

И. В. ГИНЗБУРГ, Г. А. СИДОРЕНКО,
Д. Л. РОГАЧЕВ

О ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ГЛАВНЫМИ ИЗОМОРФНЫМИ ЗАМЕЩЕНИЯМИ И НЕКОТОРЫМИ ПАРАМЕТРАМИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ АМФИБОЛОВ

Как известно, параметры элементарной ячейки ромбических и моноклинных амфиболов неодинаковы; первым свойственно внутреннее двойникование ячейки по (100) (Ito, 1950) и $\beta = 90^\circ$. Эти особенности отражаются на порошкограммах (Johansson, 1930; Rabbitt, 1948; Vermaas, 1953 и др.) и позволяют четко отличать ромбические амфиболы от моноклинных. Однако разновидности как ромбических, так и моноклинных амфиболов обнаруживают между собой большое сходство не только в порошкограммах (Крутов, 1936; А. И. Гинзбург, И. В. Гинзбург, 1950; Zwaan, Plas, 1958; Мозгова и Четвериков, 1959 и др.), но и в параметрах ячейки (Warren, 1930; Whittaker, 1949; Francis, Hey, 1956; Zussman, 1959; Андреев, 1959), а также в расстояниях между катионами M_1 , M_2 , M_3 , M_4 и кислородом (Johansson, 1930; Whittaker, 1960; Heritsch, Kahler, 1960 и др.).

Вместе с тем, согласно теоретическим представлениям, разработанным в СССР В. И. Михеевым (1957), выявление кристаллоструктурных особенностей разновидностей моноклинных и ромбических амфиболов представляется вполне возможным. Затруднения вызываются, как справедливо отмечал Франк-Каменецкий (1959), близостью межплоскостных расстояний у амфиболов одной сингонии.

К началу нашей работы были отдельные попытки привлечения порошкограмм для выделения разновидностей моноклинных амфиболов как путем сопоставления дифракционных картин (Vermaas, 1953; Михеев, 1957; Шевченко, 1959), так и путем сравнения проиндифференцированных отражений и вычисленных по ним параметров (Niggli, Tobi, 1953). Эти исследования, выполненные на ограниченном материале, дали обнадеживающие, хотя и не всегда достоверные (Niggli, Tobi, 1953) результаты. Более полные сведения имелись по пироксенам — этим самым близким к амфиболам силикатам (Hess, 1952; Kuno, 1954; Kovčimský, 1955; Zwaan, 1955; Шендерова, Соколова, 1958 и др.). Данные нескольких примеров определения пироксенов и амфиболов на основе порошкограмм позволяют надеяться, что подобным способом можно различать все амфиболы.

Итоги произведенного исследования показывают, что рентгеновский фазовый анализ может быть успешно применен для диагностики амфиболов — минералов с более сложными изоморфными сериями, чем пироксены. Используя рентгеновский фазовый анализ, удастся выделять не только изоморфные серии амфиболов, но и отдельные члены этих серий.

Ввиду более сложного состава амфиболов, по сравнению с пироксенами, авторы пока ограничивались выявлением эмпирических проявлений связи между определенными параметрами кристаллической структуры амфиболов и определенными катионами. На данном этапе работы мы не ставим своей задачей ни составление графиков «состав — параметры ячейки», как сделано для пироксенов (Hess, 1952; Brown, 1960), ни составление математических уравнений обнаруженной зависимости, как это сделано для антофиллитов и жедритов¹ (Heu, 1956), а также для ромбических пироксенов (Hess, 1952) и диопсид-геденбергитов (Brown, 1960). Произведенный нами анализ взаимосвязи состава и особенностей кристаллических структур амфиболов поможет в дальнейшем осуществить выполнение этих задач.

МЕТОДИКА И ОБЪЕМ РАБОТЫ

Рентгенометрический анализ для выявления зависимости между главными изоморфными замещениями и некоторыми параметрами кристаллической структуры амфиболов применялся следующим образом. Для каждого простого или сложного изоморфного ряда амфиболов были подобраны химически анализированные образцы, отличающиеся по составу или имеющие близкий состав, но разный генезис. По порошкограммам были выявлены различия дифракционных картин как у амфиболов из разных изоморфных рядов, так и в пределах каждого изоморфного ряда. Путем сравнительного индцирования эталонных для каждого изоморфного ряда порошкограмм по определенным отражениям были вычислены параметры элементарной ячейки. Зная проявления изоморфизма у отдельных рядов амфиболов и в каждом из них, а также изменение дифракционных картин и параметров ячейки, можно было подойти к рентгеноструктурной характеристике изоморфизма этих сложных минералов.

Было изучено более 70 разнообразных химически анализированных отечественных и несколько зарубежных амфиболов из разных горных пород. Кроме 10 минералов, собранных И. В. Гинзбург, большинство образцов представили другие исследователи², которым авторы выражают глубокую признательность. Некоторая часть образцов заимствована из коллекций Минералогического музея им. А. Е. Ферсмана АН СССР, музеев ИГЕМ АН СССР и Московского геологоразведочного института. Ряд образцов предоставлен химической лабораторией ИГЕМ АН СССР.

Порошкограммы, как правило, снимались с тех же навесок или образцов, для которых были выполнены химические анализы; несколько порошкограмм сделано из образцов, не соответствующих тем, для которых были выполнены химические анализы, но имеющих такие же парагенетические ассоциации и взятых из тех же мест.

Съемка производилась методом Дебая в камерах с $D = 66$ и $57,3$ мм при $d = 0,5 - 0,3$ мм, в нефльтрованном Fe-излучении. Произведенные нами для некоторых образцов повторные снимки методом внутреннего стандарта, иногда применяемые для уточнения порошкограмм, при последующем индцировании оказались излишними. Они не отразились на результатах индцирования и впоследствии нами не производились.

Одновременно обрабатывались различные литературные данные. Из них были использованы полученные на монокристаллах параметры

¹ Только для связи b и главных катионов.

² См. таблицы 9—12.

ячейки амфиболов (более 40 химически анализированных и более 10 неанализированных), а также 5 неанализированных амфиболов, параметры которых были найдены на основе порошкограмм. Кроме того, по опубликованным порошкограммам 30 химически анализированных амфиболов были вычислены параметры ячейки. Сопоставление полученных нами данных с литературными подтвердило достоверность результатов определения параметров моноклинных и ромбических амфиболов на основе порошкограмм. Тем самым были показаны широкие возможности применения порошкограмм для изучения изоморфизма у таких сложных и непостоянных по составу минералов, какими являются амфиболы.

ИНДИЦИРОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕЙКИ АМФИБОЛОВ

В ромбических и моноклинных амфиболах, представленных несколькими изоморфными сериями, особое внимание надо было уделить достоверности сравнительного индицирования, от которого зависела точность вычисления параметров ячейки. Даже ромбические амфиболы нельзя было проиндицировать по одному из них, как это сделано для ромбических пироксенов (Ramberg, De-Vore, 1951; Hess, 1952; Kuno, 1954; Zwaan, 1955), поскольку в составе ромбических амфиболов три изоморфных серии (Гинзбург, 1960), а не одна (Михеев, 1957), как у ромбических пироксенов. В ходе работы выяснилось, что хольмквиститам не могут быть приписаны индексы антофиллитов; жедриты, обычно легко индицируемые по антофиллиту (Seitaari, 1956; Seki, Yamasaki, 1957), иногда дают дифракционную картину, соответствующую хольмквиститу, и индицируются по нему. В моноклинных амфиболах, представленных рядом изоморфных серий, дело осложняется особенностями структурного мотива моноклинной сингонии, требующими надежного индицирования отражений дифракционных картин. Данные же Михеева (1957), выделившего в многообразных по изоморфизму моноклинных амфиболах только две кристаллохимические группы — рибекита и тремолит-актинолита, не способствовали проведению уверенного индицирования в последней группе, так как в ней, судя по характеру порошкограмм, четко обособляются куммингтонит-грюнерит-амозиты, тремолит-актинолиты и обыкновенные роговые обманки (Vermaas, 1953; Niggli, Tobi, 1953). В соответствии с проявлением количественно преобладающего изовалентного или гетеровалентного замещения катионов в моноклинных амфиболах (Гинзбург, 1961) выделены четыре главные изоморфные серии: куммингтонита-грюнерита, тремолита-актинолита, роговых обманок (включаящих паргасит, смарагдит, каринтин, эденит, гастингсит и др.) и арфедсонита-рибекита (охватывающая режикит, крокидолит, озанит и др.). В процессе исследования авторы убедились в невозможности индицирования куммингтонитов по тремолиту. Гастингсит был сначала проиндицирован по грамматиту (Johansson, 1930), но его параметры — $a = 10,09$; $c = 5,51$; $\beta = 71^{\circ}08'$, кроме $b = 18,12$, — оказались неверными. Тем самым было установлено, что роговые обманки, как правило, не поддаются безупречному индицированию на основе тремолит-актинолитов; только некоторые из них индицируются по тремолиту, напоминая жедриты, индицируемые по антофиллиту.

Эти предварительные данные свидетельствовали о том, что связь ведущих изоморфных замещений и метрик решетки у амфиболов проявляется особо в каждой изоморфной серии. Следовательно, для каждой из них необходимо было иметь эталонную порошкограмму, по которой можно было бы безошибочно индицировать другие. В качестве эталонных

Таблица 1
Значения межплоскостных расстояний антофиллита *

<i>hkl</i>	<i>d/n</i>	<i>I</i>	<i>hkl</i>	<i>d/n</i>	<i>I</i>
210	8,16	4	840	2,065	2
230	5,06	2	661	1,993	2
040	4,50	3	751	1,980	1
420	4,11	3	571	1,962	1
131	3,885	1	702	1,875	1
321	3,66	3	191	1,865	1
—	3,55	1	860	1,833	3
—	3,36	2	861; 812	1,732	2
331	3,32	1	961, 880, 2.11.0	1,613	4
440	3,23	5	053	1,580	2
610	3,045	8	12.0.0	1,542	2
521	2,866	2	10.6.1	1,509	2
251	2,839	3	0.12.0	1,500	4
630	2,746	2	6.11.0	1,447	1
351	2,684	3	11.0.2	1,417	2
161	2,579	3	11.6.1	1,414	3
202	2,535	4	663	1,359	2
451, 261	2,504	3	12.6.1	1,328	3
302	2,423	2	12.1.2	1,325	3
—	2,357	1	14.1.0	1,319	1
551	2,321	1	204	1,302	1
402	2,286	1	2.12.2	1,292	3
502	2,143	3	404	1,267	1
561	2,135	4	16.8.0	1,029	3

* Здесь и в следующих таблицах жирным шрифтом выделены индексы и отражения тех линий, по которым выполнялось сравнительное индцирование и дальнейший подсчет параметров.

были приняты те порошковые диаграммы, которые проиндцированы по параметрам, определенным на монокристаллах. Для ромбических амфиболов — это порошковые диаграммы антофиллита (Johansson, 1930) и хольмквистита (Гинзбург, Рогачев, Бондарева, 1958); для моноклиновых амфиболов — куммингтонита (Johansson, 1930), синтетического F-тремолита (Comeloro, Kohn, 1954), гастингсита (Гинзбург, Белова, 1960) и режикита (данные Г. А. Сидоренко). Не все порошковые диаграммы могли быть непосредственно использованы нами, так как нуждались в некоторой доработке. Так, порошковая диаграмма антофиллита у Джохансона дана без значений $\frac{d}{n}$; эти значения вычислены и приведены в табл. 1. Порошковая диаграмма хольмквистита была проиндцирована расчетным путем на основе размеров элементарной ячейки, найденных для него Рогачевым на монокристаллах (табл. 2). Порошковая диаграмма куммингтонита, взятая у Джохансона (табл. 3); и порошковая диаграмма синтетического F-тремолита, заимствованная у Камерфоро и Кона (табл. 4), дополнены значениями $\frac{d}{n}$. Порошковая диаграмма гастингсита,

¹ Приведенные ранее (Vermaas, 1953) значения $\frac{d}{n}$ для куммингтонита Джохансона не полностью воспроизводят дебаграмму этого минерала.

Таблица 2

Значения межплоскостных расстояний холмквистита

<i>hkl</i>	<i>d/n</i>	<i>I</i>	<i>hkl</i>	<i>d/n</i>	<i>I</i>
020	8,77	2	363	1,472	3
210	8,05	5	670β	(1,442)	4
230	5,01	4	12.3.1	1,418	3
119	4,86	4	563	1,401	3
400	4,55	4	813	1,392	8
410; 121	4,405	5	2.11.2	1,364	1
420	4,049	1	383	1,349	4
131	3,854	1	903	1,334	2
430	3,615	4	673	1,308	8
610β	(3,307)	5	224	1,297	2
241	3,192	3	7.10.2	1,284	3
600	3,055	1	044	1,270	4
610	2,996	10	7.12.1	1,253	2
060	2,933	1	154,593	1,239	2ш.
521	2,836	1	1.14.1	1,233	2ш.
450	2,794	6	624	1,203	1
630	2,707	5	4.14.1	1,192	1
601	2,639	4	4.13.2	1,173	3
022	2,538	6	14.2.2	1,161	2
451	2,471	2	654	1,150	1
302	2,420	1	16.1.0	1,139	2
071; 800	2,287	4	14.7.1	1,134	3
332	2,244	1	3.16.2β	(1,114)	2
242	2,202	2	15.1.2	1,105	1
432	2,136	5	12.5.2	1,095	2
801	2,097	3	1.16.1	1,085	3
181	2,035	4	10.2.4	1,065	2
480	1,998	1	115	1,056	3
622; 370	1,950	3ш.	16.1.2	1,0047	1ш.
911	1,886	1	315; 135	1,042	1ш.
921	1,852	1	11.2.4	1,029	3ш.
291; 462	1,815	4ш.	435	1,017	4ш.
272	1,797	3ш.		{1,011	9
103; 013	1,761	2ш.	3.16.2	{1,009	3
652; 941	1,741	3	15.0.3; 535	1,003	4
082; 223	1,707	4	605; 15.1.3	1,001	2
682β	(1,639)	1ш.	14.11.1	0,996	1
10.4.1	1,588	6	11.5.4	0,994	3
672	1,572	6	5.14.3	0,992	3
813β	(1,537)	2	16.6.2	0,988	2
971	1,519	4	12.3.4	0,986	9
772	1,502	1	—	0,964	4
682	1,487	7			

Таблица 3

Значения межплоскостных расстояний куммингтонита

hkl	d/n	I	hkl	d/n	I
110	8,28	4	$\bar{1}91$	1,876	1
040	4,53	1	$\bar{5}12$	1,693	1
220	4,14	1	461	1,660	5
$\bar{1}31$	3,86	2	1.11.0; 480	1,632	3
$\bar{2}21$	3,59	1	$\bar{1}53$	1,598	2
131	3,44	3	600	1,559	1
240	3,27	4	—	1,552	1
310	3,06	3	263, 420	1,519	5
—	3,04	3	3.11.0	1,461	1
221	2,98	1	—	1,433	1
330; 151	2,76	8	$\bar{6}61$	1,406	7
061	2,62	5	512	1,383	2
202	2,51	5	710	1,332	3
—	2,41	1	004	1,302	1
$\bar{3}51$	2,30	4	$\bar{2}.12.2$	1,298	6
$\bar{3}12$	2,23	1	$\bar{7}51$	1,278	3
261	2,19	6	$\bar{4}04$	1,256	1
202	2,10	2	602	1,229	2
351	2,04	2	5.11.2	1,185	4
402; 371	1,956	2	800	1,168	2
			880	1,039	3

Таблица 4

Значения межплоскостных расстояний F-тремолита

hkl	d/n	I	hkl	d/n	I
020	9,19	9	261	2,156	4
110	8,37	>>100	202	2,038	1
130	5,04	7	351	2,010	4
111	4,85	5	370	1,993	5
200	4,73	6	510	1,881	5
040	4,50	12	242	1,858	7
220	4,18	25	530	1,804	4
131	3,866	3	461	1,644	18
131; 041	3,375	6	480	1,630	3
240	3,261	23	1.11.0	1,612	2
310	3,102	>100	600	1,578	4
151; 221	2,932	8	$\bar{1}5\bar{3}$	1,574	1
330	2,789	26	570, 353	1,524	2
331	2,715	3	0.12.0	1,500	8
151	2,684	9	551, 482	1,454	2
061	2,586	2	3.11.0	1,452	2
202	2,525	2	$\bar{6}61$	1,429	6
350	2,372	4	512	1,361	4
351	2,325	5	710	1,348	2
421	2,306	5	263	1,330	1
171	2,291	3	114	1,303	2
312	2,261	1	224, 751	1,302	2
171	2,172	1	2.12.2	1,289	1

принятая за эталонную для всех видов роговых обманок¹, была проиндцирована графическим способом, описанным Б. Я. Пинесом (1957), исходя из результатов определения элементарной ячейки, произведенного Е. Н. Беловой на монокристаллах. Затем по индексам отражений были уточнены параметры ячейки (табл. 5). Для щелочных амфиболов принята

Таблица 5

Значения межплоскостных расстояний гастингсита

<i>hkl</i>	<i>d/n</i>	<i>I</i>	<i>hkl</i>	<i>d/n</i>	<i>I</i>
310 β	3,425	4	600, 113 β	1,595	8
240	3,273	3	53 $\bar{1}$		
310	3,140	10	40 $\bar{2}$, 620 $\bar{1}$	1,549	1
331 β , 151 β	3,032	3	13 $\bar{3}$, 60 $\bar{2}$	1,528	3
151	2,965	2	62 $\bar{2}$, 42 $\bar{2}$	1,510	4
330	2,814	3	0.12.0, 55 $\bar{1}$	1,481	1
331, 151 β	2,723	8	51 $\bar{3}$, 20 $\bar{3}$, 06 $\bar{3}$	1,450	9
112, 161	2,614	5	44 $\bar{2}$, 53 $\bar{3}$, 66 $\bar{1}$	1,371	5
202, 00 $\bar{2}$	2,559	5	71 $\bar{2}$, 62 $\bar{1}$, 73 $\bar{1}$		
400, 31 $\bar{1}$	2,393	3	46 $\bar{2}$	1,347	6
350			710, 64 $\bar{1}$	1,320	7
351, 42 $\bar{1}$	2,351	5	730, 33 $\bar{3}$, 22 $\bar{4}$	1,303	6
17 $\bar{1}$	2,203	7	0.14.0.64 $\bar{3}$	1,208	4
20 $\bar{2}$	2,031	6	770, 77 $\bar{2}$, 73 $\bar{1}$	1,198	3
42 $\bar{1}$	1,901	2	—	1,087	3
531, 460 $\bar{1}$	1,871	1	—	1,058	6
44 $\bar{2}$, 24 $\bar{1}$			—	1,054	6
461 β 601 β	1,826	3	—	0,992	4
600 β 113 β	1,766	2	—	0,986	5
53 $\bar{1}$			—	0,984	4
46 $\bar{1}$, 60 $\bar{1}$	1,659	8	—		
62 $\bar{1}$, 33 $\bar{3}$	1,629	4			

порошкограмма режикита — минерала, по химическому составу сходного с боливийским крокидолитом. Порошкограмма режикита была проиндцирована графически по размерам элементарной ячейки боливийского крокидолита, которые были определены ранее монокристалльным методом (Whittaker, 1949). Параметры режикита затем были уточнены обратным расчетом по индексам отражений (табл. 6).

Два названных типа порошкограмм ромбических амфиболов (антофиллита, хольмквистита) и четыре типа порошкограмм моноклинных амфиболов (куммингтонита, тремолита, гастингсита, режикита) вполне характеризуют все известные изоморфные серии этих минералов.

Кристаллические структуры амфиболов характеризовались 1) относительным перемещением отражений определенных индексов и изме-

¹ Единственная проиндцированная ранее (Куковский, 1958) порошкограмма роговой обманки оказалась непригодной, так как индексы отражений давались по параметрам ячейки с завышенными значениями $b=18,37$. С гастингситом у нее примерно совпали только отражения 3,41 (hkl 310 β) и 3,12 (hkl 310). Отражение 1,872 имеет другой индекс.

