

И. В. ГИНЗБУРГ

ГАСТИНГСИТ ЗОНЫ ЩЕЛОЧНО-ГРАНИТНОГО
МЕТАСОМАТОЗА И ИЗОМОРФИЗМ В МОНОКЛИННЫХ
АМФИБОЛАХ

Гастингсит является типоморфным минералом экзоконтактовых образований щелочных гранитов Кольского полуострова. Он развит в измененных гранитоидах, габброидах и гнейсах и представляет собой продукт контактового метасоматоза (Гинзбург, 1958). Химические и петрохимические преобразования гранитоидов, габброидов и гнейсов в экзоконтактовом ореоле щелочных гранитов, показывая направленность перераспределения веществ, отчасти характеризуют и обстановку образования гастингсита. Изменения минерального состава пород в экзоконтакте до некоторой степени отображают физико-химические условия образования этого минерала.

Таблица 1

Разновидности гнейзов-метасоматитов

Зона	По морфологическим признакам	По минеральному составу*	
1	Обычные гнейсы	Гранато-биотитовые	
2	Инъекционные гнейсы	Материал субстрата	Биотитовые, гранато-биотитовые, гастингсит-биотитовые
		Материал инъекции	Гастингсит-биотитовые, биотит-гастингситовые, гастингситовые
3	Щелочные гнейсы	Гастингсит-биотитовые, биотит-гастингситовые, гастингситовые, магнетит-гастингситовые	
4	Порфиробластические гнейсы	Гастингситовые	
5	Щелочные гранито-гнейсы	Гастингсит-эгирин-авгитовые, эгирин-авгит-гастингситовые, эгирин-авгитовые	

* Кроме указанных здесь минералов, в составе пород принимают участие кварц, микроклин, плагиоклаз (№ 12-18), а также апатит, циркон и др.

Так называемые щелочные гнейсы-метасоматиты, выделяющиеся среди других пород экзоконтакта наиболее полной «метасоматической колонкой» (табл. 1), слагают ряд зон, сменяющих друг друга по мере приближения к контакту со щелочногранитным массивом.

Минеральный состав изменяется здесь главным образом за счет преобразований в ряду темноцветных минералов¹, причем по мере приближения к контакту со щелочными гранитами наиболее богатый водой биотит заменяется менее богатым ею гастингситом, а затем — безводным эгирином-авгитом.

Такая последовательность темноцветных минералов свидетельствует о понижении потенциала H_2O в сторону контакта со щелочными гранитами, что, как полагают, обусловлено возрастанием температуры в том же направлении. Более того, в наблюдаемой смене темноцветных минералов по мере приближения к щелочногранитному массиву усматривается: 1) общее понижение потенциала водорода, если не считать местного его повышения при развитии гастингсита за счет граната обычных гнейсов, и 2) возрастание потенциала кислорода, что подчеркивается появлением

Таблица 2

Химические анализы гнейсов-метасоматитов

Оксиды	1*	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	70,86	71,85	74,08	72,86	67,55	78,20	69,35
TiO ₂	0,41	0,54	0,31	0,27	0,67	0,31	0,61
Al ₂ O ₃	12,45	12,04	12,06	13,47	11,37	9,67	13,69
Fe ₂ O ₃	1,36	2,94	1,03	1,02	4,18	0,11	1,36
FeO	3,50	2,87	1,62	0,71	3,82	5,40	3,17
MnO	0,06	0,08	0,05	0,03	0,16	0,09	0,08
MgO	0,37	0,64	0,30	0,41	0,89	0,21	1,36
CaO	1,03	1,67	2,74	1,15	1,94	0,32	2,90
Na ₂ O	2,52	3,16	2,02	4,03	3,66	1,78	4,27
K ₂ O	6,09	3,34	4,59	5,20	4,39	3,43	2,94
P ₂ O ₅	0,61	0,11	0,38	0,26	0,75	—	0,20
H ₂ O ⁺	0,25	0,31	0,21	0,02	0,23	0,40	0,20
H ₂ O ⁻	0,15	0,04	0,17	0,17	0,08	0,20	0,20
Сумма	99,72	99,59	99,56	99,60	96,69	100,12	100,33

Аналитик О. П. Острогорская.

* 1 — гранато-биотитовый гнейс, обогащенный микроклином; 2 — биотитовый гнейс — материал субстрата; 3 — биотит-гастингситовый гнейс — материал инъекций; 4 — гастингсит-биотитовый гнейс-метасоматит; 5 — магнетит-гастингситовый гнейс-метасоматит; 6 — биотит-гастингситовый гнейс с прожилками кварца — инъекционный гнейс; 7 — гастингсит-эгирин-авгитовый гнейс-метасоматит (гранито гнейс). Анализы 1 — 5 — по данным автора (район горы Исакиевский бор и оз. Кальмозеро), анализ 6 — по данным А. Т. Соловьева, анализ 7 — по данным А. А. Чумакова (район верховой рек Ровы и Сахарик).

