

УДК 552.331

В. А. АГАМАЛЯН¹, Б. ШУЛЫЦ², А. РЕННО², Я. ЛАНГЕ², Т. К. ЛОРСАБЯН¹

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ
МЕТАМОРФИЗМА КАСАХСКОЙ СВИТЫ ДОКЕМБРИЯ АРМЕНИИ
ПО АМФИБОЛОВОМУ ТЕРМОБАРОМЕТРУ

Определены термодинамические условия метаморфизма (T и P) пород докембрийского фундамента Армении с применением амфиболового термобарометра по результатам 104 микрозондовых химических анализов амфиболов на двух образцах, взятых из офиолитовых метабазальтовых амфиболитов касакской свиты докембрия Армении. Был определен общий тренд метаморфизма в амфиболитовой фации и фации зеленых сланцев в параметрах $T=420-640^{\circ}\text{C}$ и $P=1,6-5,7$ кбар с низким геотермическим градиентом в $12^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Выявлены проградные магнезиогорнбленд-чермакитовые и ретроградные магнезиогорнбленд-актинолитовые зональности амфиболов, а также реликты керсутита, сохранившиеся от первично-магматической роговой обманки исходного базальта.

Введение. P , T -условия преобразования и эволюции разновозрастных метаморфических комплексов Армении были изучены Агамяном В.А. на основании минеральных парагенезисов по аналогии с эталлонными областями Земли с применением ряда микрозондовых анализов минералов [1]. Ранее им были определены амфиболитовая фация и Бахнский тип метаморфизма для арзаканской серии среднего протерозоя в параметрах $T=550^{\circ}\text{C}$ и $P=3,8$ кбар [2] и был установлен верхнепротерозойский метаморфизм в фации зеленых сланцев далларской серии при $T=460-480^{\circ}\text{C}$ и $P=4,0$ кбар [3], наложенный на среднепротерозойский комплекс в качестве диафтореза.

Минералогическая термобарометрия обычно проводится по паре сосуществующих минералов-новообразований по коэффициенту распределения какого-либо компонента между ними (K_d^a). Однако в последнее время было выяснено, что кальциевые амфиболы в парагенезисе амфибол–плагиоклаз–эпидот–хлорит–кварц претерпевают закономерные преобразования химического состава в зависимости от одновременного изменения и температуры, и давления, т.е. они являются природными термобарометрами, что было доказано экспериментально [4]. При изменении давления и/или температуры в ходе метаморфизма породы амфибол обменивается катионами с сосуществующими минеральными фазами, приспособляя свой химический состав к новым условиям. На этом основании была выработана методика определения

P, *T*-параметров метаморфизма по химическому составу амфиболов [5]. Данная методика была опробована на ставших классическими Дальрединских метаморфических комплексах Шотландии [6].

Проведенные исследования. Нами проведено 104 химических анализа, выполненных на микрозонде JEOL JXA 8900 в микрозондовой лаборатории Института минералогии Фрайбергского университета Германии под руководством доктора А.Ренно. Препараты для микрозондовых исследований были изготовлены доктором И. Ланге. Зондирование выполнено по кристаллам амфиболов из двух образцов амфиболитов казахской свиты докембрия Армянского (Цахкуняцкого) кристаллического массива – № 2154 и 2177. Эти образцы отобраны на участках к северу от с. Чкнах и отстоят друг от друга на 3,5 км. Результаты указанных химических анализов приводятся в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Микрозондовые химанализы амфибола (Am) по кристаллам образца № 2154 (вес. %)