Таблица 6

Значения межплоскостных расстояний рижикита

<i>hkl</i>	<i>d/n</i>	<i>I</i>	<i>hkl</i>	<i>d/n</i>	<i>I</i>
110	8,41	8	113,600	1,575	7
200,111	4,88	4	133,641,620,602,353	1,526	4
021,040	4,46	6	422,402	1,507	6
201,220,130	4,03	1	0.12.0	1,489	5
221,111	3,84	2	224β 333β 730β	1,447	1
131β, 041β	3,725	2	661, 4. 10. 0	1,432	9
240β	3,610	1	393β	1,416	2
131,041	3,40	8	621,660,711	1,380	5
240	3,26	6	462,603,712	1,350	3
221β	3,18	1	641,710	1,337	3
310,311 (?)	3,12	8	333,224,730,263	1,310	6
060,151,201	2,965	6	393	1,283	8
221	2,897	5	—	1,262	4
260β 241β 202β	2,801	4	—	1,231	1
151,331	2,695	10	—	1,217	1
061,112	2,572	5	—	1,190	5
260,241,202,002	2,504	8	—	1,174	1
331β	2,380	2	—	1,162	2
400,421	2,314	6	—	1,126	4
420,112,312	2,268	5	—	1,116	1
242,042	2,194	2	—	1,105	2
331	2,177	7	—	1,094	2
261	2,121	1	—	1,085	2
440	2,063	4	—	1,075	2
—	2,023	2	—	1,055	6
202,402,351	1,993	2	—	1,048	4
222,401,422	1,943	2	—	1,040	5
421,062	1,896	2	—	1,030	2
461,510	1,864	1	—	1,021	6
460	1,850	2	—	1,021	5
262β 462β 550β	1,824	2	—	1,014	2
0.10.0,441	1,765	3	—	1,000	2
113,312	1,732	4	—	0,996	4
313,003	1,680	3	—	0,989	4
262,462,550	1,655	8	—	0,979	4
0.12.0β	1,635	3	—	0,973	3
621,511	1,605	3			

нением их интенсивности; 2) размерами элементарной ячейки, вычисленными по определенным индексам отражений.

Известный прием определения минералов путем сопоставления главных (наиболее интенсивных) линий межплоскостных расстояний не оправдался в полной мере при сопоставлении амфиболов разного состава ввиду близости значений углов отражений. Лучшие результаты дало изучение участков порошкограмм, неустойчивых в отношении положения и интенсивности отражений. При сравнении пленок порошкограмм амфиболов разного состава были обнаружены некоторые участки (рис. 1), в пределах

которых отдельные линии закономерно перемещаются, раздваиваются, объединяются и изменяют свою интенсивность по мере изменения состава амфиболов.

Отдельные изоморфные серии, наряду с общими, обнаруживают некоторые характерные отражения. Так, отражение 422 присуще только щелочным амфиболам. В пределах одной изоморфной серии, в соответствии

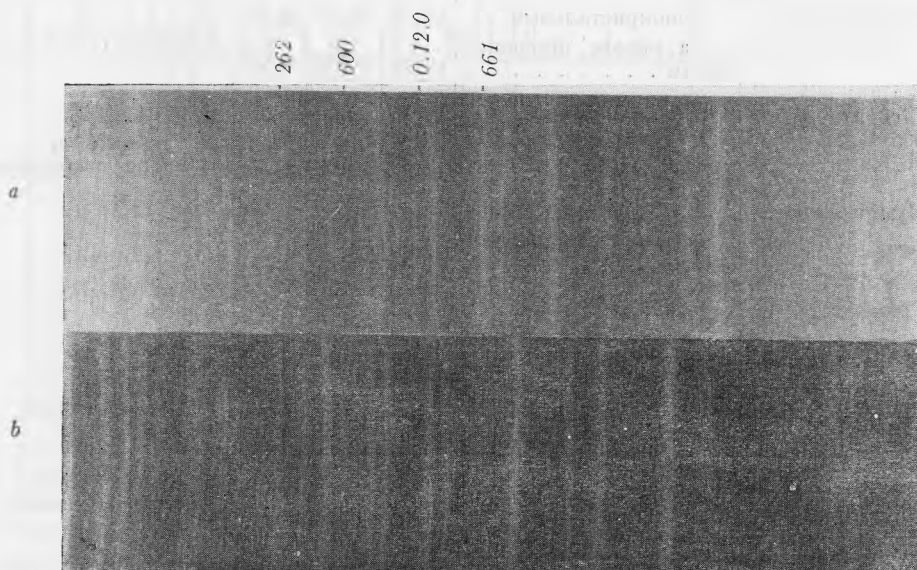


Рис. 1. Характерные участки порошкограмм щелочных амфиболов:
a — магниезная разновидность (режикит); *b* — железистая разновидность (капский крокидолит)

с интенсивностью тех или иных линий дифракционного спектра, определение размеров элементарных ячеек выполнялось по разным сочетаниям отражений, например, для части роговых обманок по линиям 400, 600 (*a*); 0.12.0, 0.14.0 (*b*); 002, 461, 661 (*c*); 661, 461, 712 (*β*). Бралась средняя арифметическая полученных цифр, сходимость которых вполне допустима; *b* по 0.14.0 всегда больше, чем по 0.12.0. Для других роговых обманок применялся несколько иной набор линий (см. табл. 5). В противоположность этому, параметры хольмквиститов вычислялись по двум независимым системам: 1) 903, 673, 044 и 2) 813, 383, 682 и брались средние значения.

Значения межплоскостных расстояний *a*, *b* и *c* даны в kX . Значения *a*, *b* и *c*, взятые из литературы, там, где они даны в Å (в работах после 1948 г.), переведены нами в kX .

Результаты определения параметров ячейки одних и тех же образцов, полученные на монокристаллах, обычно не совпадают с результатами, полученными путем расчета порошкограмм¹. Наибольшие расхождения имеются у *b* и *a* (табл. 7).

Подобные расхождения выявлены нами также при сопоставлении состава и параметров отдельных амфиболов из разных мест: значения *b*,

¹ У более простого минерала — бронзита (с о-ва Бонин в Тихом океане) также нет равенства между определением параметров на монокристаллах: $a = 18,16$; $b = 8,84$; $c = 5,19 kX$ (Strunz, 1957) и путем расчета порошкограмм: $a = 18,25$; $b = 8,82$; $c = 5,19 kX$ (Hess, 1952).

Таблица 7

Параметры ячейки амфиболов, полученные разными методами

Минерал	Метод определения параметров	a	b	c	Литературный источник
Антофиллит	Монокристалльный	18,51	18,03	5,24	Johansson, 1930
	На основе порошкограмм	18,52	18,04	5,27	
Жедрит	Монокристалльный	18,55	17,80	5,28	Rabbit, 1948 Д. Л. Рогачев, устное сообщение
	На основе порошкограмм	18,59	18,01	5,26	
Куммингтонит	Монокристалльный	9,55	18,18	5,33	Johansson, 1930
	На основе порошкограмм	9,57	18,22	5,33	
Грамматит	Монокристалльный	9,82	18,04	18,26	Johansson, 1930
	На основе порошкограмм	9,83	18,05	18,26	
Гастингсит	Монокристалльный	9,90	18,00	5,31	Гинзбург, Белопя, 1960 Г. А. Сидоренко, устное сообщение
	На основе порошкограмм	9,88	18,12	5,30	

определенные у одних из них методом Вайсенберга, обычно занижены, по сравнению со значениями b , определенными у других методом расчета дебаеграмм. Помимо такого несоответствия, установлены случаи ошибочных определений параметров методом Вайсенберга. Например, у грюнерита $b = 17,9$ (Warren, 1930), у актинолита $b = 18,50$ (Götzner, Mußnug, 1928) и у магарфвелсонит-асбеста $b = 17,62$ (Андреев, 1959). Попутно отметим, что по значениям параметров ($a = 9,7$; $b = 17,8$) купферит (Warren, 1930) должен быть отнесен к группе актинолита.

ПОРОШКОГРАММЫ АМФИБОЛОВ РАЗНОГО СОСТАВА

Сложность состава и низкая симметрия амфиболов приводит к тому, что на порошкограммах фиксируется большое число отражений (до 110), преимущественно невысокой интенсивности. Ввиду этого различия между амфиболами едва обнаруживаются при сравнении цифр межплоскостных расстояний. Более выразительно схематическое изображение порошкограмм в виде «столбиковых диаграмм», наглядно отображающих структурные особенности амфиболов (рис. 2). В смещении отражений и изменении интенсивности линий порошкограмм определенным образом отражаются те или иные изменения кристаллической структуры амфиболов. Диагностическое значение имеют участки порошкограмм с наиболее резким перемещением линий или изменением их интенсивности. С ними, очевидно, и нужно связывать наиболее существенные изменения состава амфиболов¹,

¹ Эти изменения происходят как за счет изо- и гетеровалентного замещения между катионами (Гинзбург, 1961_{1,2}), так и за счет замещений между анионами: замена ОН на Cl (Крутов, 1936) и ОН на F (Zussman, 1959) сказывается на увеличении параметров решеток амфиболов.

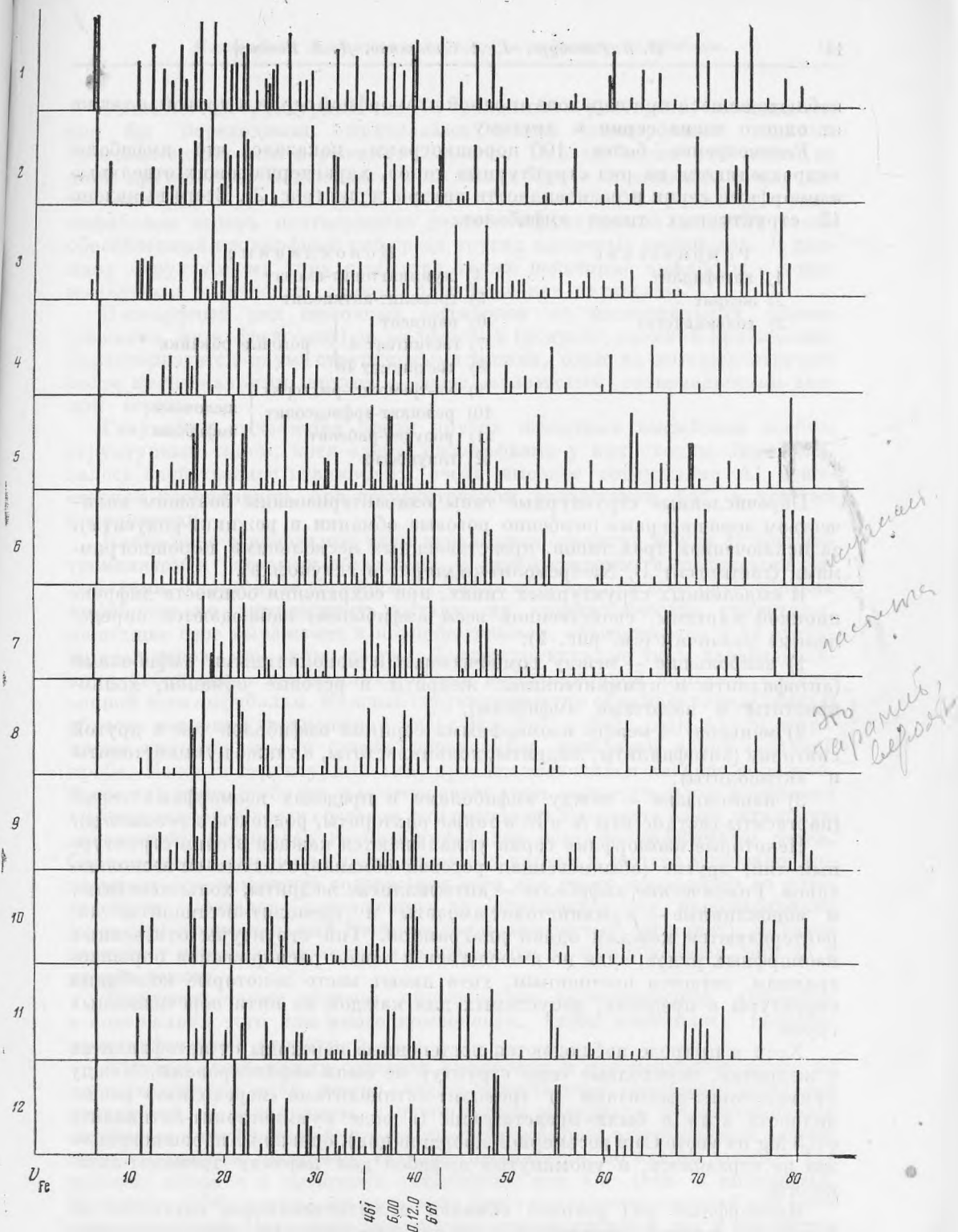


Рис. 2. Столбиковые диаграммы структурных типов амфиболов:

1 — автофиллит; 2 — жедрит; 3 — хольмвистит; 4 — куммингтонит-амозит; 5 — тремолит-актинолит; 6 — паргасит; 7 — гастингсит А; 8 — гастингсит Б; 9 — Na-тремолит-рихтерит; 10 — ренкиит-арфведсонит; 11 — родусит-рибекит; 12 — глаукофан.

На оси ординат дана относительная интенсивность отражений на 10-балльной шкале. На оси абсцисс — положение отражений на порошковой диаграмме, выраженное в $V^{\circ}Fe$

наблюдающиеся при переходе от одной изоморфной серии к другой, а также от одного члена серии к другому.

Рассмотрение более 100 порошкограмм показало, что амфиболы подразделяются на ряд структурных типов, характеризующих отдельные изоморфные серии и разновидности внутри серий (рис. 2). Всего выявлено 12 структурных типов амфиболов.

Ромбические	Моноклинные	
1) автофиллит	4) куммингтонит-амозит	
2) жедрит	5) тремолит-актинолит	
3) хольмквистит	6) паргасит	} роговые обманки
	7) гастингсит А	
	8) гастингсит Б	} щелочные амфиболы
	9) Na-тремолит-рихтерит	
	10) режикит-арфведсонит	
	11) родусит-рибекит	
	12) глаукофан	

Перечисленные структурные типы охарактеризованы большим количеством порошкограмм (особенно роговые обманки и режикит-родуситы), за исключением трех типов, представленных несколькими порошкограммами (гастингсит Б, Na-тремолит-рихтерит и глаукофан).

В выделенных структурных типах, при сохранении общности дифракционной картины, свойственной всем амфиболам, наблюдаются определенные различия (см. рис. 2):

1) наибольшие — между ромбическими и моноклинными амфиболами (автофиллиты и куммингтониты, жедриты и роговые обманки, хольмквиститы и щелочные амфиболы);

2) меньшие — между изоморфными сериями амфиболов той и другой сингонии (автофиллиты, жедриты, хольмквиститы, а также куммингтониты и актинолиты);

3) наименьшие — между амфиболами в пределах изоморфных серий (паргаситы-гастингситы А и Б, а также рихтериты, родуситы и режикиты).

Некоторые изоморфные серии укладываются каждая в один структурный тип, другие (обыкновенная роговая обманка) охватывают несколько типов. Ромбические амфиболы — автофиллиты, жедриты, хольмквиститы, и моноклинные — куммингтонит-амозиты и тремолит-актинолиты — характеризуются каждый одной диаграммой. Тип структуры отмеченных изоморфных рядов, судя по имеющимся в нашем распоряжении порошкограммам, остается постоянным, хотя имеют место некоторые колебания структуры в пределах, допустимых для каждой из пяти перечисленных групп.

Хотя в природе наблюдаются постепенные переходы от автофиллитов к жедритам, переходные типы структур не были зафиксированы. Между куммингтонит-амозитами и тремолит-актинолитами «переходные» разновидности хотя и были представлены (в виде куммингтонит-актинолита с 0,5 Mg на месте Ca в восьмерной координации), однако на порошкограмме это не отразилось, и упомянутый амфибол дал картину тремолит-актинолита.

Изоморфный ряд роговой обманки от магnezияльного паргасита до ферро- (и ферри-) гастингсита дает два основных, не связанных переходами, структурных типа: паргасит и гастингсит А. Структурный тип гастингсита Б, возможно, характеризует особые свойства кристаллической структуры роговых обманок.

Выделяется структурный тип Na-тремолита и рихтерита, являющихся как бы переходными минералами между изоморфными сериями тремолит-актинолита и режикит-родусита. Первая серия отличается от двух других преобладающим типом изоморфного замещения между катионами (Гинзбург, 1961₁). Положение рихтерита и Na-тремолита в ряду амфиболов теперь подтверждено рентгеноструктурными данными — это обособленный изоморфный ряд среди других щелочных амфиболов. К данному структурному типу относятся также некоторые амфиболы с положительным оптическим знаком, известные как паргаситы.

Изоморфный ряд щелочных амфиболов от магнезиальных членов (режикит, магарфведсонит) до железистых (родусит, капский крокидолит) характеризуется двумя структурными типами, один из которых отвечает более магнезиальным, другой — более железистым разновидностям данной серии.

Глаукофан выделяется среди других щелочных амфиболов особым структурным типом, хотя схемы изоморфизма у них сходны. Здесь сказано свойственное глаукофану очень высокое содержание Al в шестерной координации, при незначительном содержании Fe^{3+} в той же координации.

Какие-либо специальные типы переходных структур между актинолит-тремолитом и роговыми обманками, с одной стороны, и щелочными амфиболами, с другой, не установлены. Таким образом, при всем разнообразии амфиболов по химическому составу их кристаллические структуры, нашедшие свое выражение в порошкограммах, объединяются в 12 структурных типов. Как видно из рис. 2, эти структурные типы характеризуются небольшими изменениями общей дифракционной картины, свойственной всем амфиболам. Каждый структурный тип обнимает определенную область значений соотношения $Fe^{2+} : Mg$; $Fe^{2+} : (Fe^{3+}, Al)$; $Al : Si$ и др., но не является чем-то сугубо переменным, присущим одной заданной пробе. Каждый структурный тип, прослеживающийся на ряде образцов, более или менее стабилен и претерпевает лишь незначительные изменения в определенной области составов, что позволяет проводить более детальную диагностику минералов группы амфиболов рентгенографическим путем. Сопоставление изменения дифракционных картин и состава минералов показывает, что изменение содержания того или иного компонента до определенных пределов совершенно не отражается на порошкограмме (сравните магнезиальный Na-тремолит и железистый рихтерит), а затем наступает перемещение линий или изменение их интенсивности, или то и другое вместе.

Требуется, таким образом, определенное количественное изменение в содержании того или иного компонента, чтобы изменилось качество кристаллической структуры.

В целом связь между составом амфиболов и перемещением линий на порошкограммах пока можно считать качественной рентгеноструктурной константой. В дальнейшем, с накоплением материала, по перемещению отдельных линий можно будет судить о возрастании или убывании какого-либо компонента, например, Fe^{2+} (как намечается, по нашим данным, для роговых обманок и щелочных амфиболов), или Ca (как в пижонитах, Morimoto, 1958), и тогда эта константа будет полуколичественной или даже количественной. Поскольку межплоскостные расстояния, как и параметры ячейки, являются взаимосвязанными функциями кристаллической структуры минерала, постольку изменение межплоскостных расстояний влечет за собою изменение параметров ячейки. Взаимосвязь параметров ячейки и состава амфиболов рассматривается ниже.

ПАРАМЕТРЫ ЯЧЕЙКИ АМФИБОЛОВ РАЗНОГО СОСТАВА

Как хорошо известно, структурные различия амфиболов обусловлены кристаллохимическими особенностями. Отдельные изоморфные серии отличаются тем или иным количественно преобладающим изовалентным или гетеровалентным замещением между катионами, а в пределах каждой изоморфной серии главные разновидности выделяются по относительному содержанию Mg и Fe²⁺ (Гинзбург, 1961₁). У антофиллитов и тремолит-актинолитов низкое или среднее содержание Fe³⁺, у хольмквиститов — среднее, у жедритов и куммингтонит-амозитов — среднее и высокое; в то время как у паргасит-гастингситов и у щелочных амфиболов наибольший диапазон колебания содержания Fe²⁺, от низшего до высшего. Проявления изоморфизма между катионами у амфиболов примерно отражают их идеализированные формулы, в которых пары ионов гетеровалентного замещения подчеркнуты одинаково:

Антофиллит	(Mg, Fe ²⁺) ₇ [Si ₈ O ₂₂] [OH] ₂
Жедрит	(Fe ²⁺ Mg) ₅ (Fe ³⁺ , Al) ₂ [(Si ₆ Al ₂) ₈ O ₂₂] [OH] ₂
Хольмквистит	Li ₂ (Fe ²⁺ , Mg) ₃ (Fe ³⁺ Al) ₂ [Si ₈ O ₂₂] [OH] ₂
Куммингтонит	(Fe ²⁺ Mg) ₇ [Si ₈ O ₂₂] [OH] ₂
Актинолит	Ca ₂ (Mg, Fe ²⁺) ₅ [Si ₈ O ₂₂] [OH] ₂
Гастингсит }	NaCa ₂ (Mg, Fe ²⁺) ₄ (Al, Fe ³⁺) [Si ₆ Al ₂) ₈ O ₂₂] [OH] ₂
Паргасит }	
Рихтерит	Na ₂ Ca (Mg, Fe ²⁺) ₅ [Si ₈ O ₂₂] [OH] ₂
Арфведсонит }	NaNa ₂ (Mg, Fe ²⁺) ₄ (Fe ³⁺ , Al) [Si ₈ O ₂₂] [OH] ₂
Режикит }	
Глаукофан }	Na ₂ (Mg, Fe ²⁺) ₃ (Fe ³⁺ , Al) ₂ [Si ₈ O ₂₂] [OH] ₂
Родусит }	

Изоморфные замещения, помимо правила компенсации валентности, как известно, контролируются экспериментально установленными ионными радиусами элементов, о величине которых имеются следующие данные, приведенные в табл. 8.