¹ Из светлоокрашенных минералов слабо изменяется только плагиоклаз, который обогащается натрием.

граната и магнетита при отсутствии эгирин-авгита у контакта с гранитами¹.

Итак, по наличию или отсутствию ОН в темноцветных минералах, сопутствующих гастингситу, выявляется существенная роль водорода в образовании этого минерала, а также намечаются верхний и нижний пределы давления водорода (первый — по исчезновению гастингсита, второй — по появлению эгирин-авгита). Изменение потенциала водорода отражается в свою очередь на составе гастингсита: у минерала, ассоциирующегося с эгирин-авгитом, меньше водорода, чем у минерала, не связанного с ним и более удаленного от контакта (см. ниже).

В целом изменение окислительного и восстановительного потенциалов характеризуется некоторой неравномерностью. Это выражается в колебаниях содержания биотита, гастингсита и эгирин-авгита в пределах минералогических разновидностей пород (табл. 1), а также в неустойчивом изменении содержания окислов в них (табл. 2), особенно FeO, Fe₂O₃ и отчасти H₂O⁺. Изменение окислительного и восстановительного потенциалов связано с различной подвижностью кислорода и водорода, что, согласно работам Д. С. Коржинского (1940, 1953), И. А. Островского (1956), Н. И. Хитарова (1958) и других, обусловлено разной диффузионной способностью, обратной величинам ионных радиусов этих элементов,

ОПТИЧЕСКИЕ И КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДВУХ ГАСТИНГСИТОВ

Два рассматриваемых здесь гастингсита псевдоодносны — с очень малым углом оптических осей (табл. 3). Считается, что гастингситы с малым $2V$ относятся к ферро- и ферригастингситам, а с большим $2V$ — к ферма-маггастингситам (Billings, 1928, Трёгер, 1958). Однако это не всегда так. Например, псевдоодносный гастингсит I (табл. 3) является мафегастингситом, а гастингсит с $2V = 46^\circ$ (Батиева, Бельков, 1953) феррогастингситом, т. е. по углу оптических осей нельзя безошибочно судить о суммарной железистости гастингсита. Возрастание светопреломления гастингситов (как и у других амфиболов) тоже обычно связывают с увеличением суммарного количества железа, хотя самостоятельная роль Fe³⁺ и Fe²⁺ здесь не вполне ясна. Так, гастингсит I имеет меньше показатели

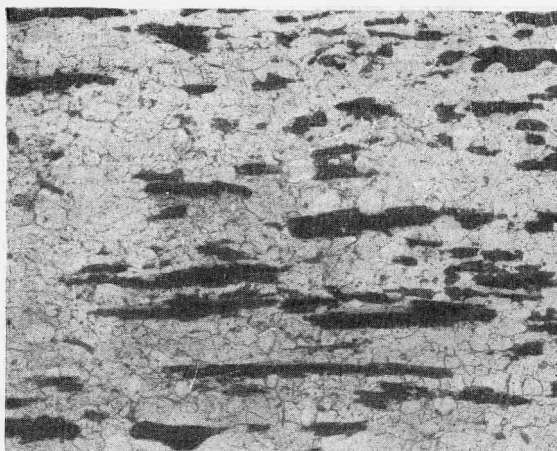


Рис. 1. Гранобластовая структура щелочного гранито-гнейса с линейной ориентировкой гастингсита (черное) в кварц-полевошпатовой основной массе (светлое); разрез в плоскости гнейсовидности ($\times 20$, без анализатора)

¹ В пределах щелочногранитного массива по смене темноцветных минералов (арфведсонит в центре, эгирин или магнетит — по периферии) также устанавливается возрастание потенциалов водорода в направлении от контакта. Непосредственный эндоконттакт имеет наиболее высокий потенциал кислорода.

преломления, чем гастингсит II (табл. 3), но оба они характеризуются преобладанием Fe^{2+} над Fe^{3+} . Точных данных о соотношениях между количеством Fe^{3+} и О или ОН и Fe^{2+} не имеется, но известно, что у богатой Fe^{3+} базальтической роговой обманки (утратившей группу ОН после своего образования) светопреломление больше, чем у обыкновенной роговой обманки. В нашем примере у гастингсита I (с меньшим светопреломлением) содержание ОН меньше, чем у гастингсита с большим светопреломлением (табл. 3—5), т. е. по светопреломлению нельзя определить относительное содержание ОН у гастингсита. Эти данные показывают, что состав гастингсита (в частности, содержание в нем железа) не вполне определяет его оптические константы. Последние в некоторой мере зависят также от степени упорядоченности кристаллической решетки минерала (Гинзбург, Белова, 1960).