№№ точек анализов	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	Total	Кристалл
151	45,72	0,35	9,79	16,62	0,34	10,36	12,47	0,68	1,04	0,05	97,42	Am2-1
152	41,95	0,42	11,99	17,30	0,37	8,72	12,08	0,71	1,36	0,04	94,95	Am2-2
153	42,72	0,35	10,94	16,70	0,30	9,22	11,75	0,71	1,11	0,02	93,84	Am2-3
154	44,15	0,40	11,56	16,32	0,32	9,97	12,66	0,77	1,21	0,05	97,41	Am2-4
165	42,22	0,53	13,06	16,66	0,23	9,44	12,52	1,27	1,53	0,06	97,52	Am5-1
166	42,12	0,66	13,40	16,25	0,26	9,09	12,38	1,34	1,56	0,18	97,24	Am5-2
167	42,57	0,61	13,51	16,64	0,24	9,13	12,54	1,39	1,55	0,09	98,25	Am5-3
168	42,48	0,66	13,44	16,51	0,25	9,29	12,32	1,36	1,51	0,07	97,90	Am5-4
169	42,47	0,73	13,51	16,48	0,28	9,35	12,24	1,44	1,58	0,05	98,14	Am5-5
170	42,06	0,68	13,68	16,27	0,27	9,16	12,47	1,35	1,52	0,04	97,51	Am5-6
171	42,39	0,68	13,73	17,02	0,29	9,08	12,32	1,40	1,57	0,04	98,53	Am5-7
172	42,11	0,73	13,91	16,96	0,27	8,78	12,27	1,33	1,62	0,09	98,08	Am5-8
173	41,48	0,82	14,42	16,94	0,25	8,55	12,28	1,30	1,65	0,04	97,73	Am5-9
174	42,41	0,84	13,91	17,03	0,25	9,04	12,36	1,23	1,58	0,07	98,72	Am5-10
175	41,02	0,79	14,58	16,50	0,25	8,66	12,17	1,41	1,66	0,06	97,09	Am5-11
176	40,88	0,94	14,67	16,99	0,27	8,67	12,25	1,35	1,64	0,06	97,73	Am5-12
177	41,04	0,86	14,41	16,69	0,26	8,66	12,23	1,33	1,68	0,06	97,22	Am5-13
178	41,43	0,74	14,31	16,53	0,24	8,76	12,41	1,45	1,37	0,08	97,31	Am5-14
179	41,89	0,71	13,80	16,73	0,26	8,95	12,27	1,27	1,20	0,07	97,15	Am5-15
180	43,53	0,54	11,40	17,06	0,34	10,11	11,63	0,67	1,43	0,10	96,81	Am5-16
206	53,38	0,12	11,11	10,66	0,19	8,91	10,01	3,22	0,49	0,00	98,09	Am7-2
207	53,25	0,13	11,22	10,59	0,19	9,09	10,06	2,96	0,51	0,01	98,00	Am7-3
208	50,27	0,13	4,74	13,48	0,23	13,59	12,91	0,51	0,35	0,01	96,21	Am7-4
209	50,36	0,11	4,63	13,74	0,32	14,00	12,88	0,40	0,33	0,03	96,80	Am7-5
210	52,14	0,03	3,14	13,36	0,28	14,76	13,11	0,35	0,15	0,05	97,37	Am7-6
211	50,30	0,13	5,24	14,12	0,26	14,01	12,88	0,37	0,43	0,03	97,76	Am7-7
212	49,77	0,17	5,72	14,42	0,29	13,29	12,99	0,41	0,51	0,05	97,61	Am7-8
213	42,12	0,51	13,45	16,77	0,28	8,64	12,55	1,12	1,58	0,04	97,05	Am7-9
214	42,24	0,52	12,89	17,26	0,26	8,93	12,62	0,91	1,50	0,02	97,15	Am7-10
215	46,78	0,27	7,85	15,74	0,30	12,05	13,00	0,48	0,76	0,02	97,25	Am7-11
216	53,03	0,04	1,97	13,56	0,30	15,14	13,25	0,16	0,10	0,03	97,59	Am7-12
217	47,21	5,64	4,48	12,34	0,27	12,03	15,53	0,31	0,31	0,04	98,16	Am7-13
218	41,42	12,50	5,60	10,65	0,21	8,55	18,47	0,30	0,50	0,03	98,23	Am7-14
219	40,60	5,63	11,19	14,98	0,27	7,58	15,35	0,81	1,21	0,08	97,69	Am7-15
220	41,27	0,63	13,74	18,05	0,31	8,38	12,60	0,95	1,56	0,06	97,54	Am7-16

Таблица 2

Микрозондовые химанализы амфибола (Am) по кристаллам образца № 2177 (вес. %) (приведены данные, только по представительным точкам анализов)

