, встречающиеся в том же ранге

Таблица 4
Иерархическая классификация составов эвдиалита
Hierarchic classification of eudialyte compositions

№ анализа в табл.1	Номер рангов											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
56	O	H	Si	Ca	Zr	Na	Cl	La	K=	Mn	Ti	Al
49	O	Si	H	Na	Ca	Mn	Zr	Al	Nb	Fe	Cl	Ti
48	O	Si	H=	Na	Ca	Zr	Mn	Al	Fe	K	Cl	Nb
52	o	Si	H=	Na	Ca	Zr=	Mn	Fe	La	Nb	K	Al
40	O	Si	Na	H=	Ca=	Zr	Cl=	Fe	Mn	La	Sr	K
53	o	Si	Na	H	Ca	Zr	Mn	Fe	La	Nb	K	Al
54	o	Si	Na	H	Ca	Zr	Fe=	Mn=	Y	La	F	Cl
51	o	Si	Na	H	Ca	Zr	Fe	Mn=	La	Ti	Nb	
47	o	Si	Na	H	Ca	Zr	Fe	Mn	La=	Nb	Al	Cl
36	O	Si	Na	H	Mn=	Ca=	Zr	F	Fe	Nb	Ce	La
50	O	Si	Na	H	Mn	Zr=	Ca	Fe	Cl	La	K	Ti
46	O	Si	Na	Ca	H	Fe	K=	Zr	Cl	Al	Mg	Sr

38	O	Si	Na	Ca	H=	Sr=	Zr	Mn	Fe	Cl	W	Nb
42	O	Si	Na	Ca	H	Zr	Fe	Cl	K	Mn	Mg	Ti
45	o	Si	Na	Ca=	H	Zr	Fe	Cl=	K	Mn	Ti	Nb
43	O	Si	Na	Ca=	H	Zr	Fe	Cl	Mn	La	K	Ti
41	O	Si	Na	Ca	H	Zr	Fe	K	Cl	Ti	Mn	Mg
37	O	Si	Na	Ca	H=	Zr=	Sr	Fe	Mn	Cl	W	K
10	O	Si	Na	Ca	Ti	Mn	Cl	Nb=	S	Sr	Zr	Fe
9	O	Si	Na	Ca	Ti	Mn=	Cl	Nb=	Zr=	S	Fe	Sr
8	O	Si	Na	Ca	Ti	Mn=	Zr=	Cl	Nb	S	Fe	Sr
11	O	Si	Na	Ca	Ti	Mn=	Nb=	Cl=	S	Ce	Fe	Nd
7	o	Si	Na	Ca	Ti=	Zr	Mn	Cl	Fe=	Nb	S	Sr
12	o	Si	Na	Ca	Ti	Nb	S=	Mn	Cl	Ba	Fe	La
25	O	Si	Na	Ca	Fe=	Zr	Cl	H	Al	K	Mn	Nb
26	O	Si	Na	Ca	Fe=	Zr	Cl	H	Nb=	Al	Mn	K
23	O	Si	Na	Ca	Fe=	Zr	Cl	Mn	Nb	H	K	Ce
44	O	Si	Na	Ca	Zr=	H	Fe	Cl	Ti	Mn	La	
58	o	Si	Na	Ca	Zr=	H=	Fe	Mn=	Cl	Nb	Sr	F
4	O	Si	Na	Ca	Zr	Cl	Fe	Mn	Sr=	Ti	K	Ba
6	O	Si	Na	Ca	Zr	Mn=	Cl=	Ti	Fe	Sr	Nb	S
5	O	Si	Na	Ca	Zr	Mn=	Cl	Ti=	Fe	Sr	Nb	S
1	O	Si	Na	Ca	Zr	Mn=	Cl	Fe	Nb	Ti	Ce	Y
55	O	Si	Na	Ca	Zr=	Mn	Cl=	La=	Ti	Fe	K	Sr
14	O	Si	Na	Ca	Zr	Mn	Fe	F	H	Cl	Ti	K
32	O	Si	Na	Ca	Zr	Mn	Fe=	Cl=	H	Nb	Ce	La
18	O	Si	Na	Ca	Zr	Mn=	Sr	H=	Cl=	Fe	Nb	Ti
30	o	Si	Na	Ca	Zr	Fe	H=	Mn	Cl	K	Nb	Sr
57	O	Si	Na	Ca	Zr	Fe	H=	Mn	Cl	Sr	Nb	La
15	O	Si	Na	Ca	Zr	Fe	Cl	H=	Sr	Mn	K	Nb
17	O	Si	Na	Ca	Zr	Fe	Cl=	H=	Sr	Mn	K	Nb
27	O	Si	Na	Ca	Zr=	Fe	Cl	K=	Sr=	H	Mn	Ti
22	O	Si	Na	Ca	Zr=	Fe	Cl	Mn	K=	H	Y	Al
16	O	Si	Na	Ca	Zr	Fe	Cl	Sr=	H	Mn	K	Nb

Таблица 4
(продолжение)

