

Химизъм и генетично значение на калциев амфибол от мезозойската Мандришка група, Източни Родопи

Людмил Грозданов, Иван Боянов

Gрозданов, L., I. Боянов. 1998. Chemistry and genetic significance of calcic amphibole from the Mesozoic Mandrica Group, Eastern Rhodopes — *Geochem., Mineral. and Petrol.*, 33, 29-47

The paper presents results from the studies of calcic amphibole of ortometamorphic rock with tholeitic chemical composition from the Oreshinovo Formation of the Mandrica Group (supposed Triassic — Early Jurassic age). This rock is exposed south from the village of Oreshino, Ivajlovgrad District. It is mainly composed by chlorite, calcic amphibole and oligoclase (An_{17-20}). Conditions of rock formation are in greenschist and epidote-amphibolite facies of early regional metamorphic process of the Mandrica Group (before the origin of the coarse-grained porphyroblastic schists). Coarser crystals of the calcic amphibole have zoned variations of the chemical composition meanly with increasing of Al^{IV} from 0.55 to 1.61, of Al^{VI} from 0.20 to 0.81 and of Na from 0.37 to 0.72. The chemical composition in this order relate to magnesiohornblende and tschermakite. The smallest crystals have chemical composition corresponding to tschermakite. In peripheral part of some amphibole crystals have origin narrow edenite zone. Al^{IV} and Al^{VI} decrease to 1.43 and to 0.68. The formation of the magnesiohornblende to tschermakite isomorphous series starts in the highest temperature and middle baric greenschist facies. The start of process has T 465°C and P 3.5 kbar. It continues in the epidote-amphibolite facies conditions in the highest baric area of the andalusitic field. The supposed maximal values of T and P are 550°C and 4.5 kbar. The probable geothermal gradient is 90°C/kbar, 27°C/km, 1°C/37 m. The origin of the edenite in the conditions of partial decrease grade of metamorphism and endogenetic fluid addition of Na and decrease potential of oxidation. The epidote-amphibolite regional metamorphic processes of the Mandrica Group were comparatively rapid and at relatively high supersaturation of the fluid phase. The paragenetic connection between the plagioclase and the calcic amphibole are disturbed.

Key words: Mandrica Group, magnesiohornblende, tschermakite, edenite, metamorphism

Address: Geological Institute, Bulgarian Academy of Sciences, 1113 Sofia; e-mail: grozdan@geology.acad.bg