Таблица 3
Свойства анализированных гастингситов

Показатели	Гастингсит I* (см. химический анализ в табл. 4)	Гастингсит II** (см. химический анализ в табл. 5)
Средний размер зерен, мм	0,6 × 0,3 × 0,1	7 × 4 × 1
Форма зерен	Призматическая, без (010)	Брусчатая, с широкой гранью (010)
Включения (редкие)	Апатита	
Срастания (редкие)	С эгирин-авгитом и биотитом	С биотитом
Цвет в зернах	Черный	
Цвет порошка	Синева-зеленый	Зеленый
Оптическая ориентировка	b = Nm; cNg = 15—25°	b = Nm; cNg = 10—18°
Плеохроизм Ng	Сине-зеленый	Сине-зеленый
Nm	Зеленый	Светло-зеленый
Np	Светло-зеленый	Светло-желтый
Светопреломление Ng	1,702 — 1,698	1,718 — 1,712
Nm	—	1,710 — 1,706
Np	1,694 — 1,690	1,702 — 1,698
Осность	Псевдоодносный	
Материалы	И. В. Гинзбург	Ю. С. Неуструева

* Из щелочных гранито-гнейсов (рис. 1), находящихся вблизи непосредственного контакта с массивом щелочных гранитов (юго-восточнее оз. Кальмозеро, в верховье р. Иоканьга; Западные Кейвы).

** Из порфириобластических щелочных гнейсов (рис. 2), расположенных в кровле не вскрытого на поверхности массива щелочных гранитов (бассейн р. Югоньки, притока Пооя; Восточные Кейвы).

Связь между составом гастингситов и химизмом среды, в которой они выделялись, напротив, довольно четкая. Она намечается по одинаковой направленности изменения содержания химических элементов в породах и минералах, при приближении к щелочногранитному массиву.

Выше упоминалось о пониженном содержании ОН в гастингситах I (табл. 4), встречающемся совместно с эгирин-авгитом вблизи щелочных гранитов, и о повышенном содержании ОН в гастингситах II (табл. 5),

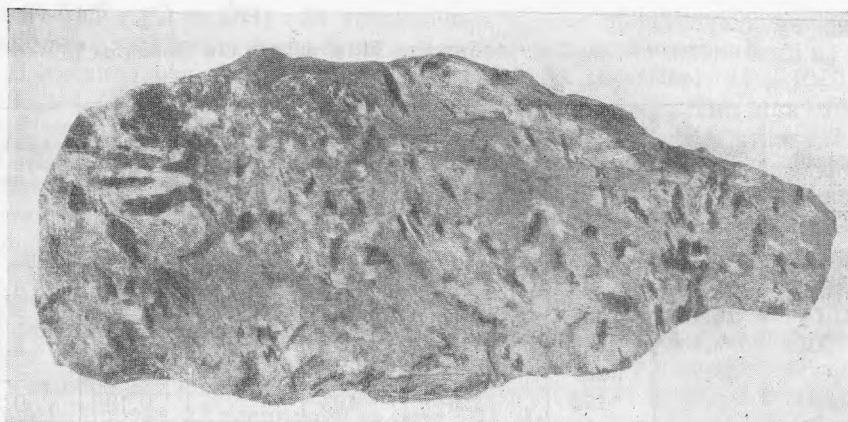


Рис. 2. Порфиробластический гнейс с беспорядочно расположенными порфиробластами гастингсита (черное) в кварц-полевошпатовой основной массе (светлое); скол в плоскости гнейсовидности

Таблица 4

Химический анализ гастингсита I и расчет его формулы *
(материал автора, аналитик Ю. С. Нестерова)

Окислы	Весовые %	Молекулярные количества	Примесь апатита, атомное количество	Атомное кол-во катионов	Сумма Z + Y	Число атомов катионов	Сумма валентности катионов
SiO ₂	41,02	6 830	—	6 830	13 625	6,52	26,08
TiO ₂	0,59	75	—	75		0,07	0,28
Al ₂ O ₃	9,65	946	—	1 892		1,80	5,40
Fe ₂ O ₃	9,00	564	—	1 128		1,08	3,24
FeO	17,30	2 408	—	2 408		2,30	4,60
MgO	5,21	1 292	—	1 292		1,23	2,46
MnO	1,71	241	—	241		0,23	0,46
CaO	10,83	1 939	107	1 832		1,75	3,50
Na ₂ O	1,43	232	—	464		0,44	0,44
K ₂ O	1,61	171	—	342		0,33	0,33
P ₂ O ₅	0,46	32	64	—	—	—	—
F	Следы	—	—	—	—	15,75	46,79
H ₂ O ⁺	0,88	489	21	(936)	—	(ОН—0,89)	—
H ₂ O ⁻	0,14	71	—	—	—	—	—
Сумма	99,83	—	—	—	—	—	—

Делитель: $13\ 625:13 = 1048,07 = 1048,1 = 1048$.

