

А. Я. ХМАРА, З. И. ХМАРА

**ПАРАГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ АНТОФИЛЛИТА
И АНТОФИЛЛИТ-АСБЕСТА ИЗ МЕТАУЛЬТРАБАЗИТОВ***(Представлено академиком В. С. Соболевым 27 VIII 1973)*

Антофиллит встречается в природе в антофиллит-кордиеритовых, антофиллит-кордиерит-плагноклазовых, антофиллит-куммингтонитовых, антофиллит-кордиерит-корунд-силлиманит-битовнитовых породах, рассланцованных метагаббро, жедрит- и кордиеритсодержащих амфиболитах и гнейсах и в ультраосновных породах ⁽¹⁾. Наиболее распространен антофиллит в измененных ультрабазитах среди гнейсово-мигматитовых комплексов, где широко развита его волокнистая разновидность — антофиллит-асбест. Поскольку антофиллит является типичным метаморфическим минералом амфиболитовой фации и, как все амфиболы, отражает закономерные связи состава и условий образования, нами проведено детальное изучение химического состава антофиллита и антофиллит-асбеста из метаультрабазитов. Аналогичные работы были выполнены ранее без учета формационного положения вмещающих пород ^(2, 3).

После строгой отбраковки использовано 64 химических анализа антофиллита ⁽¹⁾ и антофиллит-асбеста ⁽⁴⁾ из метаультрабазитов, из них 33 оригинальных. Аналогично ^(4, 5), мы не использовали анализы, в которых: а) нет определений H_2O и п.п.п; б) не произведено определение одного или нескольких главных окислов; в) сумма анализа резко отклонялась от установленной нормы; г) при пересчете на кристаллохимическую формулу имело место резкое отклонение отдельных катионов, особенно Si^{4+} . После исключения влаги и примеси магнезита химические анализы приведены к 1000% и пересчитаны на кристаллохимическую формулу по методу ⁽⁶⁾. По формационному типу ультрабазитов, в которых образовались изучаемые минералы, они разделены на две группы формаций: 1) дунит-гарцбургитовую (11 анализов антофиллита, 41 анализ антофиллит-асбеста) и 2) габбро-пироксенит-перидотитовую (по 6 анализов антофиллита и антофиллит-асбеста). Средние значения и статистические характеристики химического состава антофиллита и антофиллит-асбеста из метаультрабазитов обоих формационных типов в окислах и коэффициенты кристаллохимических формул вычислены на ЭВМ МИР-1. Анализ табл. 1—3 позволяет выявить различия в содержаниях главных компонентов — SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , Fe_2O_3 , MgO , CaO и значениях общей молекулярной железистости F . Для антофиллита из метаультрабазитов дунит-гарцбургитовой формации характерно более высокое содержание SiO_2 (на 2,10%), MgO (на 3,04%) и более низкое FeO (на 2,43%), Fe_2O_3 (на 0,99%), Al_2O_3 (в 2 раза), CaO (в 2,3 раза), а также более низкое значение (на 5,6%) общей железистости по сравнению с антофиллитом из метаультрабазитов габбро-пироксенит-перидотитовой формации. Антофиллит-асбест из метаультрабазитов дунит-гарцбургитовой формации характеризуется более высоким содержанием SiO_2 (на 0,76%), MgO (на 1,20%) и более низким содержанием FeO (на 1,40%), Fe_2O_3 (в 2 раза), CaO (в 2,4 раза) и значением общей железистости (на 2,3%). Указанные различия в химическом составе антофиллита и антофиллит-асбеста из метаультрабазитов разных формационных типов отчетливо проявляются также в средних значениях коэффициентов кристаллохимических формул (табл. 2) и показателях пре-

Таблица 1

Средний химический состав (%) и параметры распределения окислов в антофиллите (над чертой) и антофиллит-асбесте (под чертой) из метасульфидных дунит-гарцбургитовой ($n_1=11$; $n_2=41$) и габбро-пироксенит-перидотитовой ($n_1=6$; $n_2=6$) формаций