№ анализа в табл.1	Номер рангов											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
19	O	Si	Na	Ca	Zr	Fe	Cl	Sr=	H	Mn	K	Nb
29	o	Si	Na	Ca	Zr	Fe	Mn=	H	Cl	Sr	K	Ti
13	o	Si	Na	Ca	Zr	Fe	Mn	H=	Cl	Nb	Ce	K
24	O	Si	Na	Ca	Zr	Fe	Mn	H	Cl	Nb	Ce	Sr
31	o	Si	Na	Ca	Zr	Fe	Mn	F=	Cl	Nb	Ce	H
33	O	Si	Na	Ca	Zr	Fe=	Mn	Cl=	H	Ce	Nb	La
28	o	Si	Na	Ca	Zr	Fe	Mn=	Cl=	Sr	F	Nb	Ti
21	o	Si	Na	Mn=	Ca	Zr	F	Fe	Nb=	Ce	H	La
20	O	Si	Na	Mn=	Ca=	Zr	F	Fe	Nb=	Ce	La	Y
39	O	Si	Na	Mn	Zr	H	Ca	Fe	Ce	Nb	Cl	La
35	O	Si	Na	Mn=	Zr	Ca	Fe	Ce	Cl=	Nb	H	La
3	O	Si	Na	Zr=	Ca	Mn	Fe=	Cl	Nb	Ti	Ce	Y

2	o	Si	Na	Zr=	Ca	Mn=	Fe	Cl	Nb	Ti	Ce	Y
34	o	Si	Na	Zr=	Mn	Ca	H=	Fe	Ce=	Cl	Nb	La

Рис. 1. Обобщенная ранговая формула химического состава минералов группы эвдиалита (n = 58). Fig. 1. Generalized rank formula of chemical composition of eudialyte-group minerals (58 probes).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
O	Si	Na	Ca	Zr	Zr	Cl	Cl	Cl	Nb	K	La	K	K	Y	La	Al	Ba	Nd	Hf	Hf	Mg
100	93	71	47	33	29	21	22	21		21	16	20	21	24	17	24	14	27	43	50	50
H	H	H	Ca	Fe	Fe	Mn	Nb	Mn		Nb	Ti	Ce	Al	La	Al	Nd	Hf	Hf	Ta	Ta	Hf
2	5	12	21	26	26	19	16	14		16	14	16	17	18	9	18	14	18	14	38	50
3	Si	Mn	H	Mn	Mn	Fe	Fe	Ti		Ce	Nb	Ti	La	Ti	Sr	Ba	Ta	Ti	W	Mg	
2	7	12	24	17	17	10	10			14	14	9	15	10	9	13	14	14	14	12	
4	Na	Ti	H	Zr	H	H	Sr			Mn	Sr	Hf	Ce	Al	Nb	Sr	W	Al	Al		
5	5	10	5	7	14	9	9			7	12	9	9	6	9	11	14	9	7		
5	Zr	Mn	Ca	H	F	Sr	Cl			Fe	K	Sr	Y	Ce	Ba	Ta	Al	La	Ti		
5	5	5	5	5	9	7				7	9	7	6	6	9	8	10	9	7		
6	Fe	Na	F	Al	K	La				Cl	Al	Y	Nb	Nd	Ce	Ti	Ti	W	Ba		
5	2	3	3	7	7					5	7	7	6	6	7	5	7	9	7		
7	Cl	Ca	K	La	Ce					Ti	Y	Nb	Mg	Hf	Hf	Ce	Nd	Ba	Nd		
2	3	3	7	7						5	7	5	4	6	7	5	7	5	7		
8	Sr	Sr	Ti	Mn	H					H	S	La	Ti	Ta	Cl	Mg	Mg	Gd			
2	3	3	5	5						3	4	5	4	6	4	3	3	5			
9	Nb	S	Sr	S	K					Mg	Cl	Mg	Sr	K	K	Y	Sr	Ta			
2	2	3	3	5						3	4	4	4	4	4	3	3	5			
10	K	Nb	Ti	Fe						Sr	H	Nd	Nd	F	Ti	Nb	Nb				
2	3	3	5							3	2	4	4	2	4	3	3				
11	Nb	La	Ce	Al						La	F	H	Hf	Mg	Y	Gd	La				
2	3	3	3							3	2	2	4	2	4	3	3				
12	Zr	Al	S							W	Mg	F	H	S	Nd	Dy	Ce				
2	2	3								3	2	2	2	2	4	3	3				
13	Ce	Y	F							F	Fe	Al	Cl	Cl	Ta	W	Pr				
2	2	2								2	2	2	2	2	4	3	3				
14	Zr	Ba								Al	Ba	Mn	Fe	Sr	Mg						
2	2									2	2	2	2	2	2						
15	S	Ce	Zr	Ta	Ba	Gd				S	Ce	Zr	Ta	Ba	Gd						
2	2	2	2	2	2					2	2	2	2	2	2						
16	Y	Nd	Ba							Y	Nd	Ba		Dy	Dy						
2	2	2								2	2	2		2	2						
17	Zr	Ta								Zr	Ta			Tb							
2	2									2	2			2							

менее часто, а ниже — их частоты. Например, в третьем ранге водород встречается реже натрия, а кремний — реже водорода. Сумма $93 + 5 + 2 = 100\%$. Здесь каждое число отвечает частоте встречаемости элемента в третьем ранге. Итак, по вертикали элементы выстраиваются по убыванию частоты их встречаемости в данном ранге.