Таблица 8

Величина ионных радиусов элементов

Fe ²⁺	Fe ³⁺	Al ³⁺	Mn ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Li ⁺	Si ⁴⁺	Ti ⁴⁺	Ti ³⁺	Литературный источник
0,83	0,67	0,57	0,91	1,06	0,98	1,33	0,78	0,78	0,39	0,64	—	Соболев, 1949
0,74	0,64	0,51	0,80	0,99	0,97	1,33	0,66	0,68	0,42	0,68	0,76	Ahrens, 1952
0,80	0,64	0,57	0,91	1,04	0,98	1,33	0,74	0,68	0,39	0,64	—	Бетехтин, 1956

Порядок элементов, расположенных по мере возрастания ионных радиусов, несмотря на колебания их значений, сохраняется постоянным: Si⁴⁺, Al³⁺, Fe³⁺, Li⁺, (Ti³⁺), Ti⁴⁺, Mg²⁺, Fe²⁺, Mn²⁺, Na⁺, Ca²⁺, K⁺.

Номер образца *1	Минерал *2	Содержание ионов в формуле									Основа расчета формулы	Молярный FeO
		Fe ²⁺	Fe ³⁺	Al _{VI}	Mn	Ca	Na	Mg	Li	Si		
Нет	Антофиллит	0,01	0,13	0,00	0,31	0,18	0,10	6,04	—	7,76	$\frac{O,OH}{24}$	1
7649	То же	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	84
5948	Антофиллит-асбест	0,93	0,08	—	0,02	0,02	—	5,73	—	—	$\frac{O,OH}{24}$	117
29	Антофиллит	0,99	—	0,08	0,01	0,21	0,16	5,95	—	7,85	$\frac{O,OH}{24}$	121
5855	Антофиллит-асбест	1,02	0,02	—	0,02	0,03	0,01	5,90	—	—	$\frac{O,OH}{24}$	125
5866	То же	1,03	0,06	0,12	0,06	—	0,18	5,95	—	—	$\frac{Si}{8}$	124
Ж-3	Антофиллит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	125
282	То же	1,20	0,07	0,03	—	0,07	0,13	5,50	—	7,95	$\frac{x+y+z}{15}$	141
30	»	1,26	—	0,15	—	0,09	0,06	5,51	—	7,84	$\frac{O,OH}{24}$	154
52202 *6	»	1,61	0,05	0,19	—	0,16	—	5,02	—	7,86	$\frac{O,OH}{24}$	192
Нет	»	1,80	0,15	0,00	0,11	0,11	0,03	4,81	—	7,84	$\frac{O,OH}{24}$	214
20 *6	Бидалотит	2,02	0,46	1,14	—	—	—	2,67	—	7,42	$\frac{O,OH}{24}$	238
17	Антофиллит	2,11	0,24	0,31	—	0,11	0,18	3,67	—	7,01	$\frac{O,OH}{24}$	251
Нет	Жедрит	1,36	0,07	2,38	0,02	0,19	0,13	1,18	—	6,00	$\frac{Si}{8}$	16
14	То же	1,71	0,13	1,01	—	—	0,02	4,34	—	6,82	$\frac{O,OH}{24}$	20
10 *6	»	1,80	0,20	1,20	0,01	0,08	0,34	3,65	—	6,30	$\frac{O,OH}{24}$	20
8	»	1,83	0,31	1,16	—	0,01	0,07	3,78	—	6,50	$\frac{O,OH}{24}$	21
36851 *6	»	1,96	0,11	1,57	—	0,05	0,21	3,86	—	6,80	$\frac{O,OH}{24}$	22
9	»	2,08	0,07	1,11	—	—	0,12	3,93	—	6,60	$\frac{O,OH}{24}$	24
74-65	»	2,20	0,9	1,40	—	0,10	0,40	1,90	—	6,30	$\frac{O,OH}{24}$	24
1	»	2,21	0,0	1,24	0,02	—	0,41	3,37	—	6,20	$\frac{O,OH}{24}$	23
49625 *6	»	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20
Нет	»	3,90	0,51	1,27	0,02	0,01	0,51	1,03	—	5,69	$\frac{O,OH}{24}$	4
»	»	4,44	0,35	1,68	0,30	—	0,33	0,01	—	6,03	$\frac{O,OH}{24}$	40
8414	Хольмквистит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16
5 *6	То же	0,54	0,93	1,06	0,05	0,01	0,13	2,30	1,91	7,94	$\frac{x+y+z}{15}$	6
Нет	»	0,99	0,03	1,69	0,02	0,08	0,05	2,01	1,90	7,92	$\frac{O,OH}{24}$	12
31	Хольмквистит-асбест	0,98	0,15	2,02	—	0,03	0,09	2,08	1,62	7,80	$\frac{x+y+z}{15}$	1
178	Хольмквистит	1,02	0,23	2,09	0,02	0,15	0,06	1,91	1,33	8,00	$\frac{Si}{8}$	1

Состав и параметры ячейки ромбических амфиболов

Содержание ионов в формуле							Основа расчета формулы	Молекулярные количества				Структурный тип ** (рис. 2)	Параметры	
Mn	Ca	Na	Mg	Li	Si	FeO		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	a		b	
0,31	0,18	0,10	6,04	—	7,76	$\frac{O,OH}{24}$	1	2	6	768	Антофилита	18,5	17,	
—	—	—	—	—	—	—	84	8	—	—	Антофиллита	—	17,	
0,02	0,02	—	5,73	—	—	$\frac{O,OH}{24}$	117	5	4	717	Антофиллита	18,37	18,	
0,01	0,21	0,16	5,95	—	7,85	$\frac{O,OH}{24}$	121	—	14	714	—	18,54	17,	
0,02	0,03	0,01	5,90	—	—	$\frac{O,OH}{24}$	125	3	7	719	Антофиллита	18,48	17,	
0,06	—	0,18	5,95	—	—	$\frac{Si}{8}$	124	4	7	712	—	18,50	18,	
—	—	—	—	—	—	—	125	7	8	686	Антофиллита	18,34	18,	
—	0,07	0,13	5,50	—	7,95	$\frac{x+y+z}{15}$	141	6	13	655	Антофиллита	18,62	18,	
—	0,09	0,06	5,51	—	7,84	$\frac{O,OH}{24}$	154	—	19	665	—	18,58	17,	
—	0,16	—	5,02	—	7,86	$\frac{O,OH}{24}$	192	3	21	595	Антофиллита	18,50	17,	
0,11	0,11	0,03	4,81	—	7,84	$\frac{O,OH}{24}$	214	9	6	571	Антофиллита	18,51	18,	
—	—	—	2,67	—	7,42	$\frac{O,OH}{24}$	238	—	—	—	—	18,55	18,	
—	0,11	0,18	3,67	—	7,01	$\frac{O,OH}{24}$	256	—	—	—	—	18,55	17,	
0,02	0,19	0,13	1,18	—	6,00	$\frac{Si}{8}$	163	4	261	238	Жедрита	18,48	17,	
—	—	0,02	4,34	—	6,82	$\frac{O,OH}{24}$	203	—	—	—	—	18,50	17,	
0,01	0,08	0,34	3,65	—	6,30	$\frac{O,OH}{24}$	209	12	169	424	—	18,55	17,	
—	0,01	0,07	3,78	—	6,50	$\frac{O,OH}{24}$	213	—	—	—	—	18,55	17,	
—	0,05	0,21	3,86	—	6,80	$\frac{O,OH}{24}$	223	6	152	438	Жедрита	18,59	18,	
—	—	0,12	3,93	—	6,60	$\frac{O,OH}{24}$	242	—	—	—	—	18,53	17,	
—	0,10	0,40	1,90	—	6,30	$\frac{O,OH}{24}$	245	49	173	213	Жедрита	18,48	18,	
0,02	—	0,41	3,37	—	6,20	$\frac{O,OH}{24}$	255	—	—	—	—	18,55	17,	
—	—	—	—	—	—	—	262	—	162	384	Жедрита	~18,51	~17,	
0,02	0,01	0,51	1,03	—	5,69	$\frac{O,OH}{24}$	418	27	192	110	Жедрита	18,56	17,8	
0,30	—	0,33	0,01	—	6,03	$\frac{O,OH}{24}$	467	14	193	Нет	—	18,47	17,9	
—	—	—	—	—	—	—	167	—	—	—	Хольмквистита	18,27	17,7	
0,05	0,01	0,13	2,30	1,91	7,94	$\frac{x+y+z}{15}$	68	59	71	290	—	18,32	17,7	
0,02	0,08	0,05	2,01	1,90	7,92	$\frac{O,OH}{24}$	124	—	—	—	—	18,24	17,6	

Таблица 9

Параметры плечейки **			Способ определения параметров	Местонахождение образца	Литературный источник
b	c	β			
17,9	5,27	В е д е 90° 00'	Монокр.	Эдварс	Warren, Modell, 1930
17,99	—		Порошк.*7	Урал	И. В. Гинзбург, устное сообщение *5
18,04	5,22		То же *7	Кольский п-ов	П. П. Токмаков, устное сообщение
17,90	5,28		Монокр.	Монтана	Rabbitt, 1948
17,93	5,26		Порошк.*7	Кольский п-ов	} П. П. Токмаков, устное сообщение
18,00	5,32		То же *7	Там же	
18,00	5,28		» *7	»	} Елисеев и др., 1953 *
18,05	5,29		» *7	»	
17,98	5,28		Монокр.	Монтана	} Rabbitt, 1948
17,98	5,25		Порошк.*7	Кошгсберг	
18,03	5,24		Монокр.	Швеция	Johansson, 1930
18,10	5,28		То же	Индия	} Rabbitt, 1948
17,95	5,31		»	Монтана	
17,76	5,30		Порошк.	Англия	Francis, 1955
17,66	5,31		Монокр.	Монтана	Rabbitt, 1948
17,80	5,28		То же	Карелия	Rabbitt, 1948; Tilley, 1939
17,82	5,28		»	Монтана	Rabbitt, 1948
18,01	5,26		Порошк.*7	Карелия	Игнатьев, 1934 **
17,80	5,28		Монокр.	Монтана	Rabbitt, 1948
18,10	5,25		Порошк.*7	Дальний Восток	М. Л. Гельман, устное сообщение
17,92	5,30	Монокр.	Монтана	} Rabbitt, 1948	
~17,99	~5,25	Порошк.*7	Франция		
17,87	5,25	То же	Финляндия	Seitaari, 1956	
17,92	5,31	»	Япония	Seki, Yamasaki, 1957	
17,78	5,31	Порошк.*7	Кольский п-ов	И. В. Гинзбург, устное сообщение	
17,72	5,28	Монокр.	Швеция	Vogt, Bastianes, Scancke, 1958	
17,66	5,29	Монокр.	Квебек	Nickel, Karpoff..., 1960	
17,77	5,30	Порошк.*8	Кольский п-ов	} Гинзбург, Рогачев, Антонок, Ильинский, 1958	
17,72	5,30	Порошк.*8	Кольский п-ов		

Ж-3	Антофиллит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8	125
282	То же	1,20	0,07	0,03	—	0,07	0,13	5,50	—	7,95	$\frac{x+y+z}{15}$	141
30	»	1,26	—	0,15	—	0,09	0,06	5,51	—	7,84	$\frac{O,OH}{24}$	154
52202*6	»	1,61	0,05	0,19	—	0,16	—	5,02	—	7,86	$\frac{O,OH}{24}$	192
Нет	»	1,80	0,15	0,00	0,11	0,11	0,03	4,81	—	7,84	$\frac{O,OH}{24}$	214
20*6	Бидалотит	2,02	0,46	1,14	—	—	—	2,67	—	7,42	$\frac{O,OH}{24}$	238
17	Антофиллит	2,11	0,24	0,31	—	0,11	0,18	3,67	—	7,01	$\frac{O,OH}{24}$	256
Нет	Жедрит	1,36	0,07	2,38	0,02	0,19	0,13	1,18	—	6,00	$\frac{Si}{8}$	163
14	То же	1,71	0,13	1,01	—	—	0,02	4,34	—	6,82	$\frac{O,OH}{24}$	203
10*6	»	1,80	0,20	1,20	0,01	0,08	0,34	3,65	—	6,30	$\frac{O,OH}{24}$	209
8	»	1,83	0,31	1,16	—	0,01	0,07	3,78	—	6,50	$\frac{O,OH}{24}$	213
36851*6	»	1,96	0,11	1,57	—	0,05	0,21	3,86	—	6,80	$\frac{O,OH}{24}$	223
9	»	2,08	0,07	1,11	—	—	0,12	3,93	—	6,60	$\frac{O,OH}{24}$	242
74-65	»	2,20	0,9	1,40	—	0,10	0,40	1,90	—	6,30	$\frac{O,OH}{24}$	245
1	»	2,21	0,0	1,24	0,02	—	0,41	3,37	—	6,20	$\frac{O,OH}{24}$	255
49625*6	»	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	262
Нет	»	3,90	0,51	1,27	0,02	0,01	0,51	1,03	—	5,69	$\frac{O,OH}{24}$	418
»	»	4,44	0,35	1,68	0,30	—	0,33	0,01	—	6,03	$\frac{O,OH}{24}$	467
8414	Хольмквистит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	167
5*6	То же	0,54	0,93	1,06	0,05	0,01	0,13	2,30	1,91	7,94	$\frac{x+y+z}{15}$	68
Нет	»	0,99	0,03	1,69	0,02	0,08	0,05	2,01	1,90	7,92	$\frac{O,OH}{24}$	122
31	Хольмквистит-асбест	0,98	0,15	2,02	—	0,03	0,09	2,08	1,62	7,80	$\frac{x+y+z}{15}$	122
178	Хольмквистит	1,02	0,23	2,09	0,02	0,15	0,06	1,91	1,33	8,00	$\frac{Si}{8}$	122
3*6	То же	1,24	0,30	1,78	0,02	0,06	0,03	1,55	1,47	8,00	$\frac{Si}{8}$	15
212	»	1,50	0,59	1,21	0,08	—	0,33	1,42	1,63	8,00	$\frac{Si}{8}$	18
221	»	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19

*1 Приведены номера образцов, взятые из литературных источников, коллекций музеев и лабораторные.

*2 Названия, заимствованные из литературных источников, в необходимых случаях, изменены.

*3 Жирным шрифтом выделен тип структуры, установленный по столбиковым диаграммам.

*4 Линейные параметры даны в Å.

*5 Устные сообщения касаются только химических анализов.

*6 Параметры определены не для того образца, который анализировался химически.

*7 Параметры вычислены на основе порошкограмм, полученных авторами.

*8 Параметры вычислены по опубликованным порошкограммам.

Сноски *1 — *8 относятся к этой и последующим таблицам.

* Содержание FeO исправлено по подлиннику химического анализа.

* Содержание CaO исправлено на основании молекулярного количества, что дало совпадение суммы анализов (вместо

5,95	—	—	—	124	4	7	8	686	Автофиллита	18,34	18,00	5,28	»
5,50	—	7,95	$\frac{x+y+z}{15}$	141	6	13	655	Автофиллита	18,62	18,05	5,29	»	
5,51	—	7,84	$\frac{O,OH}{24}$	154	—	19	665	—	18,58	17,98	5,28	Моно	
5,02	—	7,86	$\frac{O,OH}{24}$	192	3	21	595	Автофиллита	18,50	17,98	5,25	Поро	
4,81	—	7,84	$\frac{O,OH}{24}$	214	9	6	571	Автофиллита	18,51	18,03	5,24	Моно	
2,67	—	7,42	$\frac{O,OH}{24}$	238	—	—	—	—	18,55	18,10	5,28	То же	
3,67	—	7,01	$\frac{O,OH}{24}$	256	—	—	—	—	18,55	17,95	5,31	»	
1,18	—	6,00	$\frac{Si}{8}$	163	4	261	238	Жедрита	18,48	17,76	5,30	Поро	
4,34	—	6,82	$\frac{O,OH}{24}$	203	—	—	—	—	18,50	17,66	5,31	Моно	
3,65	—	6,30	$\frac{O,OH}{24}$	209	12	169	424	—	18,55	17,80	5,28	То же	
3,78	—	6,50	$\frac{O,OH}{24}$	213	—	—	—	—	18,55	17,82	5,28	»	
3,86	—	6,80	$\frac{O,OH}{24}$	223	6	152	438	Жедрита	18,59	18,01	5,26	Поро	
3,93	—	6,60	$\frac{O,OH}{24}$	242	—	—	—	—	18,53	17,80	5,28	Моно	
1,90	—	6,30	$\frac{O,OH}{24}$	245	49	173	213	Жедрита	18,48	18,10	5,25	Поро	
3,37	—	6,20	$\frac{O,OH}{24}$	255	—	—	—	—	18,55	17,92	5,30	Моно	
—	—	—	—	262	—	162	384	Жедрита	~18,51	~17,99	~5,25	Поро	
1,03	—	5,69	$\frac{O,OH}{24}$	418	27	192	110	Жедрита	18,56	17,87	5,25	То же	
0,01	—	6,03	$\frac{O,OH}{24}$	467	14	193	Нет	—	18,47	17,92	5,31	»	
—	—	—	—	167	—	—	—	Хольмквистита	18,27	17,78	5,31	Поро	
2,30	1,91	7,94	$\frac{x+y+z}{15}$	68	59	71	290	—	18,32	17,72	5,28	Моно	
2,01	1,90	7,92	$\frac{O,OH}{24}$	124	—	—	—	—	18,24	17,66	5,29	Моно	
2,08	1,62	7,80	$\frac{x+y+z}{15}$	124	9	138	263	Хольмквистита	18,27	17,77	5,30	Поро	
1,91	1,33	8,00	$\frac{Si}{8}$	124	14	127	233	Хольмквистита	18,27	17,77	5,30	То же	
1,55	1,47	8,00	$\frac{Si}{8}$	154	19	112	195	—	18,27	17,78	5,30	»	
1,42	1,63	8,00	$\frac{Si}{8}$	181	36	174	171	Хольмквистита	18,27	17,74	5,30	»	
—	—	—	—	195	32	—	185	Хольмквистита	18,26	17,57	5,34	»	

В е з д е 90°

лекций музеев и лабораторные.
 в случаях, изменены.
 в диаграммам.

химически.
 1.