№№ точек анализов	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	Total	Кристалл
40	45,91	0,47	10,32	14,86	0,24	12,32	11,06	1,25	0,76	0,01	97,20	Am1-8
42	43,36	0,69	11,36	15,34	0,22	11,66	11,58	1,46	0,73	0,07	96,46	Am1-10
44	46,59	0,49	9,01	14,37	0,20	12,86	11,59	1,11	0,67	0,02	96,91	Am1-12
48	48,00	0,33	7,15	12,90	0,27	14,97	11,86	1,11	0,28	0,03	96,90	Am1-16
53	45,61	0,39	9,30	14,33	0,26	12,89	11,85	1,25	0,51	0,00	96,39	Am1-21
62	41,57	0,80	11,78	15,16	0,19	11,62	11,18	1,59	0,77	0,02	94,69	Am2-2
64	41,48	0,68	11,93	15,38	0,21	11,85	11,26	1,83	0,73	0,01	95,35	Am2-4
66	41,79	0,74	11,37	15,30	0,28	11,93	11,43	1,68	0,73	0,03	95,28	Am2-6
69	41,40	0,59	11,42	15,26	0,18	12,00	11,30	1,68	0,69	0,05	94,57	Am2-9
71	42,37	0,71	11,94	15,83	0,26	11,33	11,61	1,58	0,75	0,09	96,47	Am3-2
75	47,50	0,32	7,03	12,74	0,21	14,36	11,69	0,99	0,22	0,01	95,08	Am3-6
77	43,32	0,65	10,87	14,79	0,27	11,94	11,64	1,44	0,60	0,03	95,56	Am3-8
79	45,10	0,45	8,99	13,82	0,26	13,12	11,61	1,40	0,37	0,00	95,13	Am3-10
82	42,06	0,68	11,62	15,16	0,24	11,76	11,73	1,73	0,69	0,06	95,74	Am4-1
84	41,32	0,77	12,31	15,48	0,23	11,51	11,84	1,72	0,94	0,03	96,15	Am4-3
87	42,04	0,55	12,07	15,60	0,25	11,45	11,68	1,82	0,80	0,04	96,30	Am4-6
88	42,20	0,44	11,98	15,65	0,26	11,63	11,90	1,62	0,66	0,03	96,36	Am4-7
90	46,81	0,23	7,51	13,03	0,25	14,34	12,05	1,16	0,29	0,03	95,70	Am4-9
93	41,50	0,46	12,10	15,46	0,18	11,53	11,83	1,86	0,63	0,08	95,62	Am4-12
96	41,56	0,59	11,64	15,29	0,24	11,52	11,99	1,64	0,89	0,01	95,36	Am4-15
98	41,51	0,78	12,15	15,49	0,26	11,56	11,76	1,74	0,94	0,04	96,23	Am4-17
101	41,74	0,65	11,63	15,62	0,20	11,68	11,85	1,68	0,67	0,05	95,78	Am4-20
103	42,28	0,62	11,59	15,02	0,24	11,76	12,22	1,67	0,70	0,03	96,14	Am4a-1
104	41,75	0,64	11,97	15,33	0,21	11,60	11,82	1,70	0,72	0,05	95,78	Am4a-2
105	45,21	0,27	8,61	14,08	0,28	13,84	11,95	1,20	0,44	0,06	95,94	Am4a-3
107	41,95	0,46	11,83	15,46	0,28	11,51	11,80	1,85	0,60	0,06	95,80	Am4a-5
108	40,59	0,80	12,58	15,53	0,24	11,04	11,83	1,80	0,95	0,06	95,39	Am4a-6
109	42,39	0,77	10,97	15,48	0,26	11,75	11,82	1,43	0,84	0,02	95,74	Am4a-7
110	41,66	0,66	11,49	15,44	0,19	11,36	12,39	1,48	0,67	0,06	95,40	Am4a-8
111	41,49	0,72	11,94	15,27	0,22	11,64	11,82	1,73	0,71	0,04	95,58	Am4a-9

Полные данные по минералам можно получить у авторов: tigrangeo@gmail.com

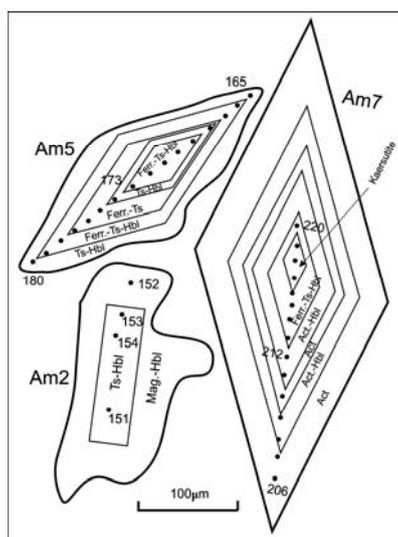


Рис. 1. Схема микрозондовых профилей и зональности кристаллов амфиболов образца № 2154. Номера точек соответствуют номерам анализов табл. 1.