Следует обратить внимание на некоторые элементы, особенно широко разбросанные по ранговым формулам. В этом отношении выделяются титан (с 5 по 20 ранг), ниобий (с 6 по 18), водород, алюминий и стронций (интервалы рангов 2—14, 8—20 и 6—17 соответственно). Элементы, обычно считающиеся в эвдиалите ведущими, также довольно заметно варьируют свое положение в ранговых формулах. Так, положение натрия колеблется от 3 до 6 ранга, марганца — от 4 до 13, циркония — от 4 до 9 ранга. Широко варьирует также положение железа, хлора, фтора, иттрия. Использование цвета, возможное на экране компьютера, сделало бы эту картину более наглядной.

От полных ранговых формул состава эвдиалита (табл. 4) можно перейти к их сокращенным вариантам. Для этого сделаем следующие схематизации и упрощения. Во-первых, исключим из всех ранговых формул O и Si как вездесущие. Также исключаем из ранговых формул Zr (и изоморфные с ним Ti и Hf) как обязательно должныствующие быть в минерале группы эвдиалита—аллуайвита. Объединяем весь Ta с Nb, все редкоземельные элементы — с La (REE).

Естественно, что, как бы мы не ранжировали химические элементы по их атомным процентам, их распределение по структурным позициям в решетке минерала подчиняется законам кристаллохимии. Но мы не ставим своей целью в этой статье рассмотрение этих вопросов.

СОВОКУПНОСТИ МИНЕРАЛОВ ГРУППЫ ЭВДИАЛИТА ПО КАТИОНАМ

Сокращенные ранговые формулы состава проб, составленные с принятыми выше допущениями, приведены в табл. 5. Согласно минералогической традиции мы отдельно рассмотрим общности минералов по их катионам, затем — по дополнительным анионам. Поэтому в табл. 5 нет F, S, O, OH.

В табл. 5 одна проба сразу же отличается от других. Это проба № 56 минерала, экзотически богатого «H₂O» (так называемого «гидроэвдиалита»). В сокращенной ранговой формуле ее состава Ca находится на третьем месте. В остальных 57 пробах в третьей позиции всегда находится Na. Далее в этих 57 пробах на четвертом

месте находится либо Ca (50 проб), либо Mn (7 проб). На пятом месте находятся элементы, содержание которых в пробе минерала составляет около 1—3 ат.%. Их разнообразие велико. Nb и W находятся еще дальше от начала ранговой формулы, причем, судя по атомным процентам, в минерале на каждые 100 атомов приходится 0—0.68 атома Nb и 0—0.49 атома W. Это — ничтожнейшее количество каждого из них по отношению к валовому составу минерала!

Обобщая данные табл. 5, можно выделить по их составу пять классов проб, если ограничиться элементами в 4- и 5-й позициях сокращенных ранговых формул. Они указаны в табл. 6. Как видно, главными являются классы CaFe (20 проб), CaMn (16 проб) и MnCa (7 проб). Обращают на себя внимание классы CaNb (1 проба) и CaSr (2 пробы) — раньше при рассмотрении химических составов минералов группы эвдиалита они не выделялись столь явно. Наибольшие содержания W обнаружены в пробах минерала, относительно обогащенных Sr. Nb наиболее характерен для проб, относительно обогащенных одновременно Fe и Mn. На рис. 2 отчетливо выделяются минимум две корреляционные зависимости. Одна из них (точки 12-5) относится к ряду аллуайвит—эвдиалит. Здесь корреляция содержания ниобия с суммой (Fe + Mn) отрицательна. Вторая — положительна и охватывает большинство остальных проб. Две резко различные корреляционные зависимости устанавливаются также между ниобием и титаном (рис. 3). Для ряда «аллуайвит» она четко поло-