что дало совпадение суммы анализов (вместо 0,81 принято 0,31)

18,00	5,28	» *7	»	} Елисеев и др., 1953 *
18,05	5,29	» *7	»	
17,98	5,28	Монокр.	Монтана	} Rabbitt, 1948
17,98	5,25	Порошк.*7	Копенгаген	
18,03	5,24	Монокр.	Швеция	Johansson, 1930
18,10	5,28	То же	Индия	} Rabbitt, 1948
17,95	5,31	»	Монтана	
17,76	5,30	00° Порошк.	Англия	Francis, 1955
17,66	5,31	90° Монокр.	Монтана	Rabbitt, 1948
17,80	5,28	То же	Карелия	Rabbitt, 1948; Tilley, 1939
17,82	5,28	»	Монтана	Rabbitt, 1948
18,01	5,26	В е з Д Порошк.*7	Карелия	Игнатъев, 1934 **
17,80	5,28	Монокр.	Монтана	Rabbitt, 1948
18,10	5,25	Порошк.*7	Дальний Восток	М. Л. Гельман, устное сообщение
17,92	5,30	Монокр.	Монтана	} Rabbitt, 1948
~17,99	~5,25	Порошк.*7	Франция	
17,87	5,25	То же	Финляндия	Seitaari, 1956
17,92	5,31	»	Япония	Seki, Yamasaki, 1957
17,78	5,31	Порошк.*7	Кольский п-ов	И. В. Гинзбург, устное сообщение
17,72	5,28	Монокр.	Швеция	Vogt, Bastianes, Scancke, 1958
17,66	5,29	Монокр.	Квебек	Nickel, Karpoff..., 1960
17,77	5,30	Порошк.*8	Кольский п-ов	} Гинзбург, Рогачев, Антолюк, Наливкин, 1958
17,77	5,30	То же *8	Там же	
17,78	5,30	» *8	»	
17,74	5,30	» *7	Восточные Саяны	Хвостова, 1958
17,57	5,34	» *7	Восточная Сибирь	А. С. Назарова, устное сообщение

Состав и параметры

Номер образца *1	Минерал *2	Содержание ионов в формуле								Основа расчета формулы	Me FeO
		Fe ²⁺	Fe ³⁺	AlVI	Mn	Ca	Na	Mg	Si		
26798 *6	Купферит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	84
Нет *6	То же	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Нет
»	Куммингтонит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
»	То же	3,17	0,21	0,16	0,99	0,33	0,07	2,56	8,00	$\frac{Si}{8}$	336
»	»	3,84	0,60	0,32	—	—	—	2,14	8,00	$\frac{Si}{8}$	410
356	»	4,73	0,01	—	—	0,07	0,11	1,61	7,24	$\frac{O,OH}{24}$	—
5	»	4,30	0,10	0,05	—	0,01	0,01	2,44	7,75	»	40
Нет	»	3,90	0,40	—	—	—	—	2,20	8,00	$\frac{Si}{8}$	43
»	»	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
» *6	Грюнерит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	46
A *6	Амозит	4,66	0,25	—	0,08	0,06	—	2,61	7,85	$\frac{O,OH}{24}$	49
4	Грюнерит	5,77	0,01	0,27	0,01	0,98	0,14	0,48	7,83	$\frac{O,OH}{24}$	60
Нет	То же	—	—	—	—	—	—	—	—	—	47
Синтетический	F-тремолит	0,00	0,00	0,00	—	1,99	1	5,00	8,00	$\frac{O,OH}{24}$	Н
Нет	Тремолит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
»	То же	0,04	0,02	0,19	—	2,00	0,03	4,92	7,81	$\frac{O,OH}{24}$	—
1	»	0,04	0,02	0,01	—	1,96	0,07	4,91	7,89	$\frac{O,OH}{23}$	—
1260	»	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Нет	»	0,18	0,12	0,12	—	1,40	0,01	5,08	7,94	$\frac{O,OH}{24}$	—
»	Грамматит	0,20	0,07	0,03	0,06	1,86	0,14	4,78	7,82	$\frac{O,OH}{24}$	—
г-138	Актинолит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
136	То же	0,50	0,25	—	—	1,82	0,67	4,24	7,41	$\frac{O,OH}{23}$	—
504-56	»	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
792	»	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Нет	»	0,61	0,02	0,04	0,03	1,85	0,13	4,49	—	$\frac{O,OH}{24}$	—
185	»	0,71	0,06	0,44	0,02	2,05	0,09	4,30	8,00	$\frac{Si}{8}$	—
с-1	»	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10
Нет	»	0,95	0,10	0,45	0,05	1,57	0,20	3,61	7,67	$\frac{O,OH}{24}$	10
»	»	1,08	0,30	—	0,02	1,50	0,11	3,83	7,23	$\frac{Si + Al}{8}$	11
23	»	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11
6185	Актинолит-асбест	1,28	0,16	0,02	—	2,08	—	3,89	7,99	$\frac{Si + Ti}{8}$	14
6	Актинолит	1,80	0,20	0,24	—	1,85	0,24	2,82	7,56	$\frac{O,OH}{24}$	20
4	То же	1,90	0,40	0,43	0,20	1,60	0,11	2,11	7,58	$\frac{O,OH}{24}$	21
V	»	2,28	0,50	1,23	0,19	2,30	0,04	2,27	8,00	$\frac{Si}{8}$	24
Нет	»	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Состав и параметры ячейки моноклинных амфиболов — куммингтонитов и актинолитов

Ионы в формуле				Основа расчета формулы	Молекулярные количества				Структурный тип ** (рис. 2)	Параметры ячейки **		
Ca	Na	Mg	Si		FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO		a	b	c
—	—	—	—	—	84	Нет	Нет	766	Актинолита	9,77	17,93	5,37
—	—	—	—	—	Нет	2	6	768	—	9,7	17,8	5,25
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9,51	18,19	5,33
0,33	0,07	2,56	8,00	$\frac{Si}{8}$	336	11	8	262	Куммингтонита	9,57	18,22	5,33
—	—	2,14	8,00	$\frac{Si}{8}$	410	32	17	229	Куммингтонита	9,48	18,24	5,33
0,07	0,11	1,61	7,24	$\frac{O,OH}{24}$	—	—	—	—	Куммингтонита	9,55	18,20	5,32
0,01	0,01	2,44	7,75	»	407	—	—	—	Куммингтонита	9,48	18,23	5,30
—	—	2,20	8,00	$\frac{Si}{8}$	433	21	Нет	243	Куммингтонита	9,52	18,26	5,29
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9,96	18,25	5,35
—	—	—	—	—	469	—	—	—	—	9,4	17,9	5,27
0,06	—	2,61	7,85	$\frac{O,OH}{24}$	492	28	5	169	Куммингтонита	9,87	18,22	5,29
0,98	0,14	0,48	7,83	$\frac{O,OH}{24}$	600	—	—	—	Куммингтонита	9,51	18,20	5,33
—	—	—	—	—	473	—	2	280	—	9,96	18,26	5,33
1,99	1	5,00	8,00	$\frac{O,OH}{24}$	Нет	Нет	Нет	631	Актинолита	9,76	17,97	5,26
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9,74	17,83	5,26
2,00	0,03	4,92	7,81	$\frac{O,OH}{24}$	4	1	15	604	—	9,82	18,01	5,26
1,96	0,07	4,91	7,89	$\frac{O,OH}{23}$	6	1	8	606	—	9,83	18,02	5,27
—	—	—	—	—	20	4	10	615	—	—	18,08	—
1,40	0,01	5,08	7,94	$\frac{O,OH}{24}$	22	7	9	566	—	—	18,04	—
1,86	0,14	4,78	7,82	$\frac{O,OH}{24}$	25	4	12	578	Актинолита	9,83	18,05	5,27
—	—	—	—	—	55	4	16	555	Актинолита	9,84	18,01	5,36
1,82	0,67	4,24	7,41	$\frac{O,OH}{23}$	56	15	35	509	—	—	18,04	—
—	—	—	—	—	59	9	22	498	Актинолита	9,79	17,98	5,35
—	—	—	—	—	72	6	—	536	—	—	18,08	—
1,85	0,13	4,49	—	$\frac{O,OH}{24}$	77	5	12	526	—	9,91	18,05	5,30
2,05	0,09	4,30	8,00	$\frac{Si}{8}$	81	4	25	496	Актинолита	9,78	17,98	5,38
—	—	—	—	—	101	9	47	463	—	—	17,97	—
1,57	0,20	3,61	7,67	$\frac{O,OH}{24}$	109	6	46	416	—	—	18,06	—
1,50	0,11	3,83	7,23	$\frac{Si + Al}{8}$	125	17	45	443	—	9,84	18,07	5,33
—	—	—	—	—	129	13	14	429	Актинолита	9,89	18,09	5,29
2,08	—	3,89	7,99	$\frac{Si + Ti}{8}$	146	1	10	444	Актинолита	9,87	18,05	5,22
1,85	0,24	2,82	7,56	$\frac{O,OH}{24}$	208	—	—	—	—	9,92	17,82	5,31
1,60	0,11	2,11	7,58	$\frac{O,OH}{24}$	215	23	50	238	—	9,83	18,10	5,28
2,30	0,04	2,27	8,00	$\frac{Si}{8}$	242	27	12	241	—	—	18,12	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10,14	18,00	5,28

Параметры ячейки **				Способ определения параметров	Местонахождение образца	Литературный источник
a	b	c	β			
9,77	17,93	5,37	75°13'	Порошк.*7	Урал	Kokscharow, 1878
9,7	17,8	5,25	—	Монокр.	Не указано	Warren, 1930
9,51	18,19	5,33	78 05	То же	»	Ghose, 1959
9,57	18,22	5,33	77 52 69 50	»	Швеция	Johansson, 1930 Whittaker, 1960
9,48	18,24	5,33	77 46	Порошк.*8	Побужье	Ушакова, 1958
9,55	18,20	5,32	78 08	То же *7	Кривой Рог	И. П. Иванов, Ф. В. Сыромятников, устное сообщение *5
9,48	18,23	5,30	79 20	» *8	Там же	Шевченко, 1959
9,52	18,26	5,29	79 30	» *8	»	Половинкина, 1953
9,96	18,25	5,35	69 30	»	Нидерланды	Niggli, Tobi, 1953
9,4	17,9	5,27	—	Монокр.	Не указано	Warren, 1930
9,87	18,22	5,29	70 00	То же	Южная Африка	Vermaas, 1953; Garrod, Rapp, 1952
9,51	18,20	5,33	79 15	Порошк.*8	Кривой Рог	Шевченко, 1959
9,96	18,26	5,33	70 10	Монокр.	Квебек	Ghose, Hellner, 1959
9,76	17,97	5,26	75 29	Монокр.	—	Kohn, Comeforo, 1954
9,74	17,83	5,26	74 48	То же	Не указано	Warren, 1930; Zussman, 1959
9,82	18,01	5,26	75 18	»	»	Zussman, 1959
9,83	18,02	5,27	75 15	Порошк.	Нью-Йорк	Shido, 1959
—	18,08	—	—	То же *8	Южная Якутия	Сердюченко, 1960
—	18,04	—	—	» *8	Приднестровье	Шнюков, 1958
9,83	18,05	5,27	75 32	Монокр.	Швеция	Johansson, 1930
9,84	18,01	5,36	74 27	Порошк.*7	Западные Саяны	Д. И. Павлов, устное сообщение
—	18,04	—	—	То же *7	Южная Якутия	Сердюченко, 1960
9,79	17,98	5,35	75 00	» *7	Северный Кавказ	В. В. Плошко, устное сообщение
—	18,08	—	—	Порошк.*8	Урал	Михеев, 1957
9,91	18,05	5,30	74 30	Монокр.	Тироль	Göbner, Mußgnug, 1928
9,78	17,98	5,38	74 53	Порошк.*7	Кольский п-ов	И. В. Гинзбург, устное сообщение
—	17,97	—	—	То же *8	Южная Якутия	Сердюченко, 1960
—	18,06	—	—	» *8	Урал	Овчинников, 1960
9,84	18,07	5,33	75 00	Монокр.	Новая Зеландия	Zussman, 1955
9,89	18,09	5,29	74 40	Порошк.*7	Западные Саяны	Д. И. Павлов, устное сообщение
9,87	18,05	5,22	74 55	То же *7	Кольский п-ов	П. П. Токмаков, устное сообщение
9,92	17,82	5,31	74 09	» *8	Кривой Рог	Шевченко, 1959
9,83	18,10	5,28	75 31	»	Шотландия	Shido, 1959
—	18,12	—	—	» *8	Горная Шория	Чистяков, 1959
10,14	18,00	5,28	73 16	»	Тироль	Niggli, Tobi, 1953

Нет	»	3,90	0,40	—	—	—	—	2,20	8,00	$\frac{\text{Si}}{8}$	433
»	»	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
» *6	Грюнерит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	469
A *6	Амозит	4,66	0,25	—	0,08	0,06	—	2,61	7,85	$\frac{\text{O,OH}}{24}$	492
4	Грюнерит	5,77	0,01	0,27	0,01	0,98	0,14	0,48	7,83	$\frac{\text{O,OH}}{24}$	600
Нет	То же	—	—	—	—	—	—	—	—	—	473
Синтези- ческий	Ф-тремолит	0,00	0,00	0,00	—	1,99	1	5,00	8,00	$\frac{\text{O,OH}}{24}$	Нет
Нет	Тремолит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
»	То же	0,04	0,02	0,19	—	2,00	0,03	4,92	7,81	$\frac{\text{O,OH}}{24}$	4
1	»	0,04	0,02	0,01	—	1,96	0,07	4,91	7,89	$\frac{\text{O,OH}}{23}$	6
1260	»	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20
Нет	»	0,18	0,12	0,12	—	1,40	0,01	5,08	7,94	$\frac{\text{O,OH}}{24}$	22
»	Грамматит	0,20	0,07	0,03	0,06	1,86	0,14	4,78	7,82	$\frac{\text{O,OH}}{24}$	25
г-138	Актинолит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	55
136	То же	0,50	0,25	—	—	1,82	0,67	4,24	7,41	$\frac{\text{O,OH}}{23}$	56
504-56	»	—	—	—	—	—	—	—	—	—	59
792	»	—	—	—	—	—	—	—	—	—	72
Нет	»	0,61	0,02	0,04	0,03	1,85	0,13	4,49	—	$\frac{\text{O,OH}}{24}$	77
185	»	0,71	0,06	0,44	0,02	2,05	0,09	4,30	8,00	$\frac{\text{Si}}{8}$	81
с-1	»	—	—	—	—	—	—	—	—	—	101
Нет	»	0,95	0,10	0,45	0,05	1,57	0,20	3,61	7,67	$\frac{\text{O,OH}}{24}$	109
»	»	1,08	0,30	—	0,02	1,50	0,11	3,83	7,23	$\frac{\text{Si} + \text{Al}}{8}$	125
23	»	—	—	—	—	—	—	—	—	—	129
6185	Актинолит-асбест	1,28	0,16	0,02	—	2,08	—	3,89	7,99	$\frac{\text{Si} + \text{Ti}}{8}$	146
6	Актинолит	1,80	0,20	0,24	—	1,85	0,24	2,82	7,56	$\frac{\text{O,OH}}{24}$	208
4	То же	1,90	0,40	0,43	0,20	1,60	0,11	2,11	7,58	$\frac{\text{O,OH}}{24}$	215
V	»	2,28	0,50	1,23	0,19	2,30	0,04	2,27	8,00	$\frac{\text{Si}}{8}$	242
Нет	»	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Сноска *1—*6 см. в табл. 9.

—	—	2,20	8,00	$\frac{\text{Si}}{8}$	433	21	Нет	243	Куммингтонита	9,52	18,26	5,29	7
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9,96	18,25	5,35	6
—	—	—	—	—	469	—	—	—	—	9,4	17,9	5,27	—
0,06	—	2,61	7,85	$\frac{\text{O,OH}}{24}$	492	28	5	169	Куммингтонита	9,87	18,22	5,29	7
0,98	0,14	0,48	7,83	$\frac{\text{O,OH}}{24}$	600	—	—	—	Куммингтонита	9,51	18,20	5,33	7
—	—	—	—	—	473	—	2	280	—	9,96	18,26	5,33	7
1,99	1	5,00	8,00	$\frac{\text{O,OH}}{24}$	Нет	Нет	Нет	631	Актинолита	9,76	17,97	5,26	7
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9,74	17,83	5,26	—
2,00	0,03	4,92	7,81	$\frac{\text{O,OH}}{24}$	4	1	15	604	—	9,82	18,01	5,26	—
1,96	0,07	4,91	7,89	$\frac{\text{O,OH}}{23}$	6	1	8	606	—	9,83	18,02	5,27	7
—	—	—	—	—	20	4	10	615	—	—	18,08	—	—
1,40	0,01	5,08	7,94	$\frac{\text{O,OH}}{24}$	22	7	9	566	—	—	18,04	—	—
1,86	0,14	4,78	7,82	$\frac{\text{O,OH}}{24}$	25	4	12	578	Актинолита	9,83	18,05	5,27	7
—	—	—	—	—	55	4	16	555	Актинолита	9,84	18,01	5,36	7
1,82	0,67	4,24	7,41	$\frac{\text{O,OH}}{23}$	56	15	35	509	—	—	18,04	—	—
—	—	—	—	—	59	9	22	498	Актинолита	9,79	17,98	5,35	7
—	—	—	—	—	72	6	—	536	—	—	18,08	—	—
1,85	0,13	4,49	—	$\frac{\text{O,OH}}{24}$	77	5	12	526	—	9,91	18,05	5,30	7
2,05	0,09	4,30	8,00	$\frac{\text{Si}}{8}$	81	4	25	496	Актинолита	9,78	17,98	5,38	7
—	—	—	—	—	101	9	47	463	—	—	17,97	—	—
1,57	0,20	3,61	7,67	$\frac{\text{O,OH}}{24}$	109	6	46	416	—	—	18,06	—	—
1,50	0,11	3,83	7,23	$\frac{\text{Si} + \text{Al}}{8}$	125	17	45	443	—	9,84	18,07	5,33	—
—	—	—	—	—	129	13	14	429	Актинолита	9,89	18,09	5,29	—
2,08	—	3,89	7,99	$\frac{\text{Si} + \text{Ti}}{8}$	146	1	10	444	Актинолита	9,87	18,05	5,22	—
1,85	0,24	2,82	7,56	$\frac{\text{O,OH}}{24}$	208	—	—	—	—	9,92	17,82	5,31	7
1,60	0,11	2,11	7,58	$\frac{\text{O,OH}}{24}$	215	23	50	238	—	9,83	18,10	5,28	7
2,30	0,04	2,27	8,00	$\frac{\text{Si}}{8}$	242	27	12	241	—	—	18,12	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10,14	18,00	5,28	73

9,52	18,26	5,29	79 30	» *8	- »	Половинкина, 1953
9,96	18,25	5,35	69 30	»	Нидерланды	Niggli, Tobl, 1953
9,4	17,9	5,27	—	Монокр.	Не указано	Warren, 1930
9,87	18,22	5,29	70 00	То же	Южная Африка	Vermaas, 1953; Garrod, Rann, 1952
9,51	18,20	5,33	79 15	Порошк.*8	Кривой Рог	Шевченко, 1959
9,96	18,26	5,33	70 10	Монокр.	Квебек	Ghose, Hellner, 1959
9,76	17,97	5,26	75 29	Монокр.	—	Kohn, Comeforo, 1954
9,74	17,83	5,26	74 48	То же	Не указано	Warren, 1930; Zussman, 1959
9,82	18,01	5,26	75 18	»	»	Zussman, 1959
9,83	18,02	5,27	75 15	Порошк.	Нью-Йорк	Shido, 1959
—	18,08	—	—	То же *8	Южная Якутия	Сердюченко, 1960
	18,04	—	—	» *8	Приднестровье	Шнюков, 1958
9,83	18,05	5,27	75 32	Монокр.	Швеция	Johansson, 1930
9,84	18,01	5,36	74 27	Порошк.*7	Западные Саяны	Д. И. Павлов, устное сообщение
—	18,04	—	—	То же *7	Южная Якутия	Сердюченко, 1960
9,79	17,98	5,35	75 00	» *7	Северный Кавказ	В. В. Плошко, устное сообщение
—	18,08	—	—	Порошк.*8	Урал	Михеев, 1957
9,91	18,05	5,30	74 30	Монокр.	Тироль	Gosner, Mußgnug, 1928
9,78	17,98	5,38	74 53	Порошк.*7	Кольский п-ов	И. В. Гинзбург, устное сообщение
—	17,97	—	—	То же *8	Южная Якутия	Сердюченко, 1960
—	18,06	—	—	» *8	Урал	Овчинников, 1960
9,84	18,07	5,33	75 00	Монокр.	Новая Зеландия	Zussman, 1955
9,89	18,09	5,29	74 40	Порошк.*7	Западные Саяны	Д. И. Павлов, устное сообщение
9,87	18,05	5,22	74 55	То же *7	Кольский п-ов	П. П. Токмаков, устное сообщение
9,92	17,82	5,31	74 09	» *8	Кривой Рог	Шевченко, 1959
9,83	18,10	5,28	75 31	»	Шотландия	Shido, 1959
—	18,12	—	—	» *8	Горная Шория	Чистяков, 1959
10,14	18,00	5,28	73 16	»	Тироль	Niggli, Tobl, 1953

Ввиду этого представляется возможным связывать изменение определенного параметра кристаллической структуры минерала с изменением содержания элемента определенного ионного радиуса. Закономерные изменения тех или иных параметров ячейки амфиболов, в связи с замещениями одних катионов на другие, обнаруживаются как при анализе цифрового материала таблиц, так и на графиках.

Мы ограничились здесь рассмотрением зависимости «параметр — катион», т. к. попытка найти закономерности между объемом элементарной ячейки и средним ионным радиусом катионов пока не увенчалась успехом.

Цифровые данные состава и параметров амфиболов

Не останавливаясь на рассмотрении связи между изменением величины того или иного параметра ячейки и количества определенного катиона в пределах изоморфных серий, перейдем к сопоставлению отдельных групп амфиболов.

Антофиллиты и жедриты, имеющие различный состав, характеризуются близкими значениями a и b (табл. 9). Это объясняется одновременным замещением в жедритах одной части ионов Mg^{2+} на больший ион Fe^{2+} , а другой части ионов Mg^{2+} на меньшие ионы Fe^{3+} , Al. В целом у жедритов b несколько меньше, чем у антофиллитов, а c несколько больше (за счет замещения части ионов Si большим ионом Al). По сравнению с антофиллитами и жедритами, хольмквиститы обладают наименьшими значениями a , что связано с заменой двух ионов Mg_{VIII} на два иона Li меньших размеров, а также наименьшими значениями b , что связано с заменой двух ионов Mg_{VI} на два иона Al меньших размеров.

Среди моноклинных амфиболов куммингтониты¹ выделяются наименьшим значением a (табл. 10) ввиду того, что позиция с восьмерной координацией здесь занята Mg. В тремолит-актинолитах она занята значительно большим ионом Ca, в роговых обманках также большими ионами Mn, K, Na, а в щелочных амфиболах преимущественно Na. Большие величины b у куммингтонит-амозитов, по сравнению с тремолит-актинолитами, определяются тем, что первые представлены в основном разновидностями, богатыми Fe^{2+} , а вторые (подобно антофиллитам) — разновидностями, бедными Fe^{2+} . В сложном изоморфном ряду паргасит-ферро-(ферри)-гастинситов (табл. 11), а также в ряду щелочных амфиболов (табл. 12) значения a , b и c находятся в близких пределах и мало отличаются от таковых тремолит-актинолитов в своих минимальных и средних значениях. Большие максимальные значения параметров паргасит-гастинситов и щелочных амфиболов определяются нахождением среди них богатых Fe^{2+} и Na разновидностей. Сходство параметров ячейки столь различных известковых и натровых амфиболов обусловлено сочетанием различного рода замещений в октаэдрической позиции, при которых часть мест, занятых одним из ионов, замещается меньшим, а другая часть — большим ионом. Так, у гастингсита, по сравнению с актинолитом, происходит замещение иона Mg на меньшие (Al, Fe^{3+}) и на больший (Fe^{2+}), а у родусита происходит замещение 2 ионов Ca на большие ионы Na и 2 ионов Mg на

¹ Правильнее было бы рассматривать элементарную ячейку антофиллитов не как удвоенную по a ячейку тремолита (Waggen, 1930; Ito, 1950), так как в последнем есть Ca, а как удвоенную по a ячейку куммингтонита, тем более, что средние значения $2a$ куммингтонита $(9,50 \cdot 2 = 19,00)$ ближе к a антофиллита (18,50), чем $2a$ тремолита $(9,80 \cdot 2 = 19,60)$.