Ключови думи: Мандришка група, магнезиоамфибол, чермакит, еденит, метаморфизъм

Адрес: Геологически институт, Българска академия на науките, 1113 София

Увод

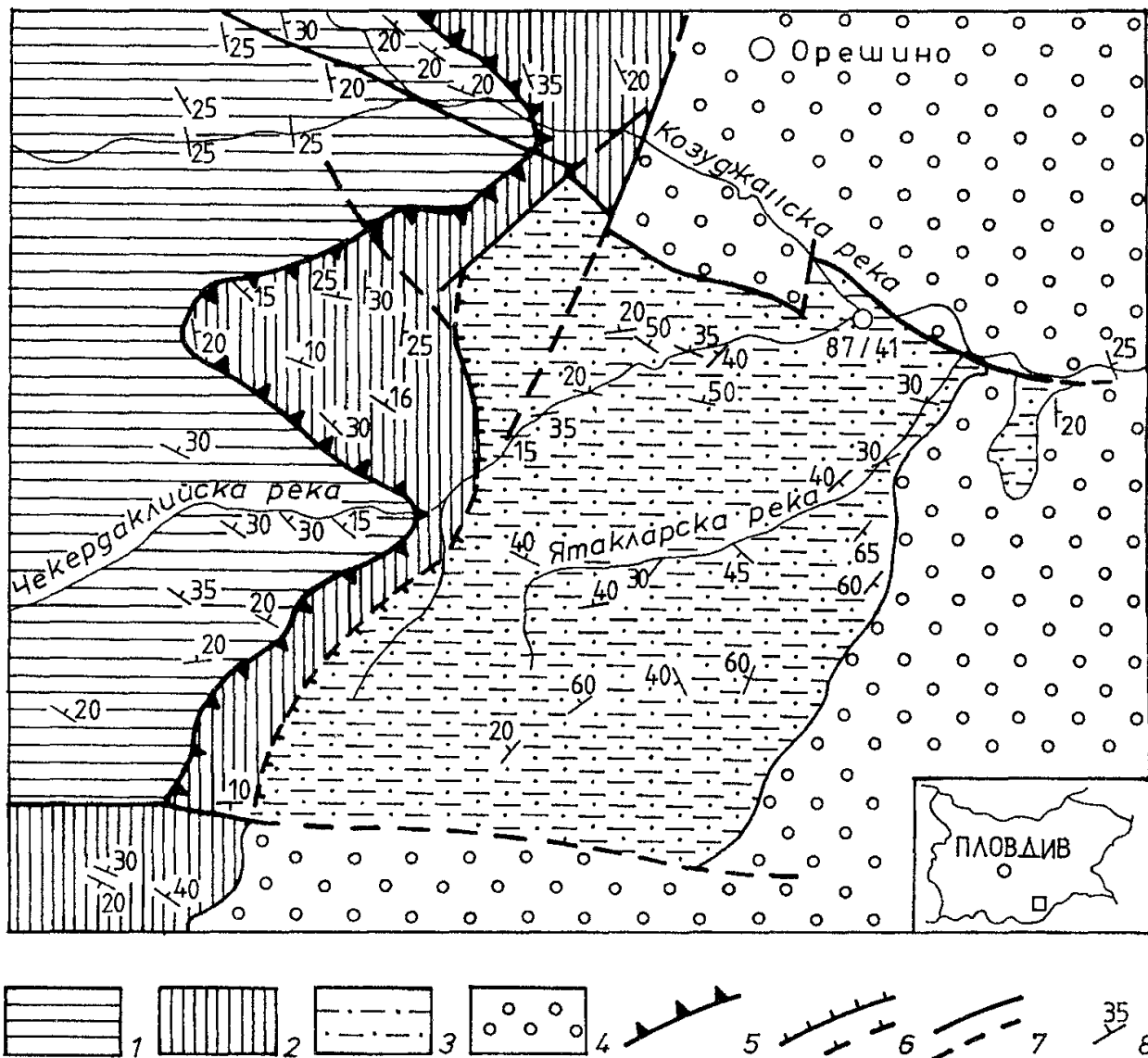
Проведените през последните 15 години изследвания на българска територия в Източните Родопи, доказаха наличие на неметаморфозирани, анхиметаморфни и метаморфозирани седиментни и магмени продукти. Обособени са групите Мандришка и Мъгленишка с доказана и предполагаема мезозойска

възраст. Мандришката група е поделена на свитите Орешиновска и Горнолуковска. Максималната им мощност е съответно 500 и 800 m. За Мандришката група се предполага триаска или триаско-юрска възраст. Мъгленишката група е поделена на свитите Долнолуковска и Меденбукска, с максимална мощност съответно 320 и 200 m. За Мъгленишката група е определена възраст долна юра—горна креда. Мандришката група и Долнолуковската свита се корелират с литостратиграфските единици Макри и Дримос-Мелия, установени на гръцка територия в източните части на Западна Тракия (Боянов и др., 1990). Единиците Макри и Дримос-Мелия са описани от Papadopoulos et al. (1989).