Таблица 5

Сокращенные ранговые формулы
Simplified rank formulas

№ анализа в табл.1	Номер рангов						№ анализа в табл.1	Номер рангов					
	3	4	5	6	7	8		3	4	5	6	7	8
56	Ca	Na	La	K=	Mn	Ti	44	Na	Ca	Fe	Ti	Mn	La
25	Na	Ca	Fe	Al	K	Mn	48	Na	Ca	Mn	Al	Fe	K
46	Na	Ca	Fe	K	Al	Mg	49	Na	Ca	Mn	Al	Nb	Fe
42	Na	Ca	Fe	K	Mn	Mg	52	Na	Ca	Mn	Fe	La	Nb
45	Na	Ca	Fe	K	Mn	Ti	53	Na	Ca	Mn	Fe	La	Nb
27	Na	Ca	Fe	K	=Sr	Mn	6	Na	Ca	Mn	Fe	Sr	Nb
			=										
41	Na	Ca	Fe	K	Ti	Mn	5	Na	Ca	Mn	Fe	Sr	Nb
26	Na	Ca	Fe	La	Nb	=Al	14	Na	Ca	Mn	Fe	Ti	La
22	Na	Ca	Fe	Mn	K	La	3	Na	Ca	Mn	Fe	Nb	La
30	Na	Ca	Fe	Mn	L	=K	1	Na	Ca	Mn	Fe	Nb	La
				a									
43	Na	Ca	Fe	Mn	La	K	32	Na	Ca	Mn	Fe	Nb	La
47	Na	Ca	Fe	Mn	La	Nb	2	Na	Ca	Mn	=Fe	Nb	La
13	Na	Ca	Fe	Mn	La	Nb	18	Na	Ca	Mn	=Sr	Fe	Nb
24	Na	Ca	Fe	Mn	La	Nb	10	Na	Ca	Mn	Nb	Sr	Fe
31	Na	Ca	Fe	Mn	La	Nb	9	Na	Ca	Mn	Nb	Fe	Sr
40	Na	Ca	Fe	Mn	La	Sr	8	Na	Ca	Mn	Nb	Fe	Sr
51	Na	Ca	Fe	Mn	La	Ti	11	Na	Ca	Mn	=Nb	Ce	Fe
23	Na	Ca	Fe	Mn	Nb	La	7	Na	Ca	Mn	Fe=	=Nb	Sr
58	Na	Ca	Fe	Mn	Nb	Sr	55	Na	Ca	Mn	La=	=Ti	Fe
29	Na	Ca	Fe	Mn	Sr	K	38	Na	Ca	Sr	Mn	Fe	W
57	Na	Ca	Fe	Mn	Sr	Nb	37	Na	Ca	Sr	Fe	Mn	W
28	Na	Ca	Fe	Mn	Sr	Nb	12	Na	Ca	Nb	Mn	Ba	Fe
4	Na	Ca	Fe	Mn	Sr=Ti		21	Na	Mn	=Ca	La	Fe	Nb
33	Na	Ca	Fe	Mn	La	Nb	20	Na	Mn	=Ca	La	Fe	Nb
54	Na	Ca	Fe	Mn=Y	La		36	Na	Mn	=Ca	La	Fe	Nb
15	Na	Ca	Fe	Sr	Mn	K	50	Na	Mn	Ca	Fe	La	K
16	Na	Ca	Fe	Sr	Mn	K	35	Na	Mn	Ca	Fe	La	Nb
17	Na	Ca	Fe	Sr	Mn	K	34	Na	Mn	Ca	Fe	La	Nb
19	Na	Ca	Fe	Sr	Mn	K	39	Na	Mn	Ca	Fe	La	Nb

Таблица 6

Группировка анализов
Grouping of analyses

Общее число	№ анализа в табл.1	Ранг	
		4	5
29	4, 13, 15-17, 19, 22-31, 33, 40-47, 51, 54, 57, 58	Ca	Fe

18	1-3, 5-11, 14, 18, 32,48, 49, 52, 53, 55	Ca	Mn
2	37, 38	Ca	Sr
1	12	Ca	Nb
7	20, 21, 34-36, 39, 50	Мп	Ca
1	Ан. 56		

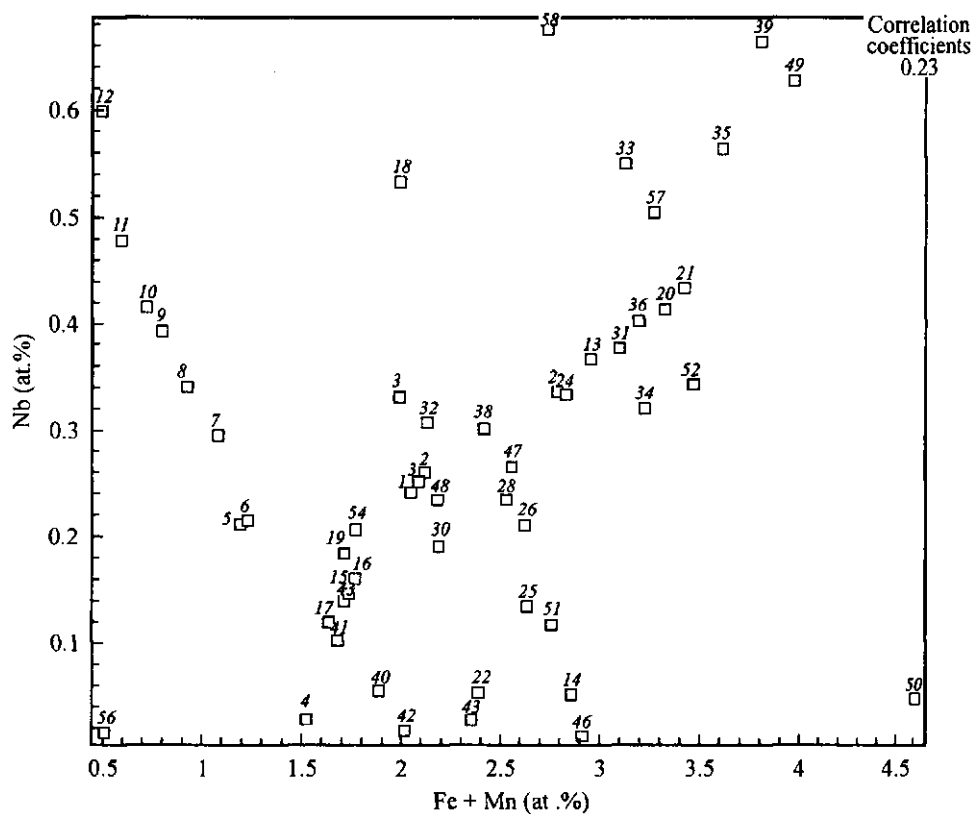


Рис. 2. Содержания Nb и (Fe + Mn) в 58 пробах минералов группы эвдиалита.