Состав и параметры ячейки

Номер образца*1	Минерал*2	Содержание ионов в формуле										Молекулярные количества			
		Fe ²⁺	Fe ³⁺	AlVI	Mn	Ca	Na	K	Mg	Si	Осно- ва рас- чета фор- мулы	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO
2	Роговая об- манка	2,02	0,40	0,17	0,03	1,86	0,32	0,10	2,20	6,15	$\frac{O, OH}{24}$	220	—	—	—
c-17	Паргасит	0,24	0,35	0,91	0,01	1,92	0,47	0,34	3,77	5,88	$\frac{O, OH}{24}$	28	20	176	436
13952*6	Кокшаровит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	33	—	178	408
288—262	Каринтин	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	72	11	149	374
66-A-11	То же	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50	7	113	446
149—43	Смарагдит	0,26	0,05	0,54	—	1,81	0,65	0,05	4,11	6,41	$\frac{O, OH}{24}$	32	3	129	494
745-46*6	Роговая об- манка	1,21	0,43	0,90	—	1,72	0,74	0,09	2,61	6,36	$\frac{O, OH}{24}$	152	24	138	295
E-6	Маггастингсит	0,56	0,50	0,84	0,04	1,83	0,66	0,24	3,48	6,41	$\frac{O, OH}{24}$	64	35	136	359
1247	Паргасит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25	13	166	379
5	Эденит	1,27	0,30	0,15	0,03	1,78	1,00	0,15	3,12	7,09	$\frac{O, OH}{24}$	149	17	60	353
3	То же	1,84	0,54	0,14	0,06	2,26	0,74	0,20	2,26	7,21	$\frac{O, OH}{24}$	209	29	52	249
1	»	1,75	0,44	—	0,22	2,07	1,18	0,01	2,54	6,31	$\frac{O, OH}{24}$	188	23	97	273
1646-45	Роговая об- манка	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	71	19	84	—
5393	То же	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	117	33	103	374
35-II	Гастингсит	1,20	0,61	0,53	0,02	2,00	0,54	0,29	2,53	6,06	$\frac{y+z}{13}$	132	34	118	279
1	Роговая об- манка	0,41	0,36	0,65	0,01	1,92	0,28	0,35	2,97	5,84	$\frac{x+y+z}{15}$	113	20	147	340
429-55	То же	1,67	0,52	0,56	—	1,70	0,28	—	2,46	6,86	$\frac{O, OH}{24}$	188	29	91	276
Нет	Паргасит	—	0,29	—	0,04	1,96	0,89	0,06	4,36	6,25	$\frac{O, OH}{24}$	Нет	17	101	501
»	Керсутит	1,96	0,46	0,56	0,04	1,79	0,87	0,18	2,06	6,13	$\frac{O, OH}{24}$	167	43	97	265
134	Роговая об- манка	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	135	31	106	313

Таблица 11

разнообразных роговых обманок

Структурный тип** (рис. 2)	Параметры ячейки**				Способ определения параметров	Местонахождение образца	Литературный источник
	a	b	c	β			
—	9,93	17,94	5,38	73°39'	Порошк.*8	Кривой Рог	Шевченко, 1959
Рихтерита	9,84	17,97	5,31	74 10	То же *8	Южная Якутия	Сердюченко, 1960
Актинолита	9,80	17,98	5,44	74 17	» *7	Прибайкалье	Kokscharow, 1878
Паргасита	9,83	17,97	5,30	74 19	» *7	Полярный Урал	Н. Г. Удовкина, устное сообщение*5
Паргасита	9,81	17,98	5,25	75 06	» *7	Там же	
—	—	17,98	—	—	» *8	» »	Удовкина, 1960
Паргасита	9,79	17,98	5,23	74 57	» *7	» »	Морковкина, 1953
—	9,79	18,00	5,24	75 26	» *7	Город Онега	Белянкин, Лаврова, 1939
Рихтерита	9,84	18,00	5,31	74 56	» *8	Южная Якутия	Сердюченко, 1960
—	—	18,01	—	—	» *8	Япония	
—	—	18,02	—	—	» *8	Там же	Seki, Aiba, Kato, 1959
—	—	18,04	—	—	» *8	» »	
Гастингсита А	9,80	18,04	5,31	74 40	» *7	Тува	И. В. Гинзбург, устное сообщение
Паргасита	9,86	18,05	5,28	75 09	» *7	Алдан	Г. Т. Кравченко, устное сообщение
Гастингсита А	9,89	18,05	5,44	74 05	» *7	Кузнецкий Алатау	И. В. Гинзбург, устное сообщение
Гастингсита А	9,87	18,05	5,28	74 37	» *7	Средний Урал	Андреева, 1959
Гастингсита А	9,85	18,05	5,38	74 57	» *7	Полярный Урал	Морковкина, 1958
—	9,87	18,06	5,34	73 54	»	Швеция	Gillberg, 1959
—	—	18,07	—	—	» *8	Кольский п-ов	Кавардин, 1960
Гастингсита Б	9,88	18,07	5,34	73 43	» *7	Южная Якутия	Сердюченко, 1960

Номер образца*1	Минерал*2	Содержание ионов в формуле										Молекулярные количества			
		Fe ²⁺	Fe ³⁺	AlVI	Mn	Ca	Na	K	Mg	Si	основа расчета формулы	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO
795	Роговая манка об.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	79	30	47	370
7820	То же	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	136	12	113	325
п-22	» »	1,43	0,70	0,06	0,04	2,05	0,36	—	3,58	6,95	$\frac{O, OH}{24}$	160	39	58	344
1948-2	» »	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	216	1	—	—
2514	» »	1,50	0,41	0,45	—	2,07	0,56	0,27	2,70	6,42	$\frac{O, OH}{24}$	167	23	109	300
1	Эденит	0,23	0,14	0,96	—	2,00	0,26	0,08	3,40	6,90	$\frac{O, OH}{24}$	29	—	—	—
2004	Роговая манка об.	0,91	1,09	0,40	0,01	1,82	0,39	0,49	2,86	6,07	$\frac{O, OH}{24}$	100	60	126	316
44	То же	1,59	0,32	0,56	0,03	2,00	0,02	0,14	2,78	6,61	$\frac{O, OH}{24}$	177	18	102	311
1948	Гастингсит	2,31	1,08	0,45	0,23	1,76	0,45	0,33	1,24	6,54	$\frac{O, OH}{24}$	241	56	94	129
п-27	Роговая манка об.	1,80	0,55	0,25	0,40	1,42	0,52	0,18	1,68	6,28	$\frac{O, OH}{24}$	202	31	103	189
4221	То же	1,44	0,50	0,64	—	1,80	0,38	0,20	2,63	6,37	$\frac{O, OH}{24}$	161	28	121	295
XVIII	Гастингсит	0,12	2,00	0,22	0,10	1,42	0,41	0,44	2,29	5,70	$\frac{O, OH}{24}$	13	114	99	262
III	Роговая манка об.	1,74	0,51	—	—	1,75	0,25	—	2,35	6,75	$\frac{O, OH}{24}$	206	27	67	278
87	Дашкесанит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	276	52	106	117
5394	Роговая манка об.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	118	24	95	286
1960	Гастингсит	1,76	0,15	1,01	0,17	2,03	0,29	0,65	1,27	5,80	$\frac{y+z}{13}$	186	34	169	134
Нет	Роговая манка об.	2,80	1,20	—	0,06	0,59	0,28	0,44	0,59	5,80	$\frac{O, OH}{24}$	301	64	99	62
132-A	Гастингсит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	305	53	123	38
1030—45	Базальтическая роговая обманка	1,67	1,80	0,44	0,03	1,73	0,38	0,10	1,13	6,46	$\frac{O, OH}{24}$	178	96	86	120
2583	Гастингсит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	210	41	139	41

Таблица 11 (продолжение)

Структурный тип** (рис. 2)	Параметры ячейки**				Способ определения параметров	Местонахождение образца	Литературный источник
	a	b	c	β			
—	—	18,08	—	—	Порошк.* ⁸	Средний Урал	Михеев, 1957
—	9,89	18,08	5,30	73°50'	То же* ⁷	Кольский п-ов	И. В. Гинзбург, устное сообщение
Гастингсита А	9,89	18,09	5,29	74 40	» »* ⁷	Средняя Азия	И. Е. Сморгчов, устное сообщение
—	9,86	18,10	5,29	74 25	» »* ⁷	Кольский п-ов	И. В. Гинзбург, устное сообщение
—	9,92	18,11	5,33	74 00	» »* ⁷	Алдан	Шабьнин, 1958
—	9,93	18,11	5,28	73 56	» »* ⁸	Кривой Рог	Шевченко, 1959
Гастингсита Б	9,91	18,11	5,33	73 37	» »* ⁸	Южная Якутия	Сердюченко, 1960
Гастингсита А	9,90	18,12	5,35	73 59	» »* ⁷	Кураминский хребет	И. М. Воловикова, устное сообщение
Гастингсита А	9,88	18,12	5,30	74 30	» »* ⁷	Кольский п-ов	И. В. Гинзбург, устное сообщение
—	9,88	18,13	5,30	74 36	» »* ⁷	Кураминский хребет	О. П. Елисева, устное сообщение
—	9,90	18,13	5,36	74 26	» »* ⁷	Алдан	А. А. Маракушев, устное сообщение
Гастингсита А	9,85	18,13	5,36	74 20	» »* ⁷	Кольский п-ов	И. В. Гинзбург, устное сообщение
—	—	18,16	—	—	» »* ⁸	Горная Шория	Чистяков, 1959
Гастингсита А	9,89	18,17	5,34	72 48	» »* ⁷	Западные Саяны	Д. И. Павлов, устное сообщение
Гастингсита А	9,94	18,18	5,31	74 47	» »* ⁷	Алдан	Г. Т. Кравченко, устное сообщение
Гастингсита Б	9,95	18,18	5,42	74 37	» »* ⁷	Южное Приморье	Г. М. Лобанова, устное сообщение
—	—	18,19	—	—	» »* ⁸	Урал	Овчинников, 1960
Гастингсита А	9,86	18,20	5,28	74 30	» »* ⁷	Кузнецкий Алатау	Е. Д. Андреева, устное сообщение
Гастингсита А	9,89	18,26	5,26	75 04	» »* ⁷	Тува	И. В. Гинзбург, устное сообщение
—	9,87	18,26	5,36	73 20	» »* ⁷	КМА	А. С. Егоров, устное сообщение

Номер образца *1	Минерал *	Содержание ионов в формуле									Молекулярные количества							
		Fe ²⁺	Fe ³⁺	AlVI	Mn	Ca	Na	K	Mg	Si	основа расчета формулы	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO			
Нет *6	Роговая обманка	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
*	Базальтическая роговая обманка	0,03	1,14	0,31	0,01	2,00	0,54	0,32	3,03	5,83	$\frac{O, OH}{24}$	4	64	138	340			
»	Роговая обманка	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	56	28	159	337			
»	Каринтип	0,59	0,17	0,76	—	1,75	0,63	0,22	3,31	6,36	$\frac{O, OH}{24}$	69	11	139	386			
Синтетический	Ф-эденит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Нет	1	64	572			
Нет	Каринтин	0,53	0,40	0,93	0,01	1,44	0,89	0,08	3,06	6,47	$\frac{O, OH}{24}$	63	23	145	363			
»	Барроизит	1,21	0,10	0,90	0,03	1,59	1,08	0,03	2,61	6,54	$\frac{O, OH}{24}$	139	6	135	298			
»	Каринтин	0,90	0,50	1,16	0,01	1,44	1,02	0,17	2,33	6,29	$\frac{y+z}{13}$	103	29	165	268			
»	Керсутит	1,18	0,06	0,00	0,01	1,76	1,11	0,27	2,81	5,93	$\frac{O, OH}{24}$	131	1	109	390			
»	Базальтическая роговая обманка	0,66	0,57	0,40	—	1,82	0,54	0,35	2,88	5,85	$\frac{y+z}{13}$	75	64	289	326			
»	Баркевикит	2,85	0,34	0,58	0,10	1,64	0,61	0,11	1,94	6,45	$\frac{O, OH}{24}$	341	37	47				
»	Роговая обманка	1,18	0,42	1,58	—	1,22	—	—	1,71	6,60	$\frac{y+z}{13}$	139	24	192	201			
»	Базальтическая роговая обманка	0,27	0,80	1,11	—	1,88	0,90	0,37	3,10	5,87	$\frac{O, OH}{24}$	31	46	172	351			

Сноски *1 — *6 см. в табл. 9.

меньшие (Al, Fe³⁺) и части Mg на большие ионы Fe²⁺. В связи с происходящей в итоге компенсацией величин радиусов ионов, получается минимальный или нулевой суммарный эффект изменения *a* и *b* у паргасит-гастингситов и щелочных амфиболов по сравнению с тремолит-актинолитами. Существующие различия кристаллических структур у этих изоморфных серий амфиболов (наблюдающиеся, как отмечалось выше, в расположении линий порошкограмм) оказались затухеванными, ввиду проявлений гетеровалентных замещений катионов в восьмерной и шестерной координациях, и не отразились на *a* и *b*.

Что касается значений *c*, то они находятся в тех же пределах, несмотря на замещение до 2 ионов Si на Al у паргасит-гастингситов и только до 0,5 Si на Al у тремолит-актинолитов и щелочных амфиболов. У куммингтонитов верхний предел значения *c* гораздо ниже; у антофиллитов и хольмквиститов *c* тоже меньше, чем у жедритов. Обращает на себя внимание, что эти амфиболы с пониженными величинами *c* содержат мало или лишены Al в четверной координации (т. е. на месте Si), почти не содержат

Таблица 11 (окончание)

Структурный тип ** (рис. 2)	Параметры ячейки				Способ определения параметров	Местонахождение образца	Литературный источник
	a	b	c	β			
—	9,80	17,90	5,28	—	Монокр.	Не указано	Warren, 1930
—	9,91	17,94	5,32	75°01'	То же	Чехословакия	Heritsch, Riechert, 1960
—	9,89	17,94	5,32	73 41	» »	Италия	Jakob, Branderberger, 1931
—	9,84	17,95	5,29	74 26	» »	Каринтия	Heritsch, Paulisch, Walitzi, 1957
—	9,83	17,96	5,27	75 10	» »	—	Kohn, Gomeforo, 1955
—	9,85	17,97	5,32	74 21	» »	Кунцлербрун	Heritsch, Kahler, 1960
—	9,88	18,00	5,32	73 15	» »	Зальцбург	Heritsch, Paulisch, Walitzi, 1957
—	9,87	18,01	5,29	74 22	» »	Каринтия	Heritsch, Kahler 1960
—	9,85	18,17	5,39	—	» »	Гренландия	Goßner, Spielberger, 1929
—	9,95	18,18	5,35	74 30	» »	Штеермарк	Heritsch, Bertoldi, Walitzi, 1960
—	9,92	18,30	5,33	—	» »	Норвегия	Goßner, Spielberger, 1929
—	9,92	18,37	5,35	~75°	» »	Украина	Куковский, 1958
—	9,94	18,38	5,36	74 15	» »	Богемия	Goßner, Mußgnug, 1928

Са (как тремолит-актинолит), или Na (как глаукофан-родусит), а также отличаются отсутствием или небольшим количеством так называемых «восьмых катионов» (занимающих десятикратную позицию в промежутках между октаэдрами) и присущих паргасит-гастингситам, рихтеритам и арфведсонитам. Согласно указанию Белова (1950), сделанного по поводу диопсида (позиция Са которого соответствует позиции Са в тремолите), искажение кристаллической структуры, связанное с вхождением Са, состоит в удлинении цепочки кремнекислородных тетраэдров, т. е. в увеличении c . Такое же влияние на c , по всей вероятности, оказывает Na, K, т. е. ионы, большие, чем Mg и даже Са. При замещении Si на меньший ион Al, цепочки тетраэдров, напротив, укорачиваются и c убывает. Вхождение восьмого актиона тоже некоторым образом отражается на размерах элементарной ячейки, и, по-видимому, сокращает c , неравномерно увеличивая b и a .

В свете изложенного становится ясным повышенное против куммингтонитов значение c у тремолит-актинолитов, близость c у тремолит-

актинолитов, паргасит-гастингситов и щелочных амфиболов, а также заметное убывание c с уменьшением Si при замещении его на Al в куммингтонитах, антофиллитах и хольмквиститах, где не сказывается влияние Ca и восьмых катионов. Связь между Al_{IV} и c в других амфиболах проявляется лишь в случае прочих равных условий¹.

Таковы главнейшие структурные различия изоморфных серий амфиболов, обнаруженные при сопоставлении параметров ячейки и состава каждой из них. В пределах рассмотренных изоморфных серий амфиболов наблюдаются разновидности, обедненные и обогащенные Fe^{2+} . На примере роговых обманок (De Vore, 1957) и других Fe^{2+} -содержащих силикатов показано, что Fe^{2+} является наиболее сильно поляризующим ионом. И действительно, как следует из обобщенных нами данных (см. табл. 9—12), изменение в содержании Fe^{2+} в большей мере, чем содержание других катионов, сказывается на изменении b и в меньшей мере на изменении a . Показательно, что колебания b , a , а также c , вызванные влиянием Fe^{2+} , в пределах каждой из рассмотренных изоморфных серий несравненно больше колебаний этих параметров, вызванных влиянием Ca, Na и Al_{IV} , а также влиянием Fe^{3+} , Al_{VI} или же влиянием замещений между OH, O, F, Cl. Получается, что изменения параметров ячейки в пределах изоморфных серий более существенные, чем между сериями; соответственно эмпирические закономерности связи Fe^{2+} и параметров ячейки более четкие, чем у других рассматриваемых нами катионов, а также у анионов.

При меньшем разнообразии других катионов, например, у антофиллитов и хольмквиститов, куммингтонитов и тремолит-актинолитов, более отчетливо выражена связь повышения содержания Fe^{2+} с увеличением b и отчасти a . В других изоморфных сериях, особенно там, где имеются уменьшающие решетку ионы Fe^{3+} , Al_{VI} , эта связь оказывается завуалированной. Поэтому в табл. 9 и 10 минералы расположены по возрастанию Fe^{2+} , а в табл. 11 и 12 — по возрастанию b . Если возможность вхождения больших количеств Fe^{2+} в решетку жедритов и паргасит-гастингситов создается заменой Si (до двух ионов) на Al, а также Mg (до двух ионов) на Al и Fe^{3+} (Ramberg, 1952), то условия вхождения больших количеств Fe^{2+} в решетку куммингтонита и щелочных амфиболов, в которых по существу не происходит замены Si на Al, естественно совершенно другие. Здесь, очевидно, играет роль отсутствие Ca в куммингтоните и наличие в большинстве щелочных амфиболов Al_{VI} и Fe^{3+} , валентность которых компенсируется за счет Na, а также замена Ca на Na в рихтерите. Из сопоставления амфиболов различных изоморфных серий следует, что различия параметров их ячеек связаны с явлением поляризации, вызванным характерным для каждой изоморфной группы изоморфным замещением. В силу развития гетеровалентных замещений, т. е. в результате замещения определенных мест решетки как большими, так и меньшими ионами, параметры решетки могут не обнаружить колебаний, что ограничивает возможность применения параметров для целей диагностики амфиболов.

¹ Нельзя не учитывать неясности в положении Ti в структуре амфиболов. По данным А. И. Цветкова (1951), в пироксенах Ti^{3+} занимает места Mg_{VI} , в амфиболах же Ti^{3+} никем не указан. De Vore (DeVore, 1957), Херич (Heritsch, Kahler, 1960) и др. помещают Ti^{4+} в октаэдры на место Mg_{VI} , тогда как В. С. Соболев (1949) признает лишь замещение Si^{4+} на Ti, т. е. положение его в тетраэдрах. Нахождение Ti^{4+} в тетраэдрах должно увеличивать c , а в октаэдрах — слабо уменьшать b и a . Соответственно тому или иному положению Ti^{4+} , варьируют содержания Al_{IV} и Al_{VI} . Нами в большинстве случаев принято нахождение Ti^{4+} в четверной координации.