Според Boyanov, Russeva (1989) и Боянов и др. (1990), Мандришката група е изградена от сложна алтернация от разнообразни по характер и вариации по мощност пара- и ортометаморфити, продукт на регионален метаморфизъм в условията на зеленошистен и епидот-амфиболов фациес. В състава на Орешиновската свита влизат главно парашисти (метапелити и метапсамити), изградени от вариации по количество хлорит, албит-олигоклаз, кварц, мусковит, гранат (алмандин и спесартин), биотит, амфибол и калцит. Рядко идват още кварцити, мрамори и калкошисти. Ортоскарлите са представени преобладаващо в Горнолуковската свита. Оформят пластови тела и будини. Рядко се срещат и малки тела от изцяло серпентинизирани ултрабазити. В метабазитите се установяват типични за зеленошистния фациес парагенези с актинолит, епидот, хлорит и албит до албит-олигоклаз. Участието на обикновен амфибол в част от параскарлите е известно указание за навлизане в пределите на епидот-амфиболитовия фациес. На различни нива в Орешиновската свита и съвсем рядко в Горнолуковската свита са развити и порфиробластови шисти, които са продукт на по-късно наложен процес, протекъл в своето начало в условията на епидот-амфиболитов фациес и завършил с понижаване на фациеса. Установена е следната последователност на образуване на минералите: гранат (преходен между grosular и андрадит) — амфибол (химично характеризирани като паргасит) — биотит-мусковит-клиноцоизит-хлорит и хлоритоид (маргарит). За разлика от образуваните по-рано метаморфити, които са средно- до дребнозърнести или плътни, при порфиробластовите шисти размерите на минералните индивиди варират в значителни предели, достигайки до 10—16 mm, понякога и повече. На места се наблюдават добре изразени преходи към околните скали. Върху метаморфитите на Мандришката група са наложени по-късни хидротермални парагенези от хлорит, кварц и карбонати (Boyanov, Russeva, 1989; Боянов и др., 1990).

Скарлите на Мандришката група са претърпели интензивна тектонска обработка, обусловила множество дислокации и дребни гънки. Това обстоятелство и отсъствието на индикаторни минерали като кианит, силиманит, андалузит, ставролит и кордиерит, в значителна степен затрудняват провеждането на генетични изследвания и разграничаването на епизоди на структурообразуване в хода на регионалнометаморфните процеси.

Обект на внимание в настоящата статия е калциев амфибол от дребнозърнеста ортоскала от Орешиновската свита (обр. No 87/41). Неговият състав позволява получаването на генетична информация за част от процесите на ранния регионален метаморфизъм на Мандришката група (преди формирането на порфиробластовите шисти), осъществени около и над изоградата на обикновения амфибол. При проведените генетични тълкувания са използвани и минералого-петрографски данни за скалите от Орешиновската свита. Подбраната скала се разкрива на около 1 km Ю—ЮИ от с. Орешино, Ивайловградско, на десния бряг на Козлуджанската река, съответно на около 50 m след влива-



Фиг. 1. Геоложка карта на околностите на с. Орешино (по Боянов и др. (1990), със съкращения): 1 — параавтохтон, Прародопска надгрупа; 2 — алохтон, Родопска надгрупа; 3 — Орешиновска свита на Мандришката група; 4 — третични отложения; 5 — линия на Източнородопския комплексен навлак; 6 — вътрешно навлачни структури на Източнородопския комплексен навлак; 7 — разломи; 8 — шистозност и слоистост

Fig. 1. Geological map of the vicinity of the village of Oreshino (after Боянов и др. (1990), with abbreviations): 1 — para-autochthone, Prarhodopian Supergroup; 2 — allochthone, Rhodopian Supergroup; 3 — Oreshino Formation of the Mandrica Group; 4 — tertiary sediments; 5 — line of the East Rhodopes complex thrust; 6 — internal thrust structures of the East Rhodopes complex thrust; 7 — faults; 8 — shaliness and sheeting

нето в нея на Чекердаклийската река (фиг.1). За разлика от досега известните метаморфити от Мандришката група, съставът на калциевия амфибол в подбраната скала, варира от магнезиоамфибол с пределно високо съдържание на силиций до чермакит и еденит.

Описание на находището

В участъка южно от с. Орешино, където е изследваното находище, подходящи разкрития на Орешиновската свита се намират по долините на реките Чекердаклийска и Ятакларска (фиг.1). В основата на разреза идва пачка с мощ-

ност 120—140 m от финошистозни сивозелени слюдени шисти с различни размери на слюдените люспи и амфиболовите кристали. Следва пачка с мощност около 350—380 m от алтерниращи дебелопластови амфиболови и амфибол-гранат-слюдени шисти (10—12 m) и дребнокристалинни до плътни зелени скали (7—8 m). В най-горната част на профила идва пачка с мощност около 60—80 m от мусковит-биотит-амфибол-епидотови шисти, алтерниращи с порфиробластови шисти. Мусковит-биотит-амфибол-епидотовите шисти включват различни по размери будинирани тела от дребнокристалинни до масивни ортоскали. За изследване е взет образец от голямо будинирано тяло (обр. No 87/41), включено в споменатите мусковит-биотит-амфибол-епидотови шисти.