Fig. 2. Contents of Nb and (Fe + Mn) in 58 probes of eudialyte.

жительна. Для остальных проб корреляция отсутствует, при этом максимальное содержание Nb достигает 0.7 ат.%. Очевидно, что схема вхождения ниобия в эвдиалит и аллуайвит не единственна.

Экзотические и малые по их количеству Nb и W локализируются в специфической структурной позиции M(3) — как бы ловушке уникальностей, а сами Nb- и W-содержащие минералы могут рассматриваться, на наш взгляд, как химико-структурные разновидности минералов группы эвдиалита. Далее, некоторые тонкие особенности химического состава эвдиалита и расселения элементов в структуре минерала заставляют удваивать параметр c ее элементарной ячейки. Такие минералы также можно, по нашему мнению, рассматривать как химико-структурные разновидности эвдиалита, дополняя их название словом «модулированный» («modulated»).

Вообще же, нам представляется, что один и тот же минерал может образовывать в процессе своей кристаллизации и последующей эволюции равно как свои химические, так и структурно-химические и структурные разновидности, так как реакция структуры кристалла на среду разнообразна и неотделима от реакции его состава. Примеры такой изменчивости состава минерала и разного расселения в нем химических элементов по его разным структурным позициям детально рассмотрены для гранатов типа гроссуляра и андрадита (Shtukenberg *et al.*, 2001, 2002). Меняется даже сингония минерала, но он по-прежнему остается по всем своим признакам и свойствам гроссуляром или андрадитом. Никто не относит все эти разные по структурным особенностям варианты минерала к самостоятельным или новым минеральным видам. Другими подобными примерами вариаций состава и структуры минерала в рамках одного минерального вида являются анальцимы, индиалиты, кордиериты, везу-

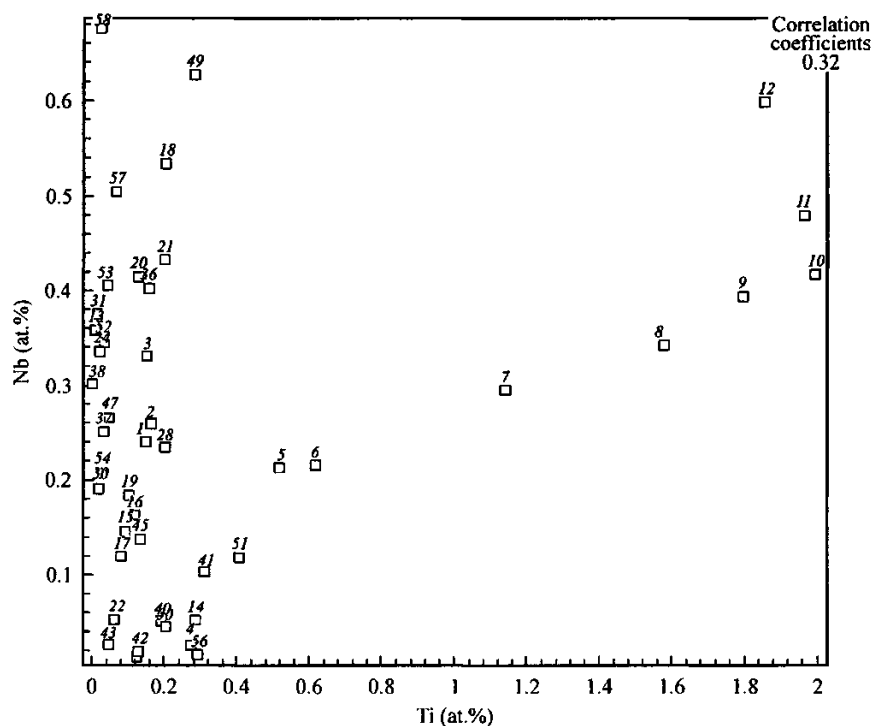


Рис. 3. Содержания Nb и Ti в 58 пробах минералов группы эвдиалита.

Fig. 3. Contents of Nb and Ti in 58 probes of eudialyte.

вианы, цис- и трансоктаэдрические слюды (Булах, 2000). И далее, ортоклаз и микроклин относят к разным минералам только в соответствии со старой традицией (см. Nickel and Grice, 1999). В сущности они являются химико-структурными разновидностями одного и того же минерального вида.

СОВОКУПНОСТИ МИНЕРАЛОВ ГРУППЫ ЭВДИАЛИТА ПО АНИОНАМ

В составе минералов группы эвдиалита установлены F, O, OH, S, H₂O. Ясно, что различие анализов по этим компонентам подразделит уже выделенные по катионам совокупности и еще более увеличит их общее число. В приведенной выше схеме появятся новые рубрики. К сожалению, большинство анализов минералов группы эвдиалита выполнялось без определения содержаний F, H₂O⁺, H₂O⁻. Это и вынуждает нас пока остановить рассмотрение вопроса.