Сокращения:

Act – актинолит, Act.-Hbl – актинолитовый горнбленд, Ferr.-Ts-Hbl – феррочермакитовый горнбленд, Mag.-Hbl – магнезиогорнбленд, Ts-Hbl – чермакитовый горнбленд, Ferr.-Ts – феррочермакит, Ts – чермакит.

На рис. 1 и 2 отображено расположение под микроскопом точек зондирования и существующая в кристаллах минеральная зональность.

Определение минеральных разновидностей амфибола по микрозондовым анализам зон роста кристаллов амфибола прове-

дено по методике, предложенной в [6]. Результаты диагностики минеральных составов зон в кристаллах в графическом виде изображены на рис. 3.

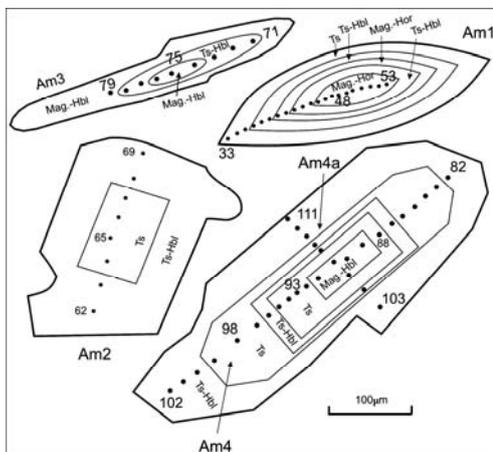


Рис. 2. Схема микрозондовых профилей и зональности по кристаллам амфиболов образца № 2177. Номера точек соответствуют номерам анализов табл. 2. Сокращения см. в подписи к рис. 1.

ся в смене чермакита (точка анализа № 220) через чермакитовый горнбленд (№ 215) и актинолитовый горнбленд (№№ 212–208) на актинолит (№№ 207–206) (см. рис. 1). Естественно здесь происходят обратные изменения с уменьшением содержания Al_2O_3 от 13,74% в ядре до 3,14% на периферии и осветление окраски зоны.

Петрологические исследования по данной новой методике, основанной на анализах участков минерала, отстоящих друг от друга на несколько микронов, приводят к находке остатков минералов, относящихся к предыдущим этапам метаморфизма или даже к первично-магматическим реликтам. Это обусловлено тем, что региональный метаморфизм не может на 100% пере-кристаллизовать все предыдущие минеральные парагенезисы. Поэтому в новообразованных минералах в субмикроскопических масштабах сохраняются кое-какие реликты прежнего минерального состава, которые позволяют проливать свет на прежнюю термобарическую историю породы, Это, в свою очередь, позволяет отслеживать процессы тектонической истории во времени. Так у нас в одном случае сохранился в ядре амфибола первично-магматический реликт керсутита с содержанием $TiO_2=12,50\%$ (точка анализа № 218).

Из-за ограничений объема статьи нет возможности приводить графические изображения вариаций P и T в каждом кристалле. Укажем лишь, что наблюдаются как проградные, так и ретроградные зональности. Проградные зерна содержат в ядре магнезио-горнбленд, который сменяется к периферии чермакитовым горнблендом и далее чермакитом, что выражается в уменьшении содержаний SiO_2 и MgO и увеличении Al_2O_3 и FeO . Это сопровождается сгущением окраски амфибола от светло-зеленого в ядре до темно-сине-зеленого на периферии.