Определение ОН: $46,79 - 24 = 22,79$; $24 - 22,79 = 1,21 = \text{ОН}$; имеется 0,89 ОН; недостаток восполняется за счет H₂O⁻.

* Пересчет анализа минерала на 24-кратное количество кислорода и отвечающая ему формула приведены в другой работе (Гинзбург, Белова, 1960).

Таблица 5

Химический анализ гастингсита II и расчет его формулы *
(материал Ю. С. Неуструева, анализик Егорова)

Оксиды	Весовые %	Молекулярное количество	Атомное количество		Сумма Z+Y	Число атомов катионов	Сумма валентности катионов
			кислорода	катионов			
SiO ₂	36,72	6 114	12 228	6 114	13 387	5,94	23,76
TiO ₂	1,47	184	368	184		0,18	0,72
Al ₂ O ₃	14,11	1 384	4 152	2 768		2,68	8,04
Fe ₂ O ₃	7,13	446	1 338	892		0,87	2,61
FeO	23,24	3 236	3 236	3 236		3,14	6,28
MgO	0,78	193	193	193		0,19	0,38
MnO	0,58	82	82	82		0,08	0,16
CaO	8,20	1 462	1 462	1 462		1,42	2,84
Na ₂ O	0,68	110	110	220		0,21	0,21
K ₂ O	3,27	347	347	694		0,67	0,67
H ₂ O ⁻	0,46	—	—	—	15,38	45,67	
H ₂ O ⁺	2,75	1 521	1 521	(3 042)	(2,95)	—	
Cl	0,10	29	15	—	0,03	—	
F	0,96	505	252	—	0,49	—	
Сумма	100,45	—	25 304	—	—	—	
-O=F ₂ -Cl ₂	0,47	—	—	—	—	—	
Сумма	99,98	—	—	—	—	—	

Делитель: $13\ 387:13 = 1029,15 = 1029$.

Определение OH: $45,67 - 24 = 21,67$; $24 - 21,67 = 2,33$;

0,33 OH в тетраэдре $2,00 - (0,49 + 0,03) = 1,48$ OH.

* Анализ минерала впервые был опубликован в кн.: «Геология СССР», т. 27, ч. 1. Гостеолнаучтехиздат, 1958, стр. 192.

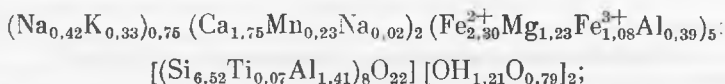
встречающемся без эгирин-авгита на некотором удалении от щелочных гранитов. В гастингсита I, ассоциирующемся с эгирин-авгитом и плагиоклазом наиболее кислого состава, как и во всей породе (см. табл. 2, анализ 7) натрий преобладает над калием; в гастингсита II проявлена обогащенность зон, удаленных от контакта, калием (см. табл. 2), минералогически выраженная в присутствии повышенных количеств микроклина. Преобладание магния в гастингсита I связано с накоплением магния вблизи щелочных гранитов. Преобладание Fe²⁺ в гастингсита II определяется, как установлено петрохимически, с накоплением этого элемента на некотором удалении от щелочных гранитов. Подобная связь состава амфиболов и состава заключающих их пород, образующих единый комплекс, не раз отмечалась в литературе (Айнберг, 1930; Deer, 1938; Larsen, Dräsin, 1950; Buddington, Leonard, 1953; Rosenzweig, Watson, 1954; и др.).