Нельзя не обратить внимания и на другой факт — на несбалансированность зарядов в формулах эвдиалита, приводимых в справочниках и оригинальных работах. Чтобы достичь компенсации зарядов, приходится радикально менять пропорцию анионов и молекул воды в формулах (табл. 7). Все выглядит так, будто бы роспись дополнительных анионов и молекул воды в оригинальных формулах минералов случайна, не подтверждена ничем и не обдумана. Насколько же точно отвечают формулы минералов группы эвдиалита в таком их виде реальному составу минерала? К сожалению, неясности такого рода приводят к ошибкам в толковании состава минерала (Булах, Золотарев, 2000; Булах и др., 2001; Hawthorne, 2002; Булах, 2002).

Таблица 7

Оригинальные и исправленные значения коэффициентов в формулах
Original and corrected numbers a.p.f.u.

Минерал	Формула в оригинале	Исправленная формула
Эвдиалит Eudialyte	$\text{Na}_{15}\text{Ca}_6\text{Fe}_3\text{Zr}_3\text{Si}$ $\text{Si}_{25}\text{O}_{73}(\text{O},\text{OH},\text{H}_2\text{O})_3(\text{Cl},\text{OH})_2$	$\text{Na}_{15}\text{Ca}_6\text{Fe}_3^{2+}\text{Zr}_3\text{Si}$ $\text{Si}_{25}\text{O}_{73}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_2(\text{Cl},\text{OH})_2$ (if Fe is only bivalent) or $\text{Na}_{15}\text{Ca}_6\text{Fe}_3\text{Zr}_3\text{Si}$ $\text{Si}_{25}\text{O}_{73}\text{O}_{1,5}(\text{H}_2\text{O})_{1,5}(\text{Cl},\text{OH})_2$ (if Fe is only trivalent)
Кентбруксит Kentbrooksite	$\text{Na}_{15}\text{Ca}_6\text{Mn}_3\text{Zr}_3\text{Nb}$ $\text{Si}_{25}\text{O}_{73}(\text{O},\text{OH},\text{H}_2\text{O})_3(\text{F},\text{Cl})_2$	$\text{Na}_{15}\text{Ca}_6\text{Mn}_3\text{Zr}_3\text{Nb}$ $\text{Si}_{25}\text{O}_{73}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{F},\text{Cl})_2$
Хомяковит Khomyakovite	$\text{Na}_{12}\text{Sr}_3\text{Ca}_6\text{Fe}_3\text{Zr}_3\text{W}$ $\text{Si}_{25}\text{O}_{73}(\text{O},\text{OH},\text{H}_2\text{O})_3\text{Cl} \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{Na}_{12}\text{Sr}_3\text{Ca}_6\text{Fe}_3\text{Zr}_3\text{W}$ $\text{Si}_{25}\text{O}_{73}\text{O}_3\text{Cl} \cdot \text{OH}$ (if Fe is only bivalent) or $\text{Na}_{12}\text{Sr}_3\text{Ca}_6\text{Fe}_3\text{Zr}_3\text{W}$ $\text{Si}_{25}\text{O}_{73}\text{O}_3\text{O} \cdot \text{O}$ (if Fe is only trivalent)
Онейлит Oneilite	$\text{Na}_{15}\text{Ca}_3\text{Mn}_3\text{Fe}_3\text{Zr}_3\text{Nb}$ $\text{Si}_{25}\text{O}_{73}(\text{O},\text{OH},\text{H}_2\text{O})_3(\text{Cl},\text{OH})_2$	$\text{Na}_{15}\text{Ca}_3\text{Mn}_3\text{Fe}_3\text{Zr}_3\text{Nb}$ $\text{Si}_{25}\text{O}_{73}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})(\text{Cl},\text{OH})_2$ (if Fe is only bivalent) or $\text{Na}_{15}\text{Ca}_3\text{Mn}_3\text{Fe}_3\text{Zr}_3\text{Nb}$ $\text{Si}_{25}\text{O}_{73}\text{O}_2(\text{OH})(\text{Cl},\text{OH})_2$ (if Fe is only trivalent)
Фекличевит Feklichevite	$\text{Na}_{12}\text{Ca}_9\text{Fe}_2\text{Zr}_3\text{Nb}$ $\text{Si}_{25}\text{O}_{73}(\text{OH},\text{H}_2\text{O},\text{Cl},\text{O})_5$	$\text{Na}_{12}\text{Ca}_9\text{Fe}_2\text{Zr}_3\text{Nb}$ $\text{Si}_{25}\text{O}_{73}(\text{OH},\text{Cl})_5$ (if Fe is only bivalent) or $\text{Na}_{12}\text{Ca}_9\text{Fe}_2\text{Zr}_3\text{Nb}$ $\text{Si}_{25}\text{O}_{73}(\text{OH},\text{Cl})_3 \cdot \text{O}_2$ and $\text{Na}_{12}\text{Ca}_9\text{Fe}_2\text{Zr}_3\text{Nb}$ $\text{Si}_{25}\text{O}_{73}(\text{O}_3)(\text{OH},\text{Cl})_1 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (if Fe is only trivalent)