Компоненты	Дунит-гарцбургитовая формация						Габбро-пироксенит-перидотитовая формация					
	$\bar{x}$	S	A	E	V	χ^2	$\bar{x}$	S	A	E	V	χ^2
SiO ₂	57,69	0,87	-0,18	-0,01	1,5	2,2	55,59	0,84	-0,24	-1,07	1,51	0,7
	58,76	0,77	-0,28	-0,06	1,5	1,3	58,00	1,45	0,15	-1,26	2,49	2,3
TiO ₂	Сл.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	0,03	—	—	—	—	—	0,03	0,04	0,72	-1,06	106,6	2,3
Al ₂ O ₃	0,72	0,62	0,36	-0,98	86,6	2,2	1,45	0,75	0,46	-0,74	51,7	2,3
	0,60	0,42	0,67	-0,40	77,2	18,6	0,32	0,28	0,72	-0,68	87,2	5,7
Fe ₂ O ₃	0,55	0,72	1,22	0,04	130,9	14,9	1,54	1,02	0,80	-1,13	66,7	9,0
	0,70	0,72	1,15	0,87	103,0	30,3	1,43	1,08	0,35	-1,10	75,5	0,7
FeO	9,22	2,30	-0,55	-1,04	24,9	4,0	11,65	1,30	0,12	-1,53	11,2	2,3
	7,71	1,81	-1,59	0,60	23,4	45,2	9,11	2,04	0,15	-1,82	22,4	5,7
MnO	0,19	0,16	0,47	-0,60	84,7	4,9	0,26	0,09	-0,39	-1,58	36,7	5,7
	0,14	0,09	0,89	1,53	67,7	22,3	0,19	0,09	-1,11	0,06	49,5	4,0
MgO	28,67	1,34	0,68	0,14	4,7	4,9	25,63	0,75	-1,33	0,47	2,9	3,5
	28,44	1,21	0,11	-1,45	4,2	6,2	27,24	1,19	-0,90	-0,23	4,4	2,3
CaO	0,33	0,31	0,61	-0,82	94,1	3,1	0,75	0,69	0,62	-1,39	92,4	4,0
	0,07	0,12	1,98	2,71	182,1	81,3	0,17	0,13	0,14	-0,98	81,1	5,7
Na ₂ O	0,09	—	—	—	—	—	0,15	0,15	0,58	-1,05	104,4	5,7
	0,08	0,14	3,28	10,5	179,0	126,7	0,09	0,11	1,38	0,47	126,2	5,7
K ₂ O	0,04	—	—	—	—	—	0,10	0,09	0,50	-1,12	94,5	2,3
	0,05	0,07	3,74	17,3	156,4	119,1	—	—	—	—	—	—
Cr ₂ O ₃	0,15	—	—	—	—	—	0,06	—	—	—	—	—
	0,10	0,13	1,13	0,17	130,9	44,7	Сл.	—	—	—	—	—
NiO	0,01	—	—	—	—	—	0,01	—	—	—	—	—
	0,10	0,08	0,02	-1,33	79,9	9,4	0,05	—	—	—	—	—
H ₂ O ⁺	2,28	0,44	0,03	-1,48	21,1	3,1	2,72	0,44	0,07	-1,41	16,1	2,3
	3,16	0,88	1,21	0,81	27,9	22,3	3,31	0,95	0,63	-1,22	28,6	2,3
F	16,5	4,3	-0,49	-0,93	26,0	2,2	22,1	2,59	0,71	-0,22	11,7	2,3
	14,3	2,3	0,001	-1,16	16,1	2,3	16,6	3,44	0,20	-1,17	20,7	0,7
N _g	1,638	—	—	—	—	—	1,643	—	—	—	—	—
	1,630	—	—	—	—	—	1,633	—	—	—	—	—
N _p	1,618	—	—	—	—	—	1,619	—	—	—	—	—
	1,604	—	—	—	—	—	1,611	—	—	—	—	—

Примечание. В единичных пробах, кроме того, содержится Со до 0,01; Р₂О₅ до 0,20; SO₃ до 0,11. Здесь и в табл. 2: n — число анализов антофиллита (n_1) и антофиллит-асбеста (n_2), $\bar{x}$ — среднее содержание, S — среднее квадратическое отклонение, A — коэффициент асимметрии, E — показатель эксцесса, V — коэффициент вариации χ^2 — критерий распределения.

ломления (табл. 1). Зависимость значения показателей преломления антофиллита и антофиллит-асбеста из метасульфидных дунит-гарцбургитовой (1) и габбро-пироксенит-перидотитовой (2) формаций выражается уравнениями регрессии:

$$N_g = 1,6073 + 0,001727F, \quad N_p = 1,585 + 0,00166F; \quad (1)$$

$$N_g = 1,613 + 0,00136F, \quad N_p = 1,592 + 0,001213F. \quad (2)$$

Антофиллит-асбестсодержащие метасульфидные дунит-гарцбургитовые формации представлены энстатит-антофиллитовыми, энстатит-талк-карбонат-антофиллитовыми, талк-антофиллитовыми, антофиллит-талк-карбонатными, талк-карбонат-антофиллитовыми, антофиллит-талк-карбонатными, вермикулит-антофиллит-талковыми и хлоритсодержащими антофиллит-карбонат-талковыми и талк-карбонат-антофиллитовыми породами.