Номер образца *1	Минерал *2	Содержание ионов в формуле									Ос ра фор
		Fe ²⁺	Fe ³⁺	AlVI	Mn	Ca	Na	K	Mg	Si	
50411 *6	Родусит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
21701 *6	Глаукофан	0,95	0,30	1,63	—	0,10	1,82	0,11	2,15	7,87	
1321	Режикит	0,15	1,05	0,01	0,00	0,15	2,50	0,10	3,81	7,78	
220	То же	0,24	0,5	0,00	0,01	—	3,21	0,08	4,47	7,57	
Нет	Магарфведсонит	0,70	1,52	0,10	0,40	0,07	2,17	0,53	2,00	7,92	
3	Арфведсонит	2,93	0,72	0,11	—	0,68	1,28	0,38	1,12	7,61	
Нет	Глаукофан	0,61	0,12	1,72	—	0,15	1,83	0,12	2,62	7,80	
Синтетический	Рихтерит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	Крокидолит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
103	Родусит	1,25	2,26	0,03	—	0,29	1,30	0,42	1,71	7,10	
21677 *6	То же	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Нет	Арфведсонит	2,80	1,73	0,65	0,06	0,40	2,11	0,25	0,07	7,70	
»	Крокидолит	0,48	1,66	0,05	—	0,17	1,38	0,13	3,05	7,94	
» *6	То же	2,57	1,68	—	—	0,1	1,56	—	0,46	7,95	
46348 *6	На-тремолит	0,09	0,12	—	—	1,55	0,92	0,18	5,14	7,87	
1219	Арфведсонит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Нет	Рибекит	2,42	1,80	—	—	0,29	1,47	0,16	0,45	7,90	
» *6	Озанит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
»	Магрибекит	0,28	1,68	0,22	0,12	0,04	2,95	0,25	2,07	7,86	
795	Рибекит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
128-5	Арфведсонит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
49652 *6	Рихтерит	0,00	0,04	0,06	0,28	1,32	0,83	0,11	4,66	7,94	
118	Родусит	1,73	2,20	—	—	0,22	2,04	0,00	1,29	7,75	
1959	Рихтерит	1,03	0,63	—	0,10	0,92	1,64	0,37	3,22	7,34	
Нет	Рибекит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
E-11	Арфведсонит	3,65	1,05	0,45	0,09	0,51	1,69	0,34	0,10	7,52	
Синтетический	Рихтерит	0,39	0,15	0,00 ₂	0,04	0,74	2,32	0,09	4,74	7,35	
	Крокидолит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
»	Арфведсонит	4,78	0,10	—	0,10	0,63	2,06	0,50	0,01	7,45	
» *6	Магарфведсонит-асбест	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Сноски *1 — *6 см. в табл. 9.

* Формула дана по Мияширо (Miyashiro, 1957).

** Формула и молекулярные количества даны для крокидолитов Кана и Трансваала (среднее из 15 анализов).

*** Исключено 1,40 Ca — 8,00 вес. % CaO, отнесенное за счет загрязнения кальцитом.

Состав и параметры ячейки разнообразных щелочных амфиболов

Содержание ионов в формуле								Основа расчета формулы	Молекулярные количества				Структурный тип ** (рис. 2)	α
Fe ²⁺	Al ^{VI}	Mn	Ca	Na	K	Mg	Si		FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO		
—	—	—	—	—	—	—	—	—	36	47	19	132	Режикита	9,74
0,30	1,63	—	0,10	1,82	0,11	2,15	7,87	$\frac{O, OH}{23}$	95	7	62	378	Глаукофана	9,93
1,05	0,01	0,00	0,15	2,50	0,10	3,81	7,78	$\frac{O, OH}{24}$	18	61	13	441	Режикита	9,84
0,5	0,00	0,01	—	3,21	0,08	4,47	7,57	$\frac{O, OH}{24}$	28	49	6	538	Режикита	9,84
1,52	0,10	0,40	0,07	2,17	0,53	2,00	7,92	$\frac{O, OH}{24}$	79	86	7	227	Режикита	9,84
0,72	0,11	—	0,68	1,28	0,38	1,12	7,61	$\frac{O, OH}{24}$	321	26	38	322	Родусита	9,80
0,12	1,72	—	0,15	1,83	0,12	2,62	7,80	$\frac{O, OH}{23}$	—	—	—	—	—	9,72
—	—	—	—	—	—	—	—	—	Нет	1	Нет	601	—	9,80
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9,72
2,26	0,03	—	0,29	1,30	0,42	1,71	7,10	$\frac{O, OH}{24}$	139	357	34	193	Родусита	9,87
—	—	—	—	—	—	—	—	—	131	98	2	248	Родусита	10,00
1,73	0,65	0,06	0,40	2,11	0,25	0,07	7,70	$\frac{O, OH}{24}$	288	90	40	7	Родусита	9,96
1,66	0,05	—	0,17	1,38	0,13	3,05	7,94	$\frac{O, OH}{24}$	57	98	6	360	Режикита	9,89
1,68	—	—	0,1	1,56	—	0,46	7,95	$\frac{O, OH}{24}$	286	97	2	51	Родусита	9,89
0,12	—	—	1,55	0,92	0,18	5,14	7,87	$\frac{Si + Ti + Al}{8}$	10	6	6	516	Рихтерита	9,80
—	—	—	—	—	—	—	—	—	82	68	24	207	Режикита	9,81
1,80	—	—	0,29	1,47	0,16	0,45	7,90	$\frac{Si + Al}{8}$	266	99	4	50	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	299	92	30	7	—	9,98
1,68	0,22	0,12	0,04	2,95	0,25	2,07	7,86	$\frac{O, OH}{24}$	50	96	18	236	—	9,92
—	—	—	—	—	—	—	—	—	257	89	26	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	106	77	12	265	Режикита	9,80
0,04	0,06	0,28	1,32	0,83	0,11	4,66	7,94	$\frac{Si + Al}{8}$	Нет	2	4	587	Рихтерита	9,87
2,20	—	—	0,22	2,04	0,00	1,29	7,75	$\frac{O, OH}{24}$	189	121	12	141	Родусита	9,86
0,63	—	0,10	0,92	1,64	0,37	3,22	7,34	—	117	36	33	365	Рихтерита	9,88
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9,88
1,05	0,45	0,09	0,51	1,69	0,34	0,10	7,52	$\frac{O, OH}{24}$	377	55	44	Нет	Родусита	9,98
0,15	0,00	0,04	0,74	2,32	0,09	4,74	7,35	$\frac{x + y + z}{16}$	45	17	19	550	—	9,80
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9,63
0,10	—	0,10	0,63	2,06	0,50	0,01	7,45	$\frac{x + y + z}{16}$	498	5	14	1	—	9,87
—	—	—	—	—	—	—	—	—	40	63	2	471	Режикита	9,73

для кроцидолитов Капа и Трансваала (среднее из 15 анализов).
 иное за счет загрязнения кальцием.

ры ячеек разнообразных щелочных амфиболов

Молекулярные количества				Структурный тип ** (рис. 2)	Параметры ячейки **				Способ определения параметров	Местонахождение образца	
FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO		a	b	c	β			
36	47	19	132	Режикита	9,74	17,82	5,27	74°16'	Порошк.*7	Казахстан	Чухро
95	7	62	378	Глаукофана	9,93	17,87	5,26	73 20	То же *7	Пьемонт	Kunil
18	61	13	441	Режикита	9,84	17,88	5,27	73 44	» *7	Урал	} Соб
28	49	6	538	Режикита	9,84	17,88	5,27	73 44	» *7	Там же	
79	86	7	227	Режикита	9,84	17,88	5,27	73 44	» *7	Кольский п-ов	Е. И.
321	26	38	322	Родусита	9,80	17,89	5,23	75 30	» *8	Кривой Рог	Шевч
—	—	—	—	—	9,72	17,89	5,37	75 50	Монокр.	Церматт	Говне
Нет	1	Нет	601	—	9,80	17,92	5,26	75 40	То же	—	Kohn,
—	—	—	—	—	9,72	17,92	5,29	76 06	»	не указано	Zusm
139	357	34	193	Родусита	9,87	17,93	5,28	74 10	Порошк.*7	Кривой Рог	И. П. ков
131	98	2	248	Родусита	10,00	17,94	5,37	70 00	То же *7	Хакассия	Искон
288	90	40	7	Родусита	9,96	17,94	5,32	72 50	» *7	Кольский п-ов	Е. П.
57	98	6	360	Режикита	9,89	17,95	5,30	72 36	Монокр.	Боливия	Whitt
286	97	2	51	Родусита	9,89	17,95	5,26	72 13	Порошк.*7	Кап	Du T
10	6	6	516	Рихтерита	9,80	17,96	5,42	74 13	То же *7	Южное Прибайкалье	Калин
82	68	24	207	Режикита	9,81	17,98	5,22	74 50	» *7	Енисейский кряж	Е. В.
266	99	4	50	—	—	~18,00	—	—	» *8	Кривой Рог	Поло
299	92	30	7	—	9,98	18,02	5,33	72 26	Монокр.	Португалия	Jakob
50	96	18	236	—	9,92	18,02	5,28	73 03	Порошк.*7	Кольский п-ов	Бонд
257	89	26	—	—	—	~18,04	—	—	То же *8	Шотландия	Михе
106	77	12	265	Режикита	9,80	18,08	5,32	75 13	» *7	Енисейский кряж	Е. В.
Нет	2	4	587	Рихтерита	9,87	18,08	5,29	74 46	» *7	Швеция	Sund
189	121	12	141	Родусита	9,86	18,08	5,23	74 40	» *7	Кривой Рог	И. П. ков
117	36	33	365	Рихтерита	9,88	18,09	5,29	72 45	» *7	Енисейский кряж	Н. В.
—	—	—	—	—	9,88	18,10	5,31	76 26	Монокр.	Не указано	Strun
377	55	44	Нет	Родусита	9,98	18,17	5,41	73 46	Порошк.*7	Кольский п-ов	Кулл
45	17	19	550	—	9,80	18,20	5,28	73 58	Монокр.	—	Shiel
—	—	—	—	—	9,63	18,26	5,29	70 00	То же	Зап. Австралия	Garr
498	5	14	1	—	9,87	18,31	5,33	—	»	Гренландия	Говн
40	63	2	471	Режикита	9,73	17,62	5,29	74 12	»	Урал	Андр

Таблица 12

Широта φ	Способ определения параметров	Местонахождение образца	Литературный источник
74° 16'	Порошк.* ⁷	Казахстан	Чухров, 1946
73 20	То же * ⁷	Пьемонт	Kunitz, 1930 *
73 44	» * ⁷	Урал	} Соболева, Соболев, 1959
73 44	» * ⁷	Там же	
73 44	» * ⁷	Кольский п-ов	Е. И. Семенов, устное сообщение* ⁵
75 30	» * ⁸	Кривой Рог	Шевченко, 1959
75 50	Монокр.	Церматт	Göbner, Mußgnug, 1928*
75 40	То же	—	Kohn, Comeforo, 1955
76 06	»	не указано	Zussman, 1959
74 10	Порошк.* ⁷	Кривой Рог	И. П. Иванов, Ф. В. Сыромятников, устное сообщение
70 00	То же * ⁷	Хакассия	Искюль, 1907
72 50	» * ⁷	Кольский п-ов	Е. И. Семенов, устное сообщение
72 36	Монокр.	Боливия	Whittaker, 1949
72 13	Порошк.* ⁷	Кап	Du Toit, 1946 **
74 13	То же * ⁷	Южное Прибайкалье	Калинин, 1939 ***
74 50	» * ⁷	Енисейский кряж	Е. В. Свешникова, устное сообщение
—	» * ⁸	Кривой Рог	Половинкина, 1953
72 26	Монокр.	Португалия	Jakob, Branderberger, 1931
73 03	Порошк.* ⁷	Кольский п-ов	Бондарева, Рогачев, Сахаров, 1959
—	То же * ⁸	Шотландия	Михеев, 1957
75 13	» * ⁷	Енисейский кряж	Е. В. Свешникова, устное сообщение
74 46	» * ⁷	Швеция	Sundius, 1945
74 40	» * ⁷	Кривой Рог	И. П. Иванов, Ф. В. Сыромятников, устное сообщение
72 45	» * ⁷	Енисейский кряж	Н. В. Самойлова, устное сообщение
76 26	Монокр.	Не указано	Strunz, 1957
73 46	Порошк.* ⁷	Кольский п-ов	Куплетский, Воробьева, 1930
73 58	Монокр.	—	Shiebold, 1958
70 00	То же	Зап. Австралия	Garrud, Rann, 1952
—	»	Гренландия	Göbner, Spielberg, 1929
74 12	»	Урал	Андреев, 1959

Приведенные в настоящей статье данные позволяют заключить, что замещение одного иона другим, ввиду анизотропии кристаллической структуры амфиболов в трех направлениях и явлений поляризации, вызывает изменение размеров элементарной ячейки в одном или преимущественно в одном направлении.

Угловые параметры ячейки — β различны у четырех групп моноклинных амфиболов. Наибольшие и наименьшие β отмечены у куммингтонитов, более сближены их значения у щелочных амфиболов; особенно сближены и практически одинаковы β у актинолитов и роговых обманок. Связь между изоморфными замещениями и величиной β пока выявить не удалось.

Графическое изображение связи между параметрами и катионами у амфиболов

Здесь представлена только часть диаграмм, полученных комбинацией тех или иных параметров ячейки с тем или иным катионом. Приведены диаграммы, наиболее отчетливо иллюстрирующие связь определенных параметров ячейки с определенными катионами. Количество точек на диаграммах непостоянно из-за различной полноты цифровых данных.

Известные для амфиболов диаграммы «состав — свойства» сделаны на основе как теоретических конечных членов (А. Винчелл, Г. Винчелл, 1953), так и относительного содержания Fe^{2+} и Mg^{2+} в изоморфных сериях (Трёгер, 1958) или на основе коэффициента железистости — f_m (Шабьнин, 1958). Для наших целей ни одна из этих основ не оказалась подходящей, так как они не учитывают ни различий ионных радиусов элементов, ни замещения Mg не только Fe^{2+} , но и другими катионами. Примененные диаграммы отражают одностороннюю зависимость между метрикой решетки и катионом (или их суммой).

Рассмотрим отдельные диаграммы.

Существенное влияние на изменение линейных параметров ячейки амфиболов оказывает содержание Fe_{VI}^{2+} : изменение b (рис. 3, 4 и 5) и a (рис. 6) выражено сильнее, чем c (рис. 7). Увеличение содержания Fe^{2+} , занимающего октаэдрическую позицию, за счет уменьшения как Mg^{2+} , так и $(Fe^{3+} + Al^{3+})$ представляется определяющим фактором изменения трех линейных, а в связи с ними и углового параметров. Сходное расположение точек отмечается на диаграммах b и Fe^{2+} (см. рис. 3), а также b и $[Fe^{2+} - (Fe^{3+} + Al^{3+})]$ (см. рис. 4) и даже на опущенной здесь диаграмме зависимости b от $(Fe^{3+} + Al^{3+})$. Тем самым наглядно иллюстрируется ничтожное влияние увеличения содержания $(Fe_{VI}^{3+} + Al_{VI}^{3+})$ на уменьшение параметров ячейки амфиболов. Особый интерес представляет тождественный характер зависимостей между параметром и катионом, между параметром и окислом (выраженным в молекулярном количестве или в вес. %) ¹. Например: b и Fe^{2+} (см. рис. 3), b и FeO (см. рис. 4), или a и Fe^{2+} (см. рис. 6), a и FeO (рис. 11 на стр. 30) или c и Fe^{2+} (см. рис. 7), c и FeO (рис. не приведен). Такая зависимость позволяет по величинам параметров непосредственно определять пределы содержания закиси Fe . Это тем более важно ввиду легкости и быстроты (1—5 минут) вычисления b по межплоскостным расстояниям. Найденные по b значения содержания FeO в амфиболах можно, в частности, использовать для уточнения связи оптических свойств с составом.

¹ Этого следовало ожидать, так как Fe^{2+} и FeO (как и другие компоненты) являются функциями состава амфиболов, выраженными в разных величинах. Корреляция между Fe^{2+} и FeO (как и других компонентов) дает прямо пропорциональную зависимость.

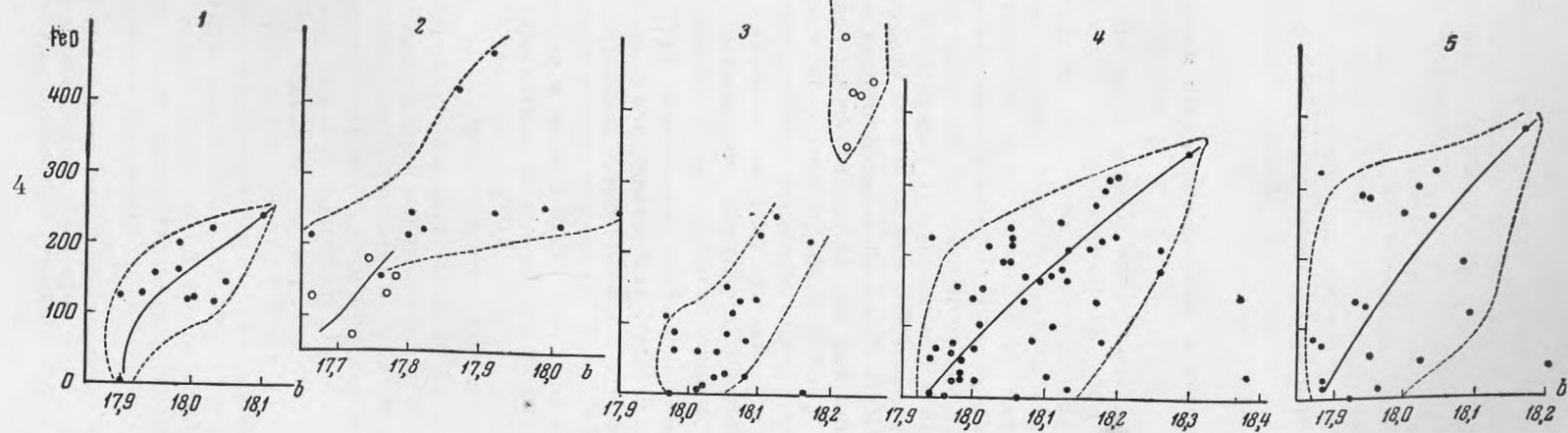
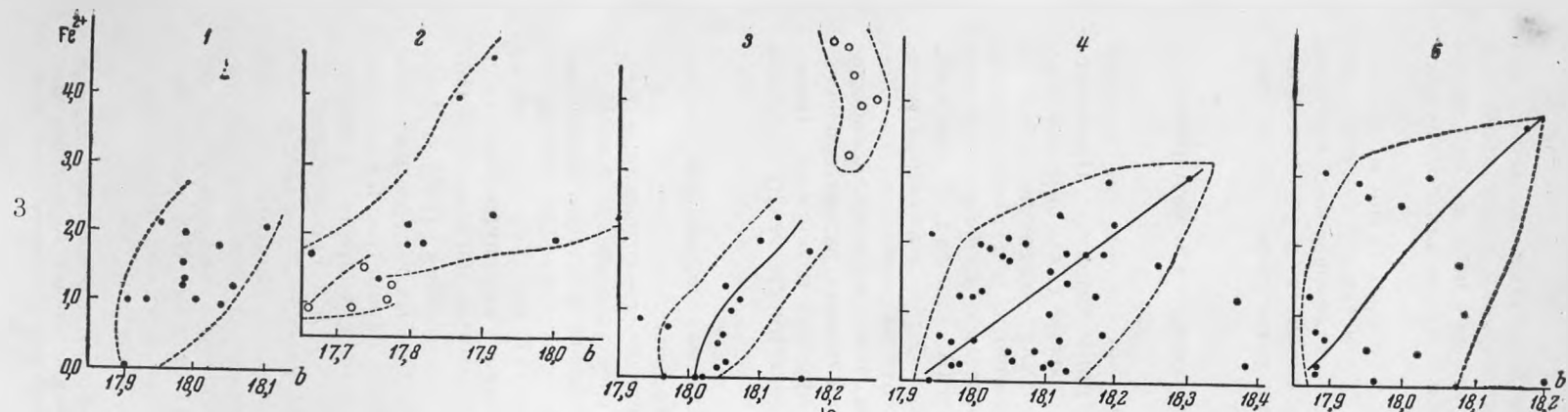


Рис. 3. Соотношения b и Fe^{2+} у амфиболов:

1 — антофиллиты; 2 — хольмквиститы (кружки) и жедриты; 3 — куммингтониты и амозиты (кружки), тремолиты и актинолиты; 4 — паргаситы, эдениты, гастингситы, каринтины и другие роговые обманки; 5 — рихтериты, арфведсониты, рибекиты, кроцидолиты, режикиты и другие щелочные амфиболы. Намечены контуры роев точек и средние вариационные линии

Рис. 4. Соотношения b и FeO (в молекулярном количестве) у амфиболов. Условные обозначения см. рис. 3.