Опробваната скала е тъмнозелена, дребнозърнеста, с добре изразена шистозност. Изградена е главно от хлорит, калциев амфибол и олигоклаз (An_{17-20}). Структурата на скалата е лепидогранобластична. Спорадично идва и гранат. Съсредоточен е в малки, силно удължени послойни лещи с нематобластична структура. Създава се впечатлението, че гранатът е образуван по-рано и е претърпял деформация по време на северновергентните ламинарни движения, особено отчетливо проявени в будинажните структури и обусловили шистозната текстура на скалата, фиксирана в паралелната ориентация на хлорита и калциевия амфибол. На свой ред, отделните хлоритови кристали идват секущо на шистозността, което е показателно за по-късното им образуване, след стихване на ламинарните движения. Съвсем рядко, като единични дребни зрънца се установява и кварц. Химичният състав на скалата (в тегл. %) е: SiO_2 53,10; TiO_2 0,20; Al_2O_3 13,89; Fe_2O_3 2,67; FeO 6,06; MnO 0,01; MgO 10,06; CaO 8,10; Na_2O 3,66; K_2O 0,23; P_2O_5 0,02; H_2O 0,29; H_2O^+ 1,49; сума 99,78. Анализът е извършен по обемния метод (мокър анализ) в Геохимичните лаборатории на Геологическия институт. Количествата на SiO_2 и K_2O са показателни за толеитов химизъм на изходната скала.

На цвят калциевият амфибол е чернозелен. Преобладаващата част от амфиболовите кристали е с неправилни очертания. Само рядко под микроскопа се установява {110}. В отделни по-малки индивиди е представен и {010}, понякога и {100}. По дължина амфиболовите кристали варират от около 1 до около 3 mm. Преобладават дължини в пределите 1—2 mm. Хабитусът на амфиболовите кристали е призматичен, при отношение [010]:[001] от 1:5 до 1:10. На цепителни повърхнини на скалата се долавя частично линейно ориентиране на амфиболовите кристали по тяхното удължение. Плеохроизъм: по Z — бледозелен, по Y — сиво-кафявожълт, по X — светложълт, $Z > Y > X$. Максималният ъгъл на косо потъмнение е Z/c 19°. Понякога в най-едрите индивиди се установява слабо изразен зонален строеж, осъществен с постепенни преходи. В централните части оцветяването по Z и Y е по-бледо и ъгълът на косо потъмнение е по-малък. На свой ред на места в периферията по Y се стига до светложълто, което понякога е проявено и като прониквания. В част от дребните кристали също се установяват периферни части и прониквания, при които по Y оцветяването е светложълто. Изглежда, че по-дребните амфиболови кристали са образувани по време на формиране на външната зона на най-едрите.

Химизъм

Изследванията върху химичния състав на калциевия амфибол от подбраната скала (обр. No 87/41), са проведени на електронен микроанализатор JEOL-733 по метода на EDS със стандарти в Лабораторията по електронна микроскопия и рентгенов микроанализ (на секция Минералогия) към Геологи-

чески институт на БАН. Описаните вариации в оптичните свойства на някои от по-едрите амфиболови кристали, намират израз и в техните отнасяния при наблюдение в електронен микроскоп. От вътрешните към външните части се долавя постепенно увеличаване на степента на разсветляване, като в периферните части, с по-рязък преход, същата се повишава. С оглед обхващане на възможните вариации в химизма, са проведени 12 микросондови анализа в подходящо подбрани точки. От тях на табл. 1 са дадени 7 представителни състави. Подредени са в последователността на тяхното образуване, съответно от вътрешните към външните части на амфиболовите кристали. Изключение представлява състав No 6, който е от дребен, хомогенен кристал. Неговото място е преценено по сходството му със състав No 5, който е от най-външни части, но без тези с повишена степен на разсветляване.