Ретроградные зональности наблюдаются лишь в образце № 2154, наряду с проградными, и выражают-

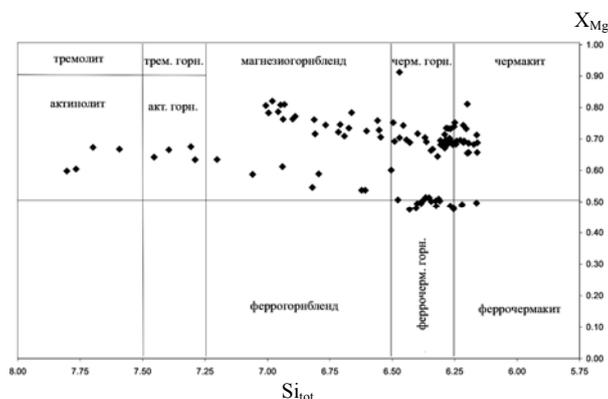


Рис. 3. Диаграмма классификации кальциевых амфиболов [6] с фигуративными точками всех анализов по образцам № 2154 (нижняя цепь) и № 2177(верхняя цепь).

Окончательная цель настоящего исследования заключается в выявлении тренда метаморфизма на петрогенетической решетке. Результаты приводятся на рис. 4.

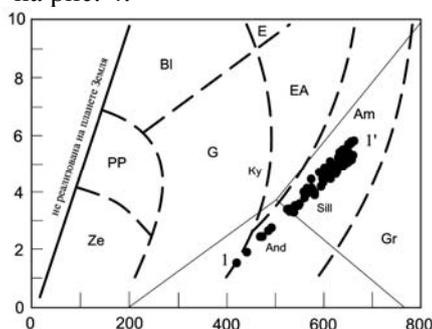


Рис. 4. Петрогенетическая решетка с полями фаций метаморфизма [7] и с P , T -трендом (1–1') метаморфизма амфиболитов казахской свиты докембрия. Сокращения: Ze – цеолитовая, PP – пренит-пумпелитовая, Bl – голубосланцевая, G – зеленосланцевая, E – эклогитовая, EA – эпидот-амфиболитовая, Am – амфиболитовая, Gr – гранулитовая, Ky – кианит, Sill – силлиманит, And – андалузит.

Из рис. 4 видно, что тренд метаморфизма проходит от фации зеленых сланцев до амфиболитовой фации в диапазоне $T=420\text{--}640^{\circ}\text{C}$ и $P=1,6\text{--}5,7$ кбар, что соответствует невысокому геотермическому градиенту в $12^{\circ}\text{C}/\text{км}$.

Заключение. Составы исследованных амфиболов варьируют от актинолита до чермакита (рис. 3) по классификации Международной минералогической комиссии [6], причем чермакиты представляют проградный, а актинолиты – ретроградный тренд. На результирующей диаграмме рис. 4 по обоим образцам выявляется единый P , T -тренд 1–1' от $T=420^{\circ}\text{C}$, $P=1,6$ кбар до $T=640^{\circ}\text{C}$, $P=5,7$ кбар, охватывающий амфиболитовую фацию в проградной части и фацию зеленых сланцев в ретроградной части, что соответствует геотермическому градиенту в $12^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Пик метаморфизма в области 1' ($P=5,7$ кбар, $T=640^{\circ}\text{C}$) приходится почти на кривую гранитного солидуса, что соответствует условиям селективного плавления магмы трондьемитов, густо пронизывающих казахскую свиту, из исходных толеитов в условиях пика метаморфизма 685 млн. лет назад [8]. Глубина метаморфизма в проградной области соответствует 18–23 км, а в ретроградной – до 8 км. Диафорез развивался, по-видимому, в ходе тектонического поднятия, которое последовало, очевидно, за инъекцией амфиболитов более легкой трондьемитовой магмой плотностью $2,5 \text{ г}/\text{см}^3$.

Таким образом, применение нового метода на основе амфиболового термобарометра позволило уточнить количественно термобарическую историю становления Армянского (Цахкуняцкого) кристаллического массива, который является фрагментом Пан-африканского орогена в Альпийском складчатом обрамлении Восточного Средиземноморья [9].

¹ ИГН НАН РА,

² Фрайбергский университет, Германия

Поступила 01.04.2011

ЛИТЕРАТУРА

1. Агамалян В.А. Докембрий–нижний палеозой. Геология Армянской ССР. Т. 5. Ер.: Изд-во АН Арм. ССР, 1974, с. 9–57.
2. Агамалян В.А. Кристаллический фундамент Армении. Автореф. дис. на соискание уч. степ. док. геол.-минерал. наук. Ер.: Фонды ИГН НАН РА, 1998, 650 с.
3. Plyusnina L.P. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1982, v. 80, p. 140–146.