ГИДРОЭВДИАЛИТ

Проба № 56 минерала, названного в его описании «гидроэвдиалитом», стоит особняком в табл. 4. В первом ранге, как всегда, находится кислород. Но за ним следует не кремний, а водород. Различия продолжают и далее. Кальций является главным катионом, в то время как натрий занимает место в более далеких рангах. Обращает на себя внимание низкий ранг марганца и крайне невысокое содержание в минерале железа. Также особняком стоит проба 56 и в табл. 5. У нас нет данных, чтобы объяснить эти особенности состава «гидроэвдиалита».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше мы обращались только к той части метода RHA, которая обозначена литерой R. Символ H обозначает меру сложности (H — информационная энтропия) системы (в данном случае система — это химический состав минералов группы эвдиалита). Символ A (A — анэнтропия) является мерой чистоты системы. Приемы расчета численных значений величины H и A и их истолкования были даны ранее на примере пироксенов и скаполитов (Петров, Золотарёв, 2000; Петров и др., 2000; Золотарёв и др., 2003).

Изложенная система расчетов и составления ранговых формул состава минералов дает возможность наглядно сопоставлять друг с другом аналитические данные любых по численности выборок. Хотя она не учитывает кристаллохимию рассматриваемых минералов, в приложении к минералам группы эвдиалита выполненная работа позволила выявить важнейшие их химические группировки — классы. Наглядно

проявилось присутствие W в пробах, относительно обогащенных Sr. Nb встречается в пробах, обогащенных Mn и Fe. Выявлены две резко различные корреляционные зависимости между содержанием ниобия и суммой железа и марганца. Но пока нет достаточных статистических данных, чтобы выявить геохимические закономерности вхождения W и Nb в минералы группы эвдиалита разного состава и в разной парагенетической ассоциации.

В данной работе мы стремились показать лишь принцип исследования. Мы умышленно не используем здесь каких-либо названий старых или новых минералов, за исключением двух ключевых терминов — эвдиалит и аллуайвит, — чтобы не превратить эту статью в дискуссию по классификации и номенклатуре группы эвдиалита (Бокий, 1998; Khomyakov, 2000; Johnsen et al., 2003).

Обратим внимание на то, что от атомных процентов, используемых при получении ранговых формул, один шаг до химической формулы минерала. А далее встает вопрос, не нагляднее ли в минералогии (и геохимии) вообще давать составы минералов именно в атомных процентах (см. табл. 3)? Конечно, удобство старой формы записи химического состава минералов в виде весовых процентов окислов остается по-прежнему несомненным в работах прикладного характера.

Авторы благодарны О. А. Агеевой и И. А. Екименковой за предоставленные анализы и другие материалы.

Список литературы

- Агеева О. А.* Изоморфный ряд эвдиалит—аллуайвит // *Минералогические музеи в XXI веке. Материалы международного симпозиума.* СПбГУ: ВМО РАН СПб. 2002. С. 233—234.
- Бокий Г. Б.* Классификация природных силикатов. Кристаллохимия. М.: ВИНТИ, 1998. Т. 31. 179 с.
- Булах А. Г.* Руководство и таблицы для расчета формул минералов. М.: Недра. Первое изд., 1964. 131 с; второе изд., 1967. 146 с.
- Булах А. Г.* О воспроизводимости результатов химического анализа минералов и степени достоверности их формул (на примере апатита) // *Минер. журн.* 1984. № 4. С. 87—92.
- Булах А. Г.* Критерии самостоятельности минерала и могут ли быть у минерала структурные и химико-структурные разновидности // *Минералогические музеи в XXI веке. Материалы международного симпозиума.* СПбГУ: ВМО РАН. СПб. 2000. С. 26—28.
- Булах А. Г.* Новое — девятое издание «Минералогических таблиц Штрунца» 2001 года (и опять о формулах минералов — как же их писать?) // *ЗВМО.* 2002. № 3. С. 117—118.
- Булах А. Г., Золотарёв А. А.* Новый словарь минеральных видов, по М. Флейшеру (к проблеме унификации формул минералов) // *ЗВМО.* 2000. № 2. С. 128—130.
- Булах А. Г., Золотарёв А. А., Бритвин С. Н.* К истории открытия новых минералов и взгляд в будущее // *ЗВМО.* 2001. № 6. С. 42—53.
- Булах А. Г., Кривовичев В. Г., Золотарёв А. А.* Термодинамические расчеты в минералогии и геохимии. Формулы минералов. СПб.: Изд. СПбГУ, 1995. 260 с.
- Гольшев В. М., Симонов В. И., Белов Н. В.* Кристаллическая структура эвдиалита // *Кристаллография.* 1971. Т. 16. № 1. С. 93; 1972. Т. 17. № 6. С. 119.
- Дорфман М. Д., Илюхин В. В., Бурова Т. А.* Барсановит — новый минерал // *Докл. РАН.* 1963. Т. 153. № 5. С. 1164—1167.
- Екименкова И. А.* Изоморфизм и структурные особенности минералов группы эвдиалита и генетические типы поздней циркониевой минерализации в щелочных массивах. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. МГУ, 2000. 149 с.
- Золотарёв А. А., Петров Т. Г., Мошкин С. В.* Особенности химического состава минералов группы скаполита // *ЗВМО.* 2003. № 4. С. 65—86.
- Минералы.* Справочник / Под ред. Ф. В. Чухрова. Т. III. Вып. 2. М.: Наука, 1981. С. 227—240.