Структурни формули, на дадените в табл. 1 състави, са изчислени на две стъпки. При първата стъпка са изчислени структурни формули на база от 13 катиона (без Ca, Na и K), от които, в съответствие с Leake (1978), са разграничени Fe³ и Fe². При втората стъпка, е използвана база от 23 кислородни атома, като са въведени количества за Fe₂O₃ и FeO, изчислени по определените съдържания за Fe³ и Fe², както се препоръчва това от Parīke et al. (1974).

Резултатите от изчисленията на база от 23 кислородни атома са дадени на табл. 2. При сравняване на количествата на Fe³ в получените структурни формули с изчислените по формулата на Parīke et al. (1974), се установява практически пълно съвпадение. Това е указание както за достоверността на проведените микросондови анализи, така и за ефективността на подбрения комплекс от структурни преизчисления.

Т а б л и ц а 1

Представителни химични състави на изследвания калциев амфибол (микросондови анализи в тегл.%), дадени по реда на тяхното образуване

Table 1

Representative chemical compositions of the investigated calcic amphibole (microprobe analyses wt. %) in the order of their formation

No	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	53,64	52,02	48,12	47,55	44,81	45,08	45,21
TiO ₂	0,23	0,19	0,28	0,27	0,38	0,51	0,48
Al ₂ O ₃	4,61	6,42	7,83	12,14	14,34	14,49	12,34
FeO	7,60	7,80	11,56	9,71	10,27	10,24	12,17
MnO	0,20	0,37	0,21	0,32	0,49	0,38	0,15
MgO	18,70	17,95	15,19	14,63	13,53	13,63	12,83
CaO	11,72	11,67	11,95	11,26	10,97	11,29	11,75
Na ₂ O	1,37	1,41	2,16	2,03	2,62	2,62	2,63
K ₂ O	0,00	0,00	0,18	0,19	0,18	0,23	0,28
Σ ²	98,08	97,82	97,48	98,10	97,59	98,47	97,84
Fe ₂ O ₃ *	3,98	5,37	3,58	5,29	5,24	5,14	1,92
FeO*	4,01	2,97	8,34	5,02	5,55	5,62	10,44

* Съдържания, определени по данни за Fe³ и Fe² от изчислени на база от 13 (без Ca, Na и K) катиона структурни формули; No 1, 2 и 5 — централна, преходна и най-външна част на едър кристал; No 3 и 4 — по-вътрешна и по-външна част на едър кристал; No 6 — съвсем дребен, хомогенен кристал; No 7 — едностранно развита най-външна зона

* Contents, determined from Fe³ and Fe² data, calculated on 13 eCNK structural formulae; No 1, 2 and 5 — central, transition and the external part of coarse crystal; No 3 and 4 — more inside and more outer part of coarse crystal; No 6 — little, homogeneous crystal; No 7 — one-sided outer rim

Т а б л и ц а 2

Структурни формули на представителните амфиболови състави на изследвания калциев амфибол на база от 23 кислородни атома. Използвани са количествата на Fe_2O_3 и FeO , посочени в табл. 1

Table 2

Atoms per structural formula on the basis of 23 oxygen atoms of the representative chemical compositions of the investigated calcic amphibole. The contents of Fe_2O_3 and FeO are presented in Table 1