4. Gerya T.V., Perchuk L.L., Triboulet C., Audren C. and Sez'ko A.I. Eastern Sayan. Petrology, 1997, v. 5/6, p. 503–533.
5. Zenk M. and Schulz B. Mineralogical Magazine, October 2004, v. 68(5), p. 769–786.
6. Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne F.C. et al. American Mineralogist, 1997, v. 82, p. 1019–1037.
7. Holdway M.J. Am. J. Science, 1971, v. 271, p. 97–131.
8. Агамалян В.А., Гукасян Р.Х., Багдасарян Г.П. Изв. НАН РА. Науки о Земле, 1997, т. 50, № 3, с. 12–21.
9. Агамалян В.А. Труды ИГ Грузии. Новая серия, 2004, с. 46–54.

Վ. Ա. ԱԳԱՄԱԼՅԱՆ, Բ. ՇՈՒԼՅ, Ա. ՌԵՆՆՈ, Յա. ԼԱՆԳԵ, Տ. Կ. ԼՈՐՍԱԲՅԱՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՄԻՆԶԵՐԻԻ ՔԱՍԱԽԻ ՇԵՐՏԱԽՄԲԻ
ՄԵՏԱՄՈՐՖԻԶՄԻ ԹԵՐՄՈԳԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐԻ
ՌՈՐՇՈՒՄԸ ԱՄՖԻԲՈԼԱՅԻՆ ԹԵՐՄՈԲԱՐՈՄԵՏՐԻ ՄԻՋՈՑՈՎ

Ա մ փ ո փ ո մ

Որոշվել են Հայաստանի մինչքեմբրիի հիմքի ապարների թերմոդինամիկական մետամորֆիզմի պայմանների (P , T) արժեքները՝ ամֆիբոլային թերմոբարոմետրի միջոցով, ըստ ամֆիբոլների 104 միկրոգնդային քիմիական անալիզների տվյալների: Այդ չափումները կատարվել են Քասախի մինչքեմբրիի հասակի օֆիոլիթային մետաբազալտային ամֆիբոլիթային շերտախմբի երկու նմուշների վրա: Բնորոշվել է մետամորֆիզմի ընդհանուր հետազիծը՝ միջին աստիճանի ամֆիբոլիթային ֆացիայի և կանաչ թերթաքարային ֆացիայի հետևյալ սահմաններում՝ $T=420-640^{\circ}C$ և $P=1,6-5,7$ kbr, ցածր գեոթերմիկ գրադիենտով՝ $12^{\circ}C/կմ$: Հայտնաբերվել են ամֆիբոլներում պրոգրադային մագնեզիո-հորնբլենդ-չերմակիտ տիպի և ռետրոգրադային մագնեզիո-հորնբլենդ-ակտինոլիթ տիպի զոնալականություն, ինչպես նաև կերսուտիտի մնացորդներ: Վերջիններս պահպանվել են մագմատիկ հորնբլենդից:

V. A. AGHAMALYAN, B. SCHULZ, A. RENNO, J. LANGE, T. K. LORSABYAN

DEFINITION OF METAMORPHISM THERMODYNAMIC CONDITIONS
FOR ARMENIAN PRECAMBRIAN KASAKH SUITE BY AMPHIBOLE
THERMOBAROMETER

Summary

Armenian Precambrian basement rocks metamorphism P and T conditions are defined applying amphibole thermobarometer by means of 104 amphibole microprobe chemical analyses. Measurements have been done on 2 samples of ophiolitic metabasalte amphibolites of the Precambrian Kasakh suite. The general trend of metamorphism has been defined in the average amphibolite and greenschist facies in ranges $T=420-640^{\circ}C$ and $P=1,6-5,7$ kbr of low geothermal gradient of $12^{\circ}C/km$. Prograde magnezihornblende-tchermakite and retrograde magnezihornblende-actinolite zonation has been revealed, and also relics of kersutite have been found. Relics of kersutite are preserved from primary-magmatic hornblende of the initial basalts.