При расчете химических анализов гастингситов учтен прием, предложенный И. Д. Борнеман-Старынкевич (1960). В типовой формуле амфиболов $X_{2-3}Y_5[Z_8O_{22}][OH]_2$ в катионной части постоянны Y и Z, сумма которых равна 13, а сумма O + OH = 24. При равенстве двух отношений

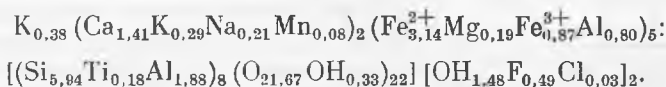
$(Y + Z) : 13$ и $(O + OH) : 24$ вычисления можно производить на основе 24 анионов или 13 катионов. В наших гастингситах эти отношения не равны. В гастингситах I отношение $(O, OH) : 24 = 24974 : 24 = 1040,6 = 1041$, а $(Y + Z) : 13 = 13625 : 13 = 1048,07 = 1048$. Так как $1041 < 1048$, расчет должен быть произведен на основе 24 анионов, что и сделано нами ранее (Гинабург, Белова, 1960). Здесь же в виде опыта и для удобства сопоставления с гастингситом II расчет произведен на основе 13 катионов, тем более что числа 1041 и 1048 близки (табл. 4). В гастингситах II отношение $(O, OH) : 24 = 25304 : 24 = 1054,3 = 1054$, а отношение $(Y + Z) : 13 = 13387 : 13 = 1029,15 = 1029$. Так как $1054 > 1029$, расчет производим на основе 13 катионов.

В гастингситах I (табл. 4) избыток кислорода против 22 в тетраэдрах вынесен в позицию гидроксила, на основании того, что нахождение кислорода в положении OH общепризнано. В гастингситах II (табл. 5) недостаток кислорода против 22 восполнен за счет OH. Замещение O на OH, отмеченное Махачки, хотя и исключается для кремнекислородных тетраэдров (Соболев, 1949), но допускается в окружении алюминия, входящего в тетраэдры алюмосиликатов (Белов, 1951). Подобное замещение принимается по рентгено-структурным соображениям в кремне-кислородных тетраэдрах афвиллита (Megaw, 1952) и предполагается для одного из гастингситов Адирондака (Nicholles a. Zuman, 1955), а также для актинолитов (Zussman, 1955; Hutton, 1956 и др.). Вхождение избыточной «воды» в решетку амфиболов и в форме оксония H_3O^{1+} (Ernst, 1958; Виноградская, 1959; Борнеман-Старынкевич, 1960), представляется автору вполне вероятным¹. В результате пересчетов получены следующие формулы гастингситов (без учета H_3O):

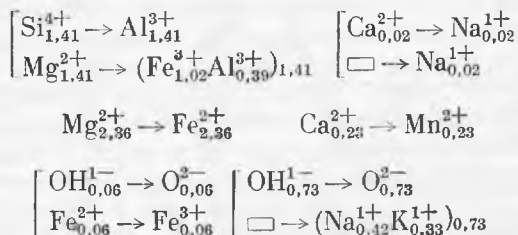
Гастингсит I



Гастингсит II



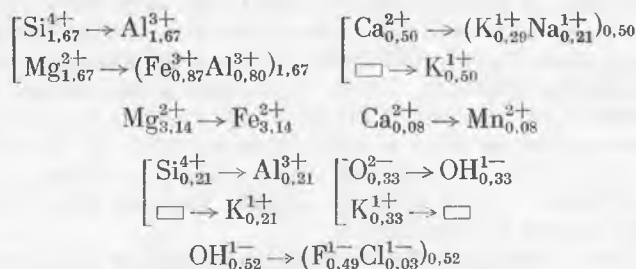
Принимая за исходную формулу тремолита $Ca_2Mg_5[Si_8O_{22}][OH]_2$, посредством вычислений находим в гастингситах I следующие проявления гетеро- и изоморфизма:



[Сумма «восьмых» катионов, заполнивших пустые места: $(Na, K)_{0,73} + Na_{0,02} = (Na, K)_{0,75}$].

¹ Представление о присутствии в амфиболах H_3O^{1+} на месте K^{1+} развивалось автором с 1958 г. (прим. ред.).

Аналогичным образом в гастингсита II выявлен следующий гетероморфизм:



(Сумма «восьмых» катионов, заполнивших пустые места между октаэдрами, $\text{K}_{0,21} + \text{K}_{0,50} - \text{K}_{0,33} = \text{K}_{0,38}$).

Из рассмотрения гетеро- и изовалентного замещения напрашиваются следующие выводы:

1) в гастингсита, подобно актинолиту, широко развито замещение $\text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$;

2) от ряда актинолит-тремолита гастингсит отличается существенной ролью замещения $\text{Si}^{4+} \rightarrow \text{Al}^{3+}$, которое сопровождается замещением $\text{Mg}^{2+} \rightarrow (\text{Fe}^{3+}, \text{Al}^{3+})$ или отчасти заполнением K^{1+} , Na^{1+} пустых мест между октаэдрами.

3) Последнее позволяет считать гастингсит аналогом обыкновенной роговой обманки, так как главной кристаллохимической особенностью обоих является преобладание гетеровалентного замещения одного типа.