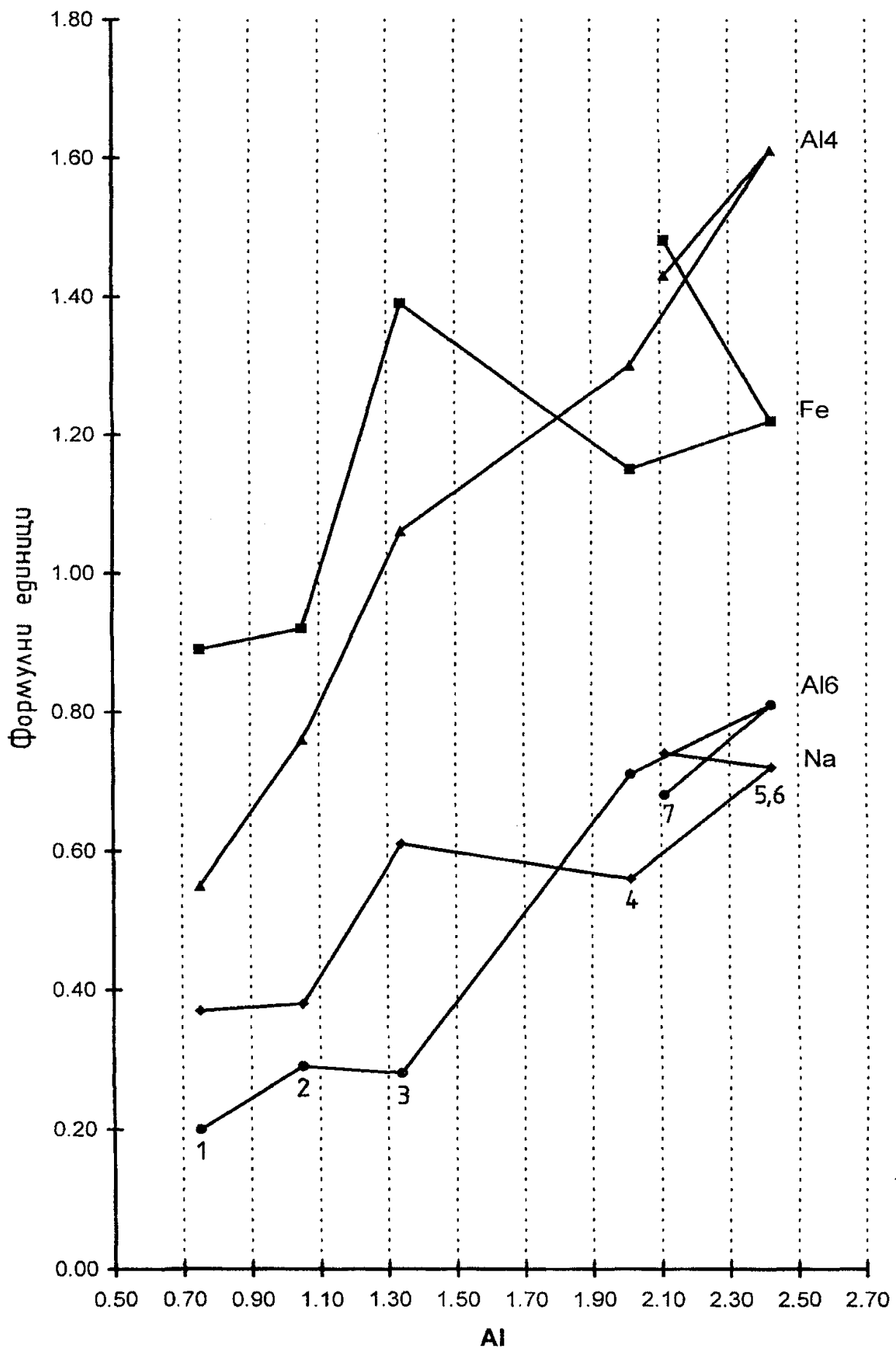
No	1	2	3	4	5	6	7
K	0,00	0,00	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05
Na	0,13	0,12	0,46	0,26	0,46	0,43	0,57
A	0,13	0,12	0,49	0,29	0,49	0,46	0,62
Na	0,24	0,26	0,15	0,30	0,26	0,29	0,17
Ca	1,74	1,74	1,85	1,70	1,68	1,71	1,82
Mn	0,02	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,01
B	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Mg	3,87	3,72	3,27	3,07	2,88	2,88	2,78
Mn	0,01	0,04	0,03	0,04	0,00	0,04	0,01
Fe ²	0,47	0,35	1,01	0,59	0,70	0,66	1,27
Fe ³	0,42	0,57	0,38	0,56	0,52	0,55	0,21
Al	0,20	0,29	0,28	0,71	0,81	0,81	0,68
Ti	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05
C	5,00	4,99	5,00	5,00	5,00	4,99	5,00
Si	7,45	7,24	6,94	6,70	6,39	6,39	6,57
Al	0,55	0,76	1,06	1,30	1,61	1,61	1,43
T	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
mg	0,89	0,91	0,76	0,83	0,80	0,81	0,69
Na	0,37	0,38	0,61	0,56	0,72	0,72	0,74
Al	0,75	1,05	1,34	2,01	2,42	2,42	2,11
Fe	0,89	0,92	1,39	1,15	1,12	1,21	1,41
Fe ³ /Fe	0,47	0,54	0,27	0,49	0,46	0,45	0,14
Fe ³ *	0,40	0,57	0,38	0,54	0,49	0,53	0,20