*Мошкин С. В., Шелемотов А. С., Богачев В. А., Иваников В. В., Петров Т. Г.,
Филлипов Н. Б., Франк-Ка-менецкий Д. А. «PETROS» — новый программный
комплекс для обработки и анализа петрогеохимической*

информации. Петрография на рубеже XXI века. Итоги и перспективы. Т. 1. Общие проблемы петрографии. Материалы 2-го Всерос. петрографического сов. 27—30 июня 2000 г. Сыктывкар, 2000. С. 285—287.

Никель Е. Х., Грайс Д. КНМНМ ММА: Правила и руководства по номенклатуре минералов, 1998 // ЗВМО. 1999. № 2. С. 51—65.

Пеков И. В., Екименкова И. А., Чуканов Н. В., Расцветаева Р. К., Коненкова Я. Н., Пскова Н. А., Задов А. Е. Фекличевит — новый минерал группы эвдиалита из Ковдорского массива, Кольский полуостров // ЗВМО. 2001. № 3. С. 55—65.

Петров Т. Г. Универсальная схема представления химических анализов для создания фактографических информационно-поисковых систем в области геохимии // Вестник ЛГУ. 1972. № 18. С. 51—58.

Петров Т. Г. Информационный язык для описания составов многокомпонентных объектов // Научно-техническая информация. 2001. № 3. С. 8—18. См. также: <http://www.geology.pu.ru/niizk/RHA.html>; <http://mosh-kin.chat.ru/Petrl.htm> (2002).

Петров Т. Г., Золотарёв А. А. Возможности классифицирования минералов с использованием информационного языка РНА (на примере моноклинных пироксенов) // ЗВМО. 2000. № 3. С. 117—128.

Петров Т. Г., Золотарёв А. А., Мошкин С. В. Сколько минералов требуется для описания составов скаполита? // Минералогические музеи в XXI веке. Материалы международного симпозиума. СПбГУ: ВМО РАН СПб. 2000. С. 84—85.

Bulach A. G. Berechnung von Mineralformeln. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig, 1970. 166 s.

Fairbairn H. W. e. a. A cooperative investigation of precision and accuracy in chemical, spectrochemical and modal analysis of silicate rocks. // USA Geological Survey Bulletin, 1951. 980 p.

Johnsen O. A., Gault R. A. Chemical variations in eudyalite // Neues Jahrb. Miner. Abh. 1997. Vol. 171. S. 215—237.

Johnsen O. A., Gault R. A. Crystall chemistry of eudialyte group // Canad. Miner. 1999a. Vol. 37. P. 865—891.

Johnsen O. A., Grice J. D., Gault R. A. Kentbrooksite from the Kangerdlugssuak intrusion, East Greenland, a new Mn-REE-Nb-F end-member in a series within the eudialyte group: Description and crystal structure // European J. of Miner. 1998. Vol. 10. P. 207—219.

Johnsen O. A., Gault R. A., Grice J. D., Ercit S. Khomyakovite and mangan khomyakovite, two new members of eudialyte group from Mont Saint-Hilaire, Quebec // Canad. Miner. 1999b. Vol. 37. P. 893—899.

Johnsen O. A., Grice J. D., Gault R. A. Oneilite: A new Ca-deficient and REE-rich member of eudialyte group from Mont Saint-Hilaire, Quebec, Canada // Canad. Miner. 1999. Vol. 37. P. 1111—1117.

Johnsen O. A., Gault R. A., Grice J. D. Ferrokentbrooksite, a new member of eudialyte group from Mont Saint-Hilaire, Quebec // Canad. Miner. 1999. Vol. 37. P. 893—899.

Johnsen O. A., Ferraris G., Gault R. A., Grice J. D., Kampf A. R., Pekov I. V. Nomenclature of eudialyte-group minerals, 2003. // In press.

Khomyakov A. P. New Species And Rational Mineralogical Nomenclature. Abstract volume of IV meeting of the M & M commission of IMA, 2000. Melbourne.

Mandarine J. A. Fleisher's Glossary of Mineral Species. Tucson: The Mineralogical Record Inc. 1999. 225 p.

Shtukenberg A. G., Punin Yu. O., Frank-Kamenskaya O. V., Kovalev O. G., Sokolov P. B. On the origin of anomalous birefringence in grandite garnets // Miner. Mag. 2001. Vol. 65(3). P. 445—449.

Shtukenberg A. G., Popov D. Yu., Punin Yu. O. An application of the point-dipole model to the problem of optical anomalies in grandite garnets // Miner. Mag. 2002. Vol. 66(2). P. 275—286.

Поступила в редакцию

25 ноября 2002 г.