Таблица 6

Главные типы замещений в моноклинных амфиболох

Гетеровалентные		Изовалентные
I	II	III
№ 1. $\text{OH}^{1-} \rightarrow \text{O}^{2-}$ $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ [6] [6]	№ 5. $\text{Si}^{4+} \rightarrow \text{Al}^{3+}$ [4] [4] $\text{Mg}^{2+} \rightarrow (\text{Fe}^{3+}, \text{Al}^{3+})$ [6] [6]	$\text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Ca}^{2+}$ [8] [8] $\text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ [6] [6] $\text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Zn}^{2+}$ $(\text{Mg}^{2+}, \text{Ca}^{2+}) \rightarrow \text{Mn}^{2+}$ [6,8]
№ 2. $\text{OH}^{1-} \rightarrow \text{O}^{2-}$ $\square \rightarrow (\text{Na}^{1+}, \text{K}^{1+})$ [10]	№ 6. $\text{Si}^{4+} \rightarrow \text{Al}^{3+}$ [4] [4] $\square \rightarrow (\text{Na}^{1+}, \text{K}^{1+})$ [10]	$\text{Na}^{1+} \rightarrow \text{K}^{1+}$ [10,8] [10,8] $\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ [6] [6] $(\text{Al}^{3+}, \text{Fe}^{3+}) \rightarrow \text{Cr}$ [6] [6]
№ 3. $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{OH}^{1-}$ $\text{Ca}^{2+} \rightarrow (\text{Na}^{1+}, \text{K}^{1+})$ [8,10] [8,10]	№ 7. $\text{Mg}^{2+} \rightarrow (\text{Al}^{3+}, \text{Fe}^{3+})$ [6] [6] $\text{Ca}^{2+} \rightarrow (\text{Na}^{1+}, \text{K}^{1+})$ [8] [8]	$\text{Si}^{4+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$ [4] [4] $\text{K}^{1+} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^{1+}$ $\text{OH}^{1-} \rightarrow \text{F}^{1-}$ $\text{OH}^{1-} \rightarrow \text{Cl}^{1-}$
№ 4. $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{OH}^{1-}$ $(\text{Na}^{1+}, \text{K}^{1+}) \rightarrow \square$ [10]	№ 8. $\text{Ca}^{2+} \rightarrow (\text{Na}^{1+}, \text{K}^{1+})$ [8] [8] $\square \rightarrow (\text{Na}^{1+}, \text{K}^{1+})$ [10]	

Замещения № 2—4, 8 не указаны Соболевым (1949) для амфиболов; замещения № 2, 6, 8 идут с увеличением числа катионов, замещение № 4 — с уменьшением их числа. Прямоугольниками обозначено пустое пространство между октаэдрами. Цифры в прямых скобках под элементами означают их координацию.

ИЗОМОРФНЫЕ ЗАМЕЩЕНИЯ В МОНОКЛИННЫХ АМФИБОЛАХ

В моноклиновых амфиболах имеется восемь типов гетеровалентных замещений. Из них четыре типа (табл. 6, I) относятся к замещениям между анионами, которые сопровождаются компенсацией валентности за счет катионов, и четыре типа (табл. 6, II) принадлежат замещениям между катионами, баланс валентностей которых сохраняется за счет замещений среди других катионов. Замещение катионов (как в октаэдрах, так и в тетраэдрах) вызывает замещение среди других катионов октаэдров или заполнение промежутков между ними. В моноклиновых амфиболах известен ряд изовалентных замещений и в катионной и в анионной части (табл. 6, III).

Обращаясь к упрощенным теоретическим формулам моноклиновых амфиболов, находим, что группу тремолита-актинолита можно рассматривать как кристаллохимический аналог группы куммингтонита-грюнерита, в которой $2Mg$ замещено на $2Ca$. Остальные группы моноклиновых амфиболов можно рассматривать как кристаллохимические аналоги группы тремолита-актинолита, в которой произошло одно из четырех пар гетеровалентных замещений среди катионов (табл. 6, замещения № 5—8).

Замещение № 8 дает группу рихтерита, а замещение № 7 — группу глаукофана, озаннита, рибекита, родусита и эккерманита. Сочетание двух замещений — № 8 и 7 дает группу арфведсонита; замещение № 6 дает группу эденита; замещение № 5 и сочетание замещений № 5 и 6 дают группу обыкновенной и базальтической роговой обманки, гастингсита, кокшаровита, катафорита и др. В этих группах разновидности выделяются по изовалентному замещению $Mg^{2+} \rightarrow Fe^{2+}$ (в каждой из них) или $Al^{3+} \rightarrow Fe^{3+}$ (главным образом в щелочных амфиболах и т. д.).