mg = Mg/(Mg + Fe²); * Изчислено по формулата на Rapike et al. (1974);

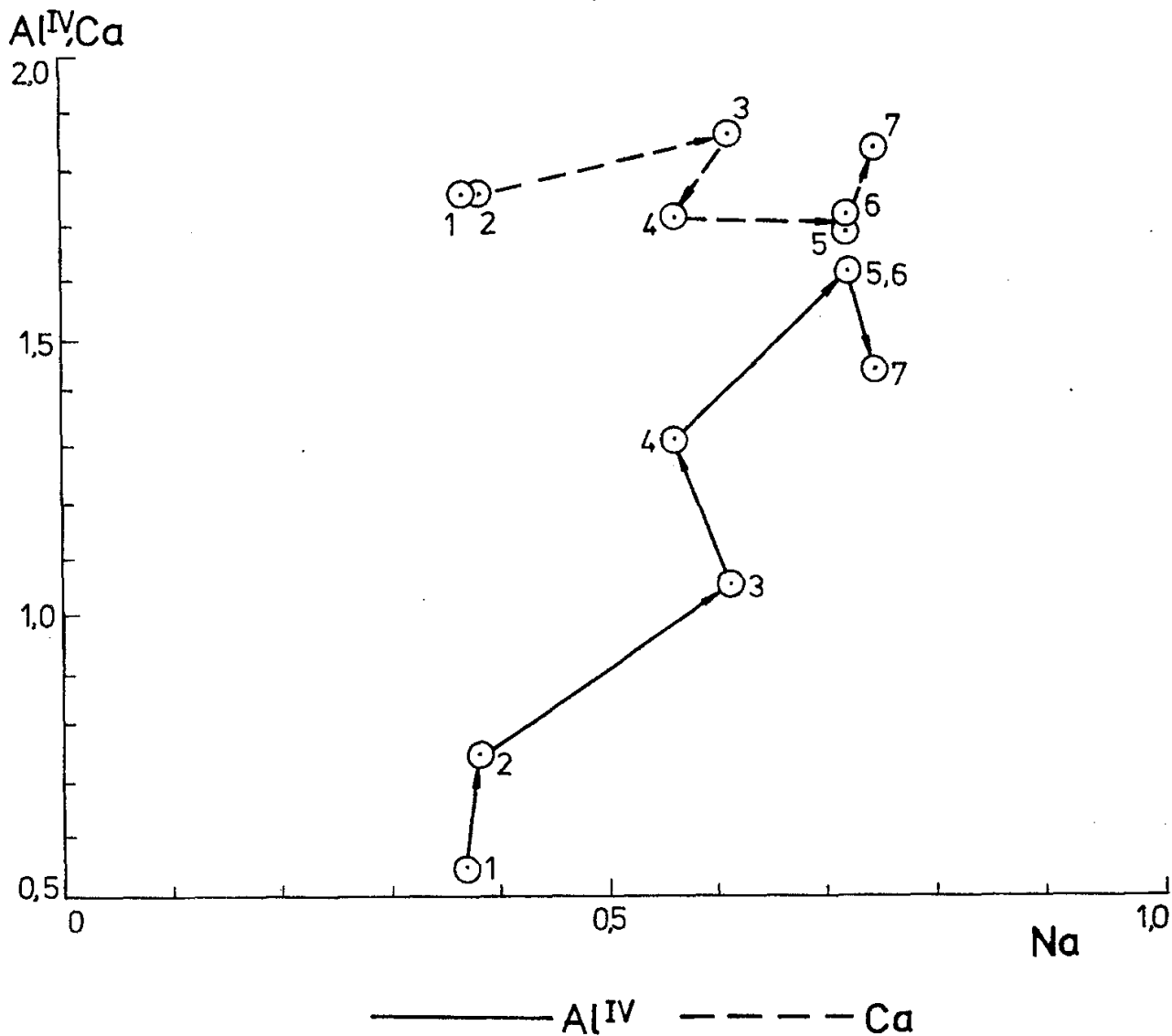
*Calculated by Rapike's et al. (1974) formula: $Fe^3 = Al^{IV} + NaM4 - (Na,K)A - Al^{VI} - 2Ti$