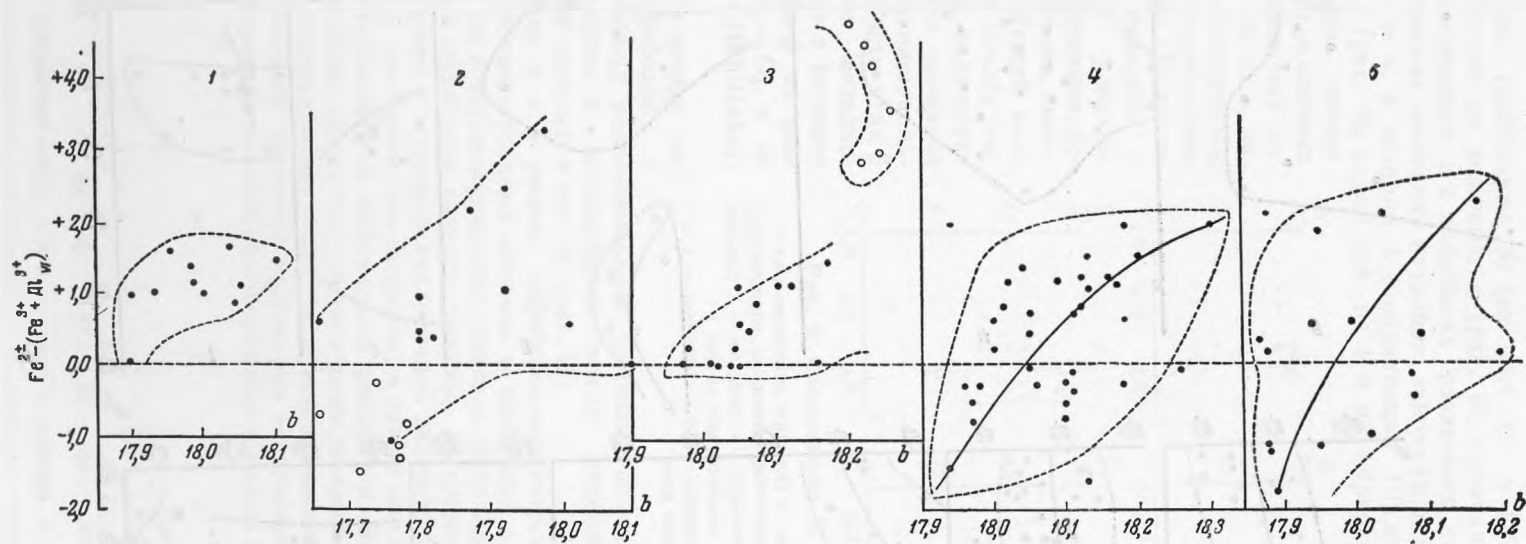


Рис. 5. Соотношения b и $Fe^{3+} - (Fe^{2+} + Al_{VI}^{+3})$ у амфиболов

Условные обозначения см. рис. 3

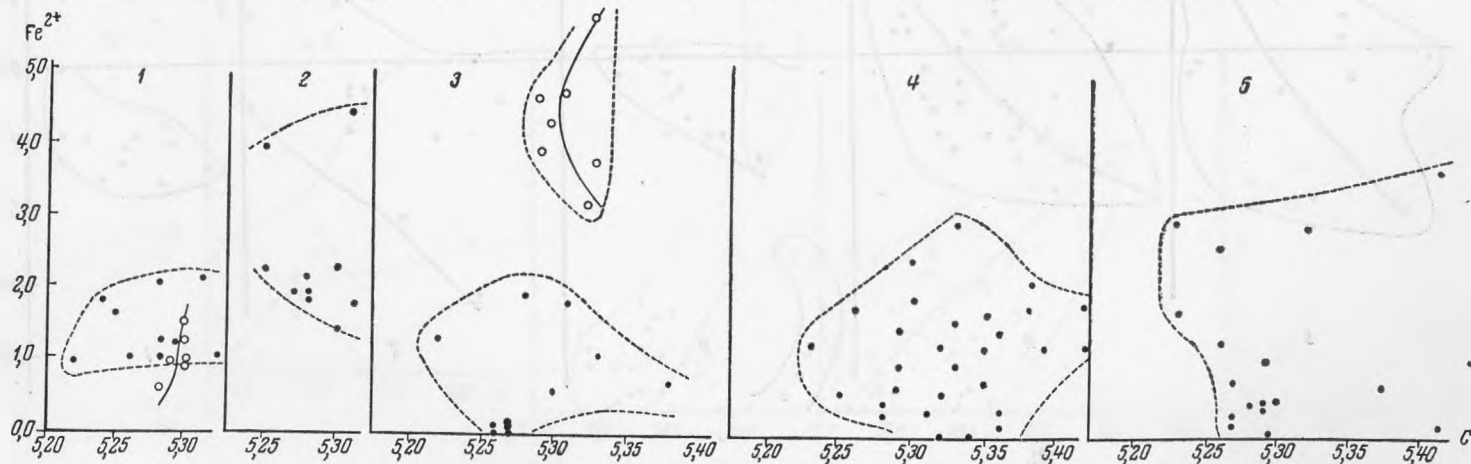
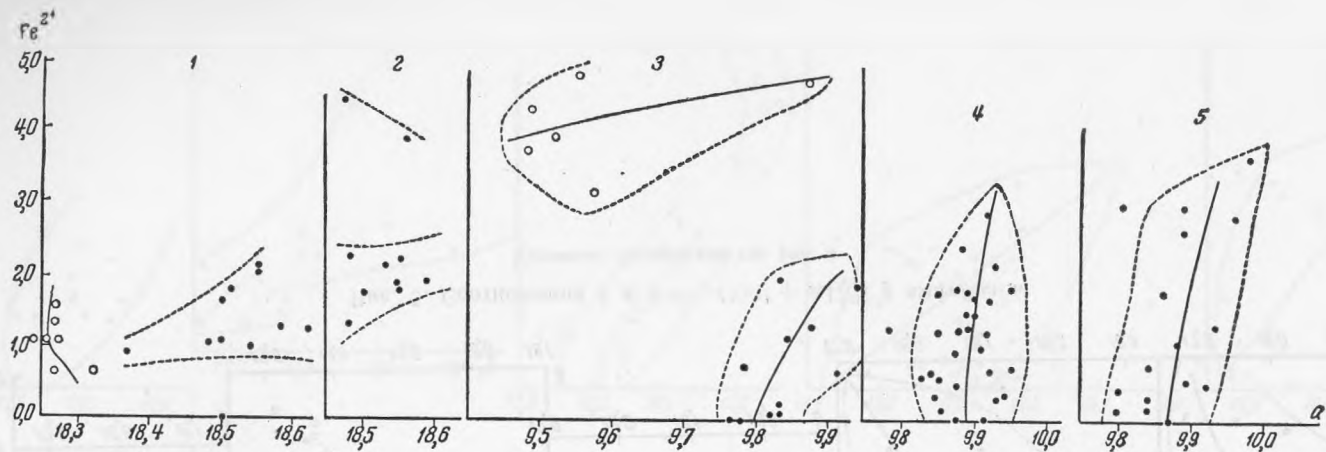


Рис. 6. Соотношения Fe^{2+} и a в амфиболах:

1 — хольмквиститы (кружки) и антофиллиты; 2 — жедриты; 3 — куммингтониты и амозиты (кружки), тремолиты и актинолиты; 4 — паргаситы, эдениты, гастингситы, каринтины, и другие роговые обманки; 5 — рихтериты, арфведсониты, рибекиты, крокидолиты, режикиты и другие щелочные амфиболы.

Намечены контуры роев точек и средние вариационные линии

Рис. 7. Соотношения Fe^{2+} и c в амфиболах. Условные обозначения см. рис. 6

Уменьшение содержания Si (за счет Al^{3+} и Ti^{4+}) до некоторой степени сказывается на величине c (рис. 8), приводя в целом к сходным пределам сокращения c в амфиболах различных серий.

Сумма атомных количеств катионов, заполняющих промежутки между октаэдрами, т. е. в позиции А (координация 10) по существу не отражается на a (рис. 9), равно как на b и на c (рисунки не приведены).

Взаимосвязь между содержанием различных катионов, имеющих координацию 8, т. е. находящихся в позиции M_4 , и угловым параметром β такова (рис. 10), что не позволяет говорить о безусловном увеличении β с увеличением количества катиона, имеющего наибольший ионный радиус. Между тем, на меньшем количестве данных была показана прямо пропорциональная зависимость угла β от радиусов металлических ионов в позиции M_4 , а также β от расстояния M_4-O_4 и от $a \cdot \sin \beta$ (Whittaker, 1960).

Различие между сериями амфиболов, в частности между разнообразными роговыми обманками и арфведсонитами, выражены в соотношениях между линейными параметрами и содержанием окислов в вес. % (рис. 11).

Отношение $a:c$ у разных амфиболов неодинаково (рис. 12). На диаграмме поля точек роговых обманок и щелочных амфиболов как магматического, так и метаморфического генезиса, накладываются друг на друга. Обособления амфиболов разного генезиса, по нашим данным, не замечается, хотя ранее с помощью аналогичной диаграммы было выявлено различие между кросситом, глаукофаном, а также между ними и метаморфическим, интрузивным и эффузивным рибекитом (Schurmann, 1956).

Сделаем общие замечания к приведенным диаграммам. На них отчетливо выражено специфическое свойство кристаллической структуры амфиболов — не изменять значений параметров элементарной ячейки в определенных интервалах колебания содержания того или иного катиона. Ввиду

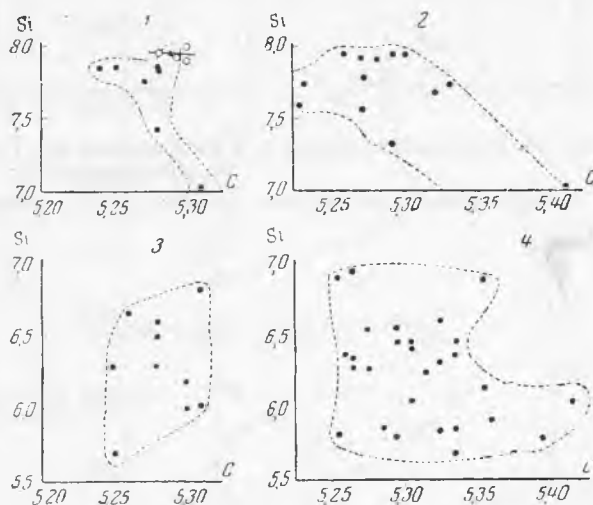


Рис. 8. Соотношения Si и c у амфиболов:

1 — хольмквиститы (кружки) и антофиллиты; 2 — рихтериты арфведсониты, режикиты, рибекиты, родуситы и другие Na-амфиболы; 3 — жедриты; 4 — паргаситы, гастингситы, каринтины и другие обыкновенные роговые обманки.

1 и 2 — силикаты; 3 и 4 — алмосиликаты. Намечены контуры роев точек

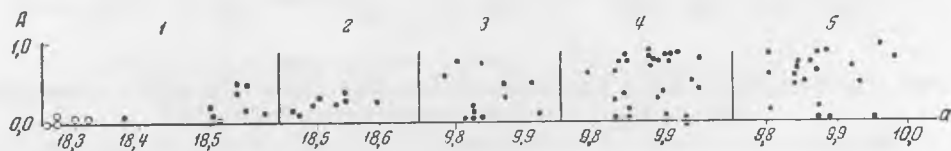


Рис. 9. Соотношения между a и катионами в позиции А («восемьюми» катионами):

1 — хольмквиститы (кружки) и антофиллиты; 2 — жедриты; 3 — актинолиты и тремолиты; 4 — разнообразные роговые обманки; 5 — разнообразные щелочные амфиболы

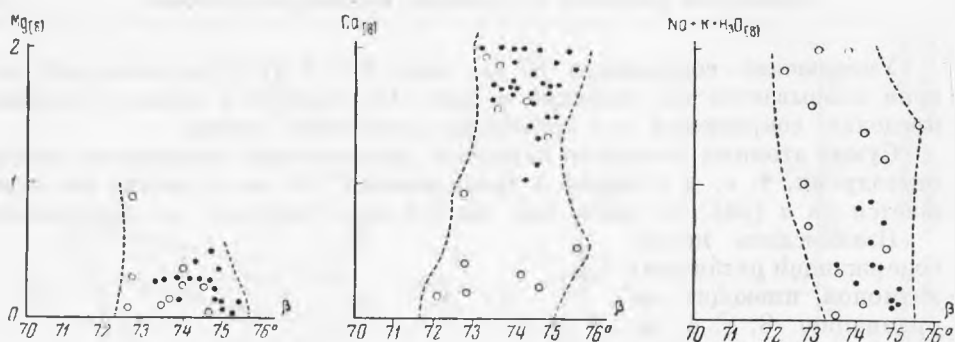


Рис. 10. Соотношения между β и содержанием Mg, Ca, $(\text{Na} + \text{K} + \text{H}_3\text{O}^+)$ в позиции M_4 (координация 8):

точки] — равнообразные роговые обманки; кружки — равнообразные щелочные амфиболы

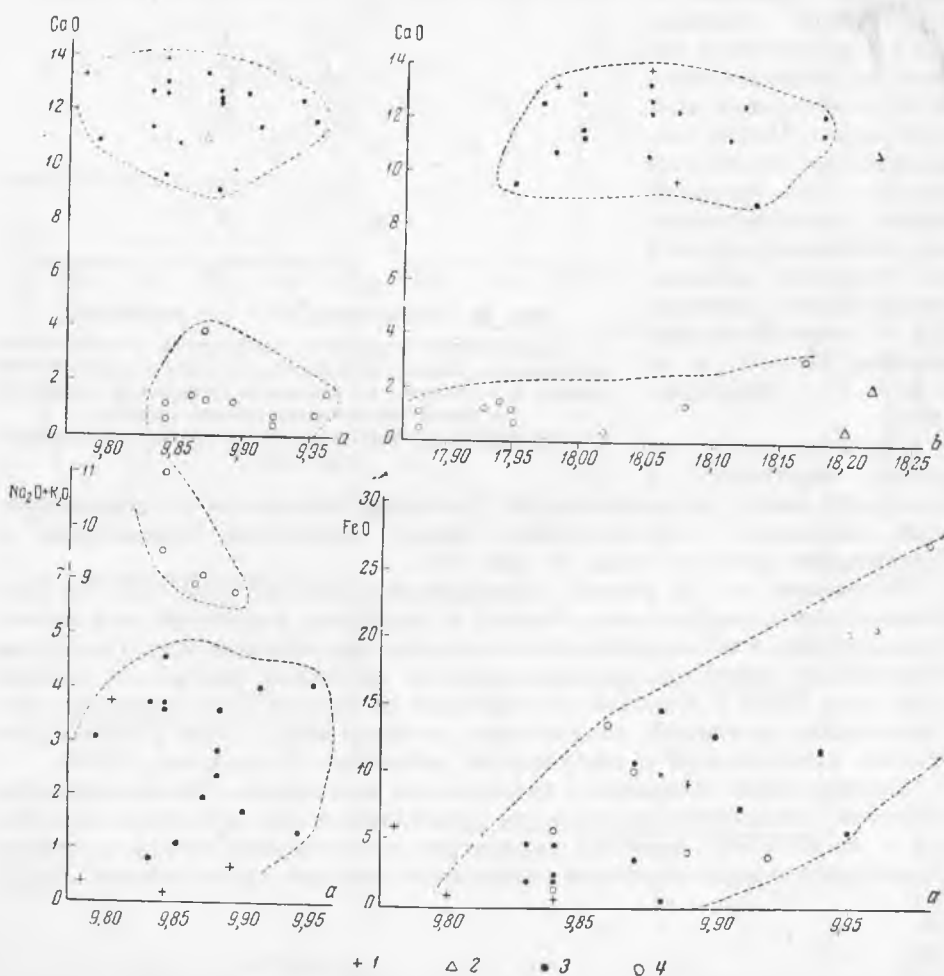


Рис. 11. Соотношения между содержанием отдельных катионов (в вес.%) и постоянными решетками некоторых моноклинических амфиболов:

1 — тремолиты и актинолиты; 2 — куммингтониты; 3 — роговые обманки; 4 — арфведсониты и режикиты

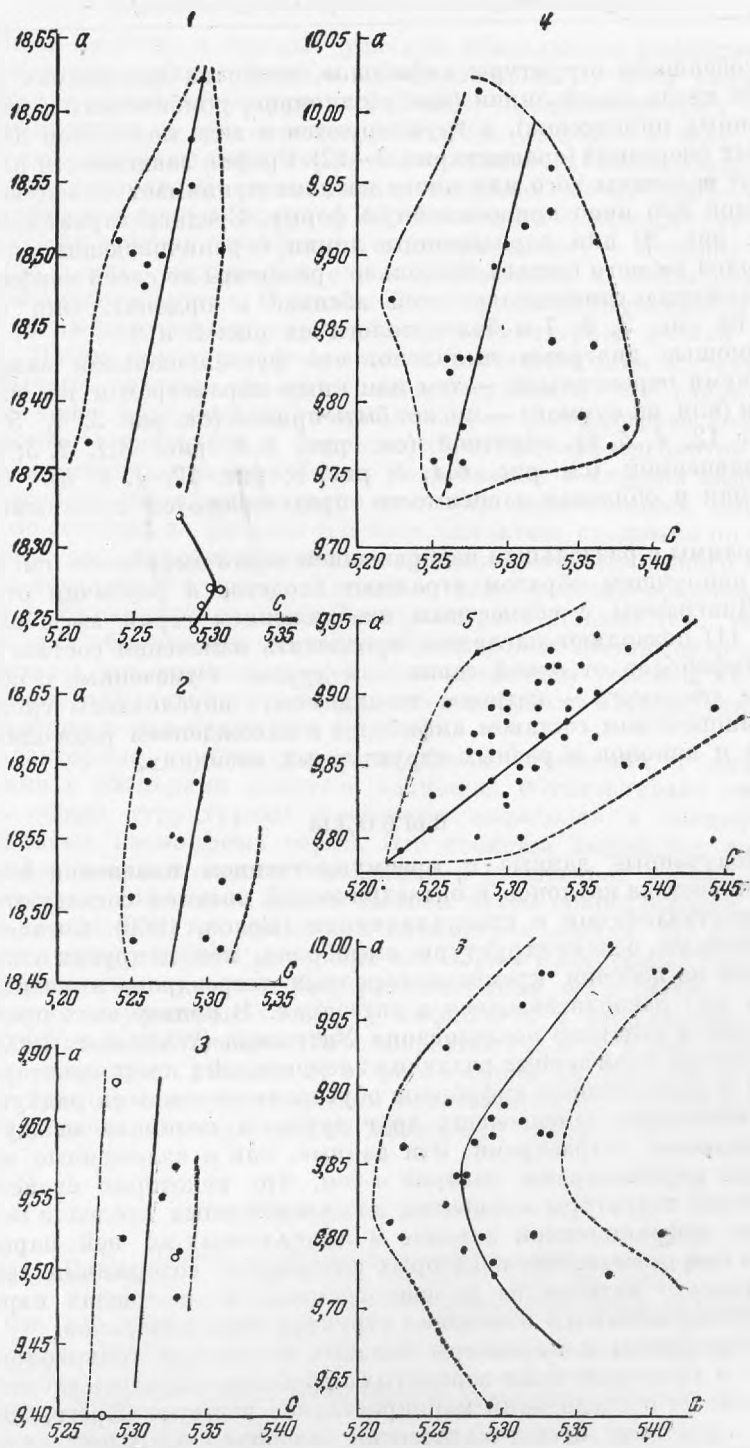


Рис. 12. Соотношения a и c в амфиболах:

1—хольмивиститы (кружки) и антофиллиты; 2—жедриты; 3—амозиты, грюнериты (кружки) и куммингтониты; 4—тремолиты и актинолиты; 5—паргаситы, эдениты, гастингситы, каринтины и другие роговые обманки; 6 — рихтериты, арфведсониты, режикиты, глаук офаны, крокидолиты, ролуситы и другие Na-амфиболы. Показаны контуры роев точек и средние вариационные линии

такой особенности структуры амфиболов, точки на диаграммах располагаются не вдоль одной линии (как у оливинов, ромбических и некоторых моноклинных пироксенов), а группируются в виде полос, зон или полей различных очертаний (сравните рис. 3—12). График зависимости параметра ячейки от величины того или иного катиона принимает близкую к прямолинейной или явно криволинейную форму. Средние вариационные линии (см. рис. 8) или вариационные линии, ограничивающие рои точек, у амфиболов разного состава несколько различны по своей конфигурации и по положению относительно осей абсцисс и ординат. Они крутонаклонны на рис. 3, 6, 7 и более пологи на рис. 8 и 9.

С помощью диаграмм выявлено, что функциональная зависимость между двумя переменными — тем или иным параметром и тем или иным катионом (или их суммой) — может быть прямой (см. рис. 3, 4, 5; рис. 7, 4, 5; рис. 12, 4, 5, 6), обратной (см. рис. 6, 3; рис. 8, 1, 2, 3; рис. 10) или независимой (см. рис. 6, 4, 5; рис. 9; рис. 12, 1, 2, 3). Отмеченные прямая и обратная зависимости представляются сложными функциями.