Таблица 2

Средний состав (в формульных единицах кристаллохимических формул)
и параметры распределения компонентов в антофиллите (над чертой)
и антофиллит-асбесте (под чертой) по формациям

Ком- понен- ты	Дунит-гарцбургитовая формация						Габбро-пироксенит-перидотитовая формация					
	$\bar{x}$	S	A	E	V	χ^2	$\bar{x}$	S	A	E	V	χ^2
Mg	5,83	0,21	0,20	-0,31	3,6	3,1	5,33	0,16	-1,07	-0,03	3,0	2,3
	5,71	0,23	0,007	-0,91	4,1	7,4	5,53	0,29	-0,20	-0,93	5,3	2,3
Fe ²⁺	1,05	0,27	-0,51	-1,06	26,0	5,8	1,36	0,15	0,07	-1,55	11,3	2,3
	0,88	0,16	0,38	-0,43	18,3	13,5	1,04	0,25	0,08	-1,90	23,6	5,7
Fe ³⁺	0,02	—	—	—	—	—	0,14	0,12	0,53	-1,25	84,4	2,3
	0,06	0,07	1,02	0,27	102,4	23,7	0,10	0,07	0,50	-0,26	68,6	4,0
Mn	0,02	0,02	0,58	-0,50	87,6	5,8	0,03	0,01	-0,28	-1,47	50,9	2,3
	0,025	0,011	0,63	0,26	75,0	9,8	0,02	0,01	-1,00	-0,05	50,3	4,0
Ca	0,05	0,05	0,57	-0,90	93,3	3,1	0,11	0,10	0,62	-1,42	95,1	5,7
	0,01	0,17	1,76	1,88	175,3	81,5	0,03	—	—	—	—	—
Al ^{VI}	0,04	—	—	—	—	—	0,01	—	—	—	—	—
	0,02	0,04	1,83	2,38	188,2	79,8	—	—	—	—	—	—
Na	0,03	—	—	—	—	—	0,03	0,04	0,67	-1,13	107,8	4,0
	0,02	0,04	3,43	11,13	214,5	126,7	0,03	—	—	—	—	—
K	0,00	—	—	—	—	—	0,02	0,02	0,61	-0,87	96,6	0,7
	0,01	0,01	3,79	17,43	179,4	127,2	0,01	—	—	—	—	—
H ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	0,27	0,23	0,28	-1,23	88,1	12,0	0,26	—	—	—	—	—
Al ^{IV}	0,09	0,08	0,35	-1,51	86,8	3,1	0,21	0,14	0,67	-0,57	66,5	4,0
	0,07	0,58	0,67	-0,62	85,1	15,5	0,05	0,05	0,69	-0,65	83,8	2,3
Fe ³⁺	0,02	—	—	—	—	—	0,01	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	0,05	—	—	—	—	—
Si	7,89	0,08	-0,08	-1,57	1,07	1,3	7,78	0,15	-0,55	-0,66	1,9	2,3
	7,93	0,06	-0,46	-0,87	0,75	9,9	7,90	0,09	-1,23	0,02	1,2	9,0
O	21,93	0,11	-1,25	0,10	0,51	4,2	21,77	0,33	-1,35	0,26	1,5	5,2
	21,70	0,26	-0,12	-1,32	1,18	4,6	21,65	0,31	-0,30	-1,45	1,4	3,5
OH	0,07	—	—	—	—	—	0,23	0,33	1,37	0,29	144,9	9,0
	0,30	0,26	0,27	-1,26	88,8	13,3	0,35	0,31	0,31	-1,45	90,1	4,0
O	0,09	—	—	—	—	—	0,19	—	—	—	—	—
	0,05	0,10	2,04	3,04	207,8	94,0	0,05	—	—	—	—	—
OH	1,91	0,14	-1,38	0,63	7,1	5,1	1,81	0,28	-1,07	-0,49	15,7	2,5
	1,95	0,10	-1,99	2,92	5,28	22,3	1,95	0,09	-1,76	1,14	4,7	4,2

ми. Крайне редко в ассоциации с антофиллитом находится актинолит. Характерной особенностью этих пород является грубозернистое, реже гигантозернистое сложение, столбчатые, пучковые (сноповые), звездчатые структуры, ассоциации антофиллит — антофиллит-асбест — тальк — карбонат, антофиллит — антофиллит-асбест — эпстатит — тальк — карбонат и антофиллит — антофиллит-асбест — тальк.