Произведенные нами изоморфные замещения в рассчитанных по химическим анализам (на основе анионов или катионов) формулах моноклиновых амфиболов (как представлено выше на примере гастингситов) показывают наличие нескольких типов гетеровалентного изоморфизма катионов в каждой группе моноклиновых амфиболов. Так, в простейших из них куммингтонитах-грюнеритах и в тремолитах-актинолитах очень слабо проявлены один или несколько из четырех типов гетеровалентных замещений среди катионов (табл. 6, замещения № 5—8). В группах амфиболов более сложного состава наряду с определяющим их гетеровалентным изоморфизмом между катионами в подчиненном количестве присутствуют один, два или все три из оставшихся типов гетеровалентного замещения между катионами (табл. 6, замещения № 5—8). Из них в рихтерите свойственному ему изоморфизму № 8 подчинен изоморфизм № 6 и в меньшей степени № 7 и 5; в арфведсонит-рибекитах характеризующий их изоморфизм № 7 дополняется изоморфизмом № 8, реже № 6 или 5 (двумя из них или всеми тремя); в эдените, помимо типичного изоморфизма № 6, имеется незначительный изоморфизм № 5 и 8; наконец, в разнообразных роговых обманках совместно с превалирующим изоморфизмом № 5 обычно отмечается изоморфизм № 6 или № 8 или оба.

Таким образом, при отнесении конкретных моноклиновых амфиболов к той или иной группе, а тем более к той или иной разновидности приходится считаться не только с количественно доминирующим главным типом, но и с подчиненными типами гетеровалентного замещения между катионами. Основным отличием реальных минералов от теоретических является сочетание нескольких типов гетеровалентного изоморфизма между катионами, а не одного или двух из них. Этой особенностью реальных

амфиболов еще не придавали должного значения (Устьев, 1949; Smith, 1959 и др.)

Произведенные вычисления изоморфных замещений показывают далее, что изменение числа катионов в амфиболах совершается не только за счет гетеровалентных замещений между катионами (табл. 6, замещения № 6 и 8), но и за счет гетеровалентных замещений между анионами и катионами (табл. 6, замещения № 2 и 4). В одном минерале бывают любое одно, два, три или все четыре из указанных замещений.

Исключающие друг друга замещения ОН на О [отмеченное у Винчеллов, 1953 и у Штрунца (Strunz, 1957)] и О на ОН (не указанное ни в одной из классификаций), по нашим данным, одинаково показательны для всех амфиболов и сопровождаются замещением между катионами с изменением или с сохранением их количества (соответственно замещения № 2 и 4 и № 1 и 3, табл. 6). Следовательно, нельзя ожидать прямой зависимости между суммой катионов, колеблющейся от 15 до 16, в частности между количеством Si и Al в группе Z или количеством «восьмых» катионов группы X — и содержанием ОН. Судя по расчетам, до 75% группы ОН может замещаться на О, а в тетраэдрах ОН может замещать не более одного иона кислорода.

Рассмотренные гетеровалентные замещения анионов и сопутствующие им гетеровалентные замещения катионов, развитые во всех амфиболах, не могут служить критерием для подразделения их на группы (подвиды) и разновидности. Между тем базальтическая роговая обманка и разновидности глаукофана (Винчеллов, 1953), а также ряд других моноклиновых амфиболов (Strunz, 1957) выделены по принципу замещения ОН и О. Таким образом, в теоретических формулах амфиболов достаточно писать $[\text{OH}]_2$, подразумевая, что в реальных минералах имеется гетеровалентный изоморфизм анионов и сопровождающий его гетеровалентный изоморфизм между катионами.

Из результатов произведенных изоморфных замещений в рассчитанных (на основе катионов или анионов) формулах проанализированных амфиболов можно сделать следующие выводы:

1. Природные амфиболы не дают таких четко разграниченных групп, которые выделяются по их теоретическим формулам, вследствие широкого распространения переходных разновидностей. Амфиболы, точно соответствующие теоретическим формулам, неизвестны или исключительно редки.

2. Относить каждый амфибол к той или иной их группе следует по количественно доминирующему типу гетеровалентного изоморфизма между катионами или по его отсутствию (для простейших групп) с обязательным учетом всех остальных изоморфных замещений среди катионов — для выявления переходов между группами.

3. При определении принадлежности данного амфибола к той или иной разновидности необходимо исходить из изоморфизма между катионами, дополнительного к доминирующему, и, поскольку некоторые разновидности минерала выделены по оптическим константам (паргасит и др.) и по формам кристаллов (асбесты и др.), принимать во внимание и эти его признаки.