Диаграммы с отдельным изображением серий амфиболов (см. рис. 3—8 и 12) наилучшим образом отражают сходство и различия отдельных серий. Диаграммы с совместным изображением серий амфиболов (см. рис. 10, 11) позволяют нагляднее проследить изменения состава и параметров амфиболов от одной серии к другой. Отмеченные особенности диаграмм «параметр — катион», по-видимому, обусловлены сложным — многокомпонентным составом амфиболов и нахождением ряда одинаковых катионов и анионов в разных структурных позициях.

ВЫВОДЫ

1. Полученные данные о преимущественном изменении b и a при изменении состава катионов в октаэдрической позиции согласуются с новыми представлениями в кристаллохимии (Белов, 1960). Согласно этим представлениям, основу структуры амфиболов, как и других силикатов, составляют не цепочки кремнекислородных тетраэдров, а катионы Mg, Fe, Ca и др., располагающиеся в октаэдрах. В пользу этих представлений говорят и недавние исследования Уиттакера (Whittaker, 1960), который установил, что главные различия элементарных ячеек некоторых ромбических и моноклинных амфиболов обусловлены ионными радиусами катионов, изоморфно замещающих друг друга в позициях между кремнекислородными тетраэдрами. Эти данные, как и изложенные выше относительно порошкограмм, говорят о том, что некоторые свойства кристаллической структуры амфиболов до определенных пределов не сказываются на дифракционной картине и вычисленных по ней параметрах. И только при превышении некоторых интервалов содержания того или иного главного катиона на порошкограммах и в числах параметров ячейки обнаруживаются изменения структур этих минералов.

2. Дебаеграммы и параметры близких по составу тонковолокнистых (асбесты) и кристаллически-зернистых амфиболов оказались идентичными. Между тем, из исследований монокристаллов известно (Брэгг, 1934), что асбестам свойствен несистематический поворот отдельных волоконцев на произвольный угол вокруг оси c . У зерен гастингсита с малым углом оптических осей (Гинзбург, Белова, 1960) обнаружены непостоянные явления внутреннего двойникования ячейки с удвоением по оси a и двойникование с поворотом вокруг оси c на 180° . Следовательно, изучение порошка не может заменить исследование монокристаллов.

3. Общий генезис и частные условия образования амфиболов лишь посредством изменения состава в незначительной степени сказываются на кристаллической структуре амфиболов — межплоскостных расстояниях и найденных по ним параметрах ячейки. Имеется в виду, что все ромбические амфиболы и некоторые моноклинные (куммингтонит-амозиты и тремолит-актинолиты) имеют исключительно метаморфическое или метасоматическое происхождение. Из них жедрит и антофиллит — минералы больших глубин (до 10 км), а хольмквистит — минерал средних глубин (до 5 км), однако b и a у хольмквистита и объем его ячейки меньше, чем у двух других. В данном случае условия глубинности не отражаются ни на параметрах, ни на объеме элементарной ячейки этих амфиболов. Почти все паргаситы, многие маггастингситы и гастингситы (т. е. обычные роговые обманки), магарфведсониты, все глаукофаны и родуситы тоже образовались тем или иным метаморфическим путем. Большинство гастингситов и феррогастингситов, арфведсонитов и рибекитов полигенные: метаморфические, интрузивные и изредка эффузивные. Среди рассмотренных нами несколько пар моноклинных амфиболов, близких по составу, но разного генезиса, оказались сходными по параметрам ячейки; это роговая обманка из гранодиоритов Полярного Урала и из габбро-пегматитов Среднего Урала, а также роговая обманка из гранодиоритов Кураминского хребта и из скарнов Алдана (см. табл. 11). Часть роговых обманок при близости параметров и состава отличается типом структуры, что, видимо, определяется различием условий их образования. Так, к типу гастингсита Б относятся амфиболы железорудных скарнов докембрия и мел-палеогена.

4. Характерные комбинации изоморфных замещений в амфиболах, в сочетании с размерами радиусов катионов, обуславливают всю совокупность общих структурных признаков амфиболов и специфических черт отдельных изоморфных серий. Эти свойства амфиболов выражены в изменении межплоскостных расстояний и параметров ячейки.

Диагностика амфиболов может вестись путем сопоставления дифракционных картин и путем сравнения параметров ячейки. Из параметров ячейки по a распознаются минералы некоторых изоморфных серий, а по b — магнезиальные и железистые разновидности всех серий.

Изменения параметров ячейки у амфиболов и пироксенов сходны: у тех и других с увеличением Fe^{2+} возрастают a и b , с увеличением Al и Fe^{3+} в октаэдрах убывает b , с увеличением Ca увеличивается a и отчасти c . Это обусловлено сходством кристаллических структур амфиболов и пироксенов и сходством их катионной части.

ЛИТЕРАТУРА

- Андреев Ю. К. Щелочно-амфиболовая минерализация в некоторых змеевиковых массивах Урала.— Труды ИГЕМ АН СССР, вып. 39, 1959.
- Андреева Е. Д. Габбро-пегматиты в пироксенитах горы Синей на Среднем Урале.— Изв. АН СССР, серия геол., № 9, 1959.
- Белов Н. В. Очерки по структурной минералогии.— Минер. сборник Львовск. геол. об-ва, № 7, 1950.
- Белов Н. В. Вторая глава кристаллохимии силикатов.— Журнал структурной химии, № 1, 1960.
- Белянкин Д. С., Лаврова М. А. Кристаллические горные породы окрестностей г. Опеги.— Труды Геол. музея АН СССР, вып. 8, 1939.
- Бетехтин А. Г. Курс минералогии. Гостеолтехиздат, 1956.
- Бондарева А. М., Рогачев Д. Л., Сахаров А. С. Литийсодержащий щелочной амфибол из контактной зоны Ловозерского массива.— Записки Всес. минер. об-ва, часть 88, вып. 6, 1959.

- Б р э г г В. Л. Структура силикатов (перевод с англ.) Гос. науч.-тех. горно-геол.-нефт. изд-во. Л., 1934.
- В и н ч е л л А. И., В и н ч е л л Г. Оптическая минералогия (перевод с англ.). Изд-во иностр. лит-ры, 1953.
- Г и н з б у р г А. И., Г и н з б у р г И. В. О гольмквистите.— Докл. АН СССР, т. 74, № 6, 1950.
- Г и н з б у р г И. В. 1. Гастингсит зоны щелочно-гранитного метасоматоза и изоморфизм в моноклиновых амфиболах.— Труды Минер. музея АН СССР, вып. 11, 1961.
- Г и н з б у р г И. В. 2. О составе ромбических амфиболов и изоморфных замещениях в них.— Труды Минер. музея АН СССР, вып. 11, 1961.
- 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.
- Г и н з б у р г И. В., Р о г а ч е в Д. Л., Б о н д а р е в а А. М. Новые данные о гольмквистите.— Докл. АН СССР, т. 119, № 5, 1958.
- Г и н з б у р г И. В., Р о г а ч е в Д. Л., А н т о н ю к Е. С., Н а л и в к и н А. Б. Гольмквистит — минерал из группы ромбических амфиболов.— Изв. Карел. и Кольск. фил. АН СССР, № 5, 1958.
- Е л и с е е в П. А., Е л и с е е в Э. Н., К о з л о в Е. К. и др. Геология и рудные месторождения Мончегорского плутона.— Материалы Лабор. геол. докембрия АН СССР, 3, 1956.
- И г н а т ь е в П. А. Амфиболиты, гранатовые гедрититы и слюдиты окрестностей села Шуередкого.— Труды Петрограф. ин-та АН СССР, 6, 1934.
- И с к ю л ь В. И. Ородусите с р. Аскыз, к вопросу о его химическом строении и выветривании.— Изв. Акад. наук, 1907.
- К а в а р д и н Г. И. Керсутит из ультраосновных пород некоторых массивов Кольского полуострова. В кн.: «Материалы по минералогии Кольского полуострова», т. 1. Изд-во АН СССР, 1960.
- К а л и н и н П. В. Минералы Слюдянского района. В кн.: «Флогопитовые месторождения Слюдянского района (Ю. Прибайкалье)». ГОНТИ, 1939.
- К р у т о в Г. А. Дашкесанит — новый хлорсодержащий амфибол группы гастингсита.— Изв. АН СССР, серия геол., № 2—3, 1936.
- К у к о в с к и й Е. Г. Роговая обманка из коры выветривания амфиболита.— Минер. сборник Львовск. геол. об-ва, № 12, 1958.
- К у п л е т с к и й Б. М., В о р о б ь е в а О. А. Геолого-петрографические наблюдения на центральном водоразделе Кольского полуострова. Труды Ленингр. об-ва естествоиспыт., т. 60, вып. 4, 1930.
- М и х е е в В. И. Рентгенометрический определитель минералов. Госгеолтехиздат, 1957.
- М о з г о в а Н. Н., Ч е т в е р и к о в С. Д. О даннеморите из месторождений Тетюхе.— Труды Минер. музея АН СССР, вып. 10, 1959.
- М о р к о в к и н а В. Ф. Изменчивость окраски роговой обманки в габброидном комплексе Урала. В кн.: «Вопросы петрографии и минералогии», т. 2. Изд-во АН СССР, 1953.
- М о р к о в к и н а В. Ф. Гранодиоритовая интрузия габбро-перидотитовой формации и связанное с ней редкометальное оруднение.— Труды ИГЕМ АН СССР, вып. 21, 1958.
- О в ч и н и к о в Л. П. Контактво-метасоматические месторождения Среднего и Северного Урала. Изд-во Уральск. фил. АН СССР. Свердловск, 1960.
- П и н е с Б. Я. Лекции по рентгеноструктурному анализу. Изд. Харьковского ун-та, 1957.
- П о л о в и н к и н а Ю. И. Куммингтонит и щелочные амфиболы Кривого Рога.— Минер. сборник Львовск. геол. об-ва, № 7, 1953.
- С е р д ь о ч е н к о Д. П. Амфиболы из магнетитовых и флогопитовых месторождений Алдана. В сб.: «Железные руды Южной Якутии». Изд-во АН СССР, 1960.
- С о б о л е в а М. В., С о б о л е в Н. Д. Генезис и поисковые критерии месторождений голубого режикит-асбеста.— Сов. геол., № 9, 1959.
- С о б о л е в В. С. Введение в минералогию силикатов. Изд-во Львовск. ун-та, 1949.
- Т р ё г е р В. Е. Таблицы для оптического определения породообразующих минералов (перевод с нем.). Госгеолтехиздат, 1958.
- У д о в к и н а Н. Г. О смарагите из Полярного Урала.— Докл. АН СССР, т. 130, № 3, 1960.
- У ш а к о в а Е. Н. О куммингтоните с. Завалья на среднем Побужье.— Минер. сборник Львовск. геол. об-ва, № 12, 1958.
- Ф р а н к - К а м е н е ц к и й В. А. О рентгенометрическом определителе минералов В. И. Михеева.— Записки Всес. минер. об-ва, часть 88, вып. 2, 1959.

- Хвостова В. А. Новая находка голымяквистита.— Докл. АН СССР, т. 118, № 5, 1958.
- Цветков А. И. Изоморфные замещения в группе бесщелочных пироксенов.— Труды Ин-та геол. наук АН СССР, вып. 138, серия петрограф., № 41, 1951.
- Чистяков В. К. Роговые обманки из скарнов Уйзюкского железорудного района в Горной Шории.— Изв. высш. учебн. заведений. Геология и разведка, № 9, 1959.
- Чухров Ф. В. Кызыл-Борбасское месторождение амфибола типа родузита. В кн.: «Вопросы минералогии, геохимии и петрографии». Изд-во АН СССР, 1946.
- Шабьнин Л. И. Еще о значении железистости фемических минералов.— Минер. сборник Львовск. геол. об-ва, № 12, 1958.
- Шевченко Е. В. Амфиболы криворожской метаморфической толщи.— Минер. сборник Львовск. геол. об-ва, № 13, 1959.
- Шендерова А. Г., Соколова Е. П. Эгирин-диопсид среднего Приднепровья (УССР). Минер. сборник Львовск. геол. об-ва, № 12, 1958.
- Шлюков Е. Ф. Тремолит из кварцитов Млынковского участка правобережных днепровских аномалий— Доп. А. Н. Укр. РСР, № 6, 1958.
- Ahrens L. H. The use of ionisation potentials. 1. Ionic radii of elements. *Geochim. et Cosmochim. acta*, 2, № 3, 1952.
- Brown G. M. The effect of ion substitution on the unit cell dimensions of common clinopyroxenes. *Amer. Mineralogist*, 45, № 1—2, 1960.
- Comeforo J. E., Kohn J. A. Synthetic asbestos investigation. I. Study of synthetic fluor-tremolit. *Amer. Mineralogist*, 39, № 7—8, 1954.
- Du Toit A. L. The origin of the amphibole asbestos deposits of South Africa. *Trans. Geol. Soc. South Afr.*, 48, 1945 (1946).
- De Vore G. W. The association of strongly polarizing cations with weakly polarizing cations as major influences in distribution, mineral composition and crystal growth. *J. Geol.*, 65, № 2, 1957.
- Francis G. H. Gedrite from Glen Ughart, Invernes-shire. *Mineral Mag.*, 30, № 230, 1955.
- Francis G. H., Hey M. H. The unit-cell contents of anthophyllite. *Mineral Mag.*, 31, № 233, 1956.
- Garrod R. I., Rann C. S. Preliminary X-ray studies of crocidolite and amosite. *Acta crystallogr.*, 5, № 2, 1952.
- Ghose S. Crystal structure of cummingtonite and Mg-Fe ordering in ferromagnesian amphiboles. *Bull. Geol. Soc. America*, 70, № 12, 1959.
- Ghose S., Hellner E. The crystal structure of grunerite and observations on the Mg-Fe distribution. *J. Geol.*, 67, № 6, 1959.
- Gillberg M. A lead-bearing variety of pargasite from Långban, Sweden. *Ark. mineral. och geol.*, 2, № 5, 1960.
- Goßner B., Müßnug F. Vergleichende röntgenographische Untersuchung von Magnesiumsilikaten. *Neues Jahrb. Mineral. Beilg.* Band., 58, 1928.
- Goßner B., Spielberger F. Chemische und röntgenographische Untersuchungen an Silikaten. Ein Beitrag zur Kenntnis der Hornblende-gruppe. *Z. Kristallogr.*, 72, № 2, 1929.
- Heritsch H., Paulisch P., Walitzi E.-M. Die Struktur von Karinthin und einer barroisitischen Hornblende. *Tschermaks Mineral. u. Petrogr. Mitt.*, 6, 3, 1957.
- Heritsch H., Bertoldi G., Walitzi E.-M. Strukturuntersuchung an einer basaltischen Hornblende von Kuruzzenkogel südlich Fehring, Stiermark. *Tschermaks Mineral. u. Petrogr. Mitt.*, 7, 3, 1960.
- Heritsch H., Kahler E. Strukturuntersuchung an zwei Kulkarinthinen. Ein Beitrag zur Karinthinfrage. *Tschermaks Mineral. u. Petrogr. Mitt.*, 7, 3, 1960.
- Heritsch H., Riechert L. Strukturuntersuchung an einer basaltischen Hornblende von Cernosin, CSR. *Tschermaks Mineral. u. Petrogr. Mitt.*, 7, 3, 1960.
- Hess H. H. Orthopyroxene of the Bushveld type, ion substitutions and changes in unit-cell dimensions. *Amer. J. Sci.*, 1952, Bowen vol. 1.
- Hey M. H. On the correlation of physical properties with chemical composition in multivariate system. *Mineral. Mag.*, 31, № 232, 1956.
- Ito T. X-ray studies on polymorphism. Tokyo, 1950.
- Jakob J., Brandenberger E. Chemische und röntgenographische Untersuchungen an Amphibolen. Schweiz. *Mineral. u. Petrogr. Mitt.*, 1931, 11.
- Johansson K. Vergleichende Untersuchungen an Anthophyllit, Grammatit und Cummingtonit. *Z. Kristallogr.*, 73, 1930.
- Koksharov N. Materialien zur Mineralogie Rußlands, 1878, № 8.
- Kohn J. A., Comeforo J. E. Synthetic asbestos investigation. II. X-ray and

- other data on synthetic fluor-richichterite,-edenite. *Amer. Mineralogist*, 40, № 5—6, 1955.
- K o v r í m s k ý J. Príspevek k určování pyroxenu. *Sbor. Národn. musea Praze*, 11, № 7 (Min. № 1), 1955.
- K u n i t z W. Die Isomorphieverhältnisse in Hornblende-gruppe. *Neues Jahrb. Mineral., Abt. A, Bd. 60 (Beilg. Band.)*, 1930.
- K u n o H. Study of orthopyroxenes from volcanic rocks. *Amer. Mineralogist*, 39, 30, 1954.
- M o r i m o t o N. Pyroxenes. *Carneg. Inst. Washington*, 57, 249, 1958.
- M i y a s h i r o A. The chemistry, optics and genesis of the alkali-amphiboles. *J. Fac. Sci. Univ. Tokyo, sect 2*, 11, 2, 1957.
- N i c k e l E. N., K a r p o f f B. S., M a x w e l l J. A., R o w l a n d J. F. Holmquistite from Barraute, Quebec. *Canad. Mineral.*, 6, № 4, 1960.
- N i g g l i E., T o b i A. Über ein Cummingtonit-Quarz-Plagioclasgestein als Glazialgeschiebe in Drente (Niederlande), mit einer Bemerkung über die röntgenographische Bestimmung der Amphibole. *Kon. Nederl. Akad. Wet., ser. B*, 56, № 3, 1953.
- R a b b i t t J. C. A new study of the anthophyllite series. *Amer. Mineralogist*, 33, № 5-6, 1948.
- R a m b e r g H. Chemical bonds and distribution of cations in silicates. *J. Geol.*, 60, 1952.
- R a m b e r g H., D e - V o r e G. The distribution of Fe^{2+} and Mg^{2+} in coexisting olivines and pyroxenes. *J. Geol.*, 59, № 3, 1951.
- S c h u r m a n n H. M. E. The geology of glaucophane rocks in Turkey und Japan: a summary. *Geol. en Mijnbouw n. s., jd.-18*, 1956.
- S e i t a r i I. A. ferroan-aluminian antophyllite from Kemiö, Finland. *Bull. Commiss. Geol. Finland*, 29, № 172, 1956.
- S e k i Y., A i b a M., K a t o C. Edenite in Sanbagawa crystalline schists of the Sibakawa district, central Japan. *Japan. J. Geol. a. Geogr.*, 30, 1959.
- S e k i Y., Y a m a s a k i M. Aluminian ferroanthophyllite from the Kitakami Mountainland, Northeastern Japan. *Amer. Mineralogist*, 42, № 7—8, 1957.
- S h i d o F. Notes on rock-forming minerals (8) chemical, optical and X-ray data on a tremolite and three actinolites. *J. Geol. Soc. Japan*, 65, № 768, 1959.
- S h i e b o l d E. Röntgenografische Feinstrukturuntersuchungen an natürlichen und synthetischen Asbestarten. *Wiss. Z. Hochschule Schwermaschinenbau*, 2, № 1, 1958.
- S t r u n z H. Mineralogische Tabellen. Leipzig, 1957.
- S u n d i u s N. The position of the richterite in the amphibole group. *Geol. Fören. Stockholm Förhandl.*, 67, 2, № 441, 1945.
- T i l l e y C. E. Kyanite-gedrite parageneses. *Geol. Mag.*, 76, № 901, 1939.
- V e r m a a s F. H. S. The amphibole asbestos of South Africa. *Geol. Soc. Afr., Trans.* 55, 1953 (1952).
- V o g t T., B a s t i a n e s O., S c a n c k e P. Holmquistite as rhombic amphibole. *Amer. Mineralogist*, 43, № 9—10, 1958.
- W a r r e n B. E. The crystal structure and chemical composition of the monoclinic amphiboles. *Z. Kristallogr.*, 72, 1930.
- W a r r e n B. E., M o d e l l D. I. The structure of anthophyllite. *Z. Kristallogr.*, 75, 1930.
- W h i t t a k e r E. J. W. The structure of bolivian crocidolite. *Acta crystallogr.*, 2, № 5, 1949.
- W h i t t a k e r E. J. W. The crystal chemistry of the amphiboles. *Acta crystallogr.*, 13, № 4, 1960.
- Z u s s m a n J. The crystal structure of an actinolite. *Acta. cristallogr.*, 8, 301, 1955.
- Z u s s m a n J. A re-examination of the structure of tremolite. *Acta crystallogr.*, 12, № 4, 1959.
- Z w a a n P. C. On the determination of pyroxenes by x-ray powder diagrams. *Leidse geol. meded.*, 19, 1954 (1955).
- Z w a a n P. C., P l a s L. Optical and X-ray investigation of some pyroxenes and amphiboles from Nagpur, India. *Kon. Nederl. Akad. wet.*, 61, № 4, 1958.