Антофиллит-асбестоносные метаультрабазиты габбро-пироксенит-перидотитовой формации представлены обычно хлорит-хризотил-карбонат-антофиллитовыми, хлорит-карбонат-антофиллитовыми, хлорит-антофиллит-тремолитовыми породами, антофиллитизированными тремолититами, серпентинитами и дунитами. Для них характерны преимущественно мелко- и среднезернистое сложение, звездчатые структуры, ассоциации хлорит —

Таблица 3

Содержание основных окислов (№ 1, вес. %) и катионов (№ 2, форм. ед.) в антофиллите (над чертой) и антофиллит-асбесте (под чертой) из метаультрабазитов

№ п. п.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO
Дунит-гарцбургитовая формация						
1	56,17—59,14	0—1,94	0—2,16	5,13—12,35	26,77—31,73	0—0,96
	56,70—60,13	0,03—1,55	0—2,83	5,05—11,15	26,56—30,51	0—0,45
2	7,76—8,00	0—0,32	0—0,23	0,58—1,44	5,45—6,25	0—0,14
	7,79—8,00	0—0,26	0—0,28	0,66—1,28	5,21—6,15	0—0,06

Габбро-пироксенит-перидотитовая формация

1	54,21—56,75	0,45—2,78	0,65—3,32	10,08—13,51	24,04—26,37	Сл.—1,82
	56,26—60,29	0—0,84	0—3,22	7,05—11,76	24,92—28,56	0—0,39
2	7,51—7,97	0,15—0,46	0,07—0,34	1,17—1,58	5,01—5,50	0—0,27
	7,71—7,98	0—0,14	0—0,33	0,78—1,32	5,04—5,94	0—0,05

Таблица 4

Сопоставление химизма антофиллита и антофиллит-асбеста двух парагенетических типов

Параметр	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	F
$K = m - 1$	6	5	7	8	7	9
$\chi^2_{\text{выч}}$	20,2	7,3	15,8	21,9	30,4	25,6
$\chi^2_{5\%}$	12,6	11,1	14,1	15,5	14,1	16,9
$\chi^2_{1\%}$	16,8	15,1	18,5	20,1	18,5	21,7
$t (5\% = 1,96)$	3,3	2,1	2,3	4,7	5,0	3,6

карбонат — антофиллит — антофиллит-асбест и хлорит — тремолит — антофиллит.

Таким образом, изучение минеральных ассоциаций антофиллит-асбест-содержащих метаультрабазитов, химического состава и оптических свойств антофиллита и антофиллит-асбеста позволило выделить два парагенетических типа этих минералов в измененных ультраосновных породах. Для подтверждения этого вывода при помощи параметрических критериев χ^2 и t выполнена проверка однородности двух выборок по пяти основным компонентам и общей железнистости (табл. 4): первой, включающей химические анализы антофиллита и антофиллит-асбеста из метаультрабазитов дунит-гарцбургитовой формации, и второй, составленной из химических анализов антофиллита и антофиллит-асбеста габбро-пироксенит-перидотитовой формации.

Вычисленные значения критериев превышают критические при степени вероятности $P = 0,95$. Это указывает на неоднородность исследуемых выборок, т. е. на значимые различия в химическом составе и общей железнистости антофиллита и антофиллит-асбеста выделенных парагенетических типов, что объясняется наследованием ими состава первичных минералов материнских ультрабазитов.

Институт минеральных ресурсов
Симферополь

Поступило
20 VIII 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ У. А. Дир, Р. А. Хауи, Дж. Зусман, Породообразующие минералы, т. 2, М., 1965.
- ² В. С. Соболев, Е. А. Костюк, В кн.: Матер. по генетической и экспериментальной минералогии, т. 3, Новосибирск, 1965.
- ³ М. В. Соболева, Минералогия волокнистых минералов группы амфиболов и серпентина, М., 1972.
- ⁴ Е. А. Костюк, Статистический анализ и парагенетические типы амфиболов метаморфических пород, М., 1970.
- ⁵ J. G. A. Rabbitt, Am. Mineral., v. 33, № 5—6 (1948).
- ⁶ И. Д. Борнеман-Старынкевич, Зап. Всесоюз. мин. общ., т. 69, в. 2 (1970).