Автору представляется, что, руководствуясь принципом доминирующего гетероморфизма катионов, с учетом остальных проявлений изоморфизма, оптических и кристаллографических свойств моноклиновых амфиболов, можно несколько упростить и уточнить их классификацию.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- А й н б е р г Л. Ф. Роговые обманки Мариупольского щелочного массива. Изв. Главн. геол.-разв. управл., т. 49, № 5, 1930.
- Б е л о в Н. В. Некоторые применения теории минерализаторов. Изв. АН СССР, серия геол., № 6, 1951.
- Б а т и е в а И. Д., Б е л ь к о в И. В. К вопросу о генезисе акцессорных минералов в граните. В кн. «Вопросы петрографии и минералогии». I. Изд-во АН СССР, 1953.
- Б о р н е м а н - С т а р ы н к е в и ч И. Д. Химические формулы минералов III. Амфиболы. Зап. Всес. Минер. об-ва, 79, 2, 1960.
- В и н ч е л л Н. А., В и н ч е л л Г. Оптическая минералогия. Пер. с англ. ИЛ, 1953.
- В и н о г р а д с к а я Г. М. Амфибол из гранито-гнейса Губенского массива. Зап. Всес. Минер. об-ва, т. 78, вып. 1, 1959.
- Г и н з б у р г И. В. К вопросу о петрохимии щелочных гранитов. В кн.: «Щелочные граниты Кольского п-ова». Изд-во АН СССР, 1958.
- Г и н з б у р г И. В., Б е л о в а Е. Н. О гастингсите с малым углом оптических осей. Докл. АН СССР, т. 134, № 3, 1960.
- К о р ж и н с к и й Д. С. Факторы минеральных равновесий и минералогические фации глубинности. Труды ИГН АН СССР, 12, серия петрографич., № 5, 1940.
- К о р ж и н с к и й Д. С. Очерк метасоматических процессов. В кн.: «Основные проблемы магматогенных рудных месторождений». Изд-во АН СССР, 1953.
- О с т р о в с к и й И. А. Исследования по минералообразованию в некоторых силикатных расплавах под давлением водяного пара и водорода. Труды ИГЕМ АН СССР, вып. 1, 1956.
- С о б о л е в В. С. Введение в минералогию силикатов. Изд. Львовск. гос. Ун-та, 1949.
- Т р е г е р В. Е. Таблицы для оптического определения породообразующих минералов. Пер. с нем. Госгеолнаучтехиздат, 1958.
- Х и т а р о в Н. И. Вопросы петрогенезиса в свете экспериментальных данных. Геохимия, № 6, 1958.
- У с т ь е в Е. К. Натровый феррогастингсит из щелочных гранит-порфиров массива Карсар. Материалы по геологии Северо-Востока, вып. 6, Магадан, 1949.
- B i l l i n g s M. The Chemistry, optics and genesis of the hastingsite group of amphiboles. Am. Min., v. 13, N 7, 1928.
- B u d d i n g t o n A. F., L e o n a r d B. F. Chemucal petrology and mineralogy of hornblendes in Northern Adirondak granite rocks. Am. Min. v. 38, N 11—12, 1953.
- D e e r W. A. The composition and paragenesis of the hornblendes of Glen Tilt compleks, Perthshire; Min. Mag., v. 25, N 160, 1938.
- E r n s t W. G. Alkali amphiboles. Corneg. Inst. Wash. 1958.
- H u t t o n C. O. The composition of an actinolite. Acta crist., v. 9, N 3, 1956.
- L a r s e n E. S. a. D r a i s i n W. M. Composition of the minerals in the rocks of the Southern California batholith. Imper. Geol. Congr. Rept. 18th Session Gt. Brit. 1948, 2, 1950.
- M e g a w H. D. The structure of awillite $\text{Ca}_2(\text{SiO}_3\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Acta Crist., v. 5, N 2, 1952.
- N i c h o l l e s G. D. a. Z u m m a n J. The structural formula of a hydrous amphibole. Min. Mag., v. 30, N 230, 1955.
- R o s e n z w e i g A., W a t z o n E. H. Some hornblende from S.— E. Pennsylvania and Delaware. Am. Min., v. 39, N 7—8, 1954.
- S m i t h J. V. Graphical representation of amphibole compositions. Am. Min., N 3—4, 1959.
- S t r u n z H. Mineralogische tabellen; Leipzig, 1957.
- Z u s s m a n J. The cristal structure of an Actinolite. Acta crist., v. 8, N 6, 1955.