По разработената от Leake et al. (1997) класификация на амфиболите се установява следната видова принадлежност: 1. Към минералния вид магнезио-амфибол принадлежат вътрешните и междинните части на по-големите амфиболови кристали (състави от No 1 до No 4 включително); 2. По-външните части на по-големите амфиболови индивиди и дребните амфиболови кристали се отнасят към минералния вид чермакит (състави No 5 и 6); 3. Най-външните, спорадично развити, по-светли части на амфиболовите кристали (състав No 7) отговарят на еденит.

От прегледа на данните в табл. 2 проличава, че в поредицата от магнезио-амфибол до чермакит (състави от No 1 до No 5 и 6) се осъществява тенденция на повишаване на важните в генетично отношение компоненти Al^{IV} и Al^{VI} , съответно от 0,55 до 1,61 и от 0,20 до 0,81. При еденита (състав No 7) тази тенденция придобива обратен знак, съответно спадане на Al^{IV} на 1,43 и на Al^{VI} на 0,68. Тези тенденции са илюстрирани на фиг. 2. От същата проличават и добре изразени тенденции на повишаване на съдържанието на натрия и желязото, особено добре проявени при по-вътрешните части на по-големите амфиболови индивиди (състав No 3) и при спорадично развитите най-външни части от еденит (състав No 7). Неравномерното увеличаване на натрия проличава и от



Фиг. 2. Зависимости между съдържания на компоненти в структурните формули на представителните химични състави на изследвания калциев амфибол
 Fig. 2. Dependences between the contents of the components in the structural formulae of the investigated calcic amphibole



Фиг. 3. Зависимости между съдържания на Al^{IV} , Na и Ca в структурните формули на представителните химични състави на изследвания калциев амфибол
 Fig. 3. Dependences between the contents of Al^{IV} , Na and Ca in the structural formulae of the representative chemical composition of the investigated calcic amphibole

фиг. 3, като на свой ред се установява, че пиковете за натрия са в корелация с тези на калция.

Определено внимание заслужават отклоненията спрямо идеализираните структурни формули на магнезиоамфибол, чермакит и еденит, дадени от Leake et al. (1997), понеже са показателни за проявените типове изоморфни замествания. Представа за тях се придобива от сравненията за чермакитовите състави (No 5 и 6) и за еденита (състав No 7). Докато в идеализираната структурна формула на чермакит Ca, Al^{IV} и Al^{VI} са по два атома, А-позиция е празна и няма Fe^{3+} , в разглежданите чермакитови състави Ca е частично заместен от NaB, Al^{IV} е 1,61, Al^{VI} е 0,81, в А-позиция идват по 0,49 и 0,46 алкалии и в октаедричните места е включено 0,52 и 0,55 Fe^{3+} . Тези особености са показателни за участие на кроситов, паргасит-хейстингситов и чермакит-феричермакитов тип изоморфизъм. Аналогични типове изоморфни замествания проличават и при еденита, в структурната формула на който 0,38 места в А-позиция са празни, включен е 0,17 NaB, Al^{IV} е с 0,43 повече и в октаедричните места идват

Таблица 3

Участие на кроситов, паргасит-хейстингситов, чермакитов и еденитов тип изоморфизъм в представителните химични състави на изследвания калциев амфибол

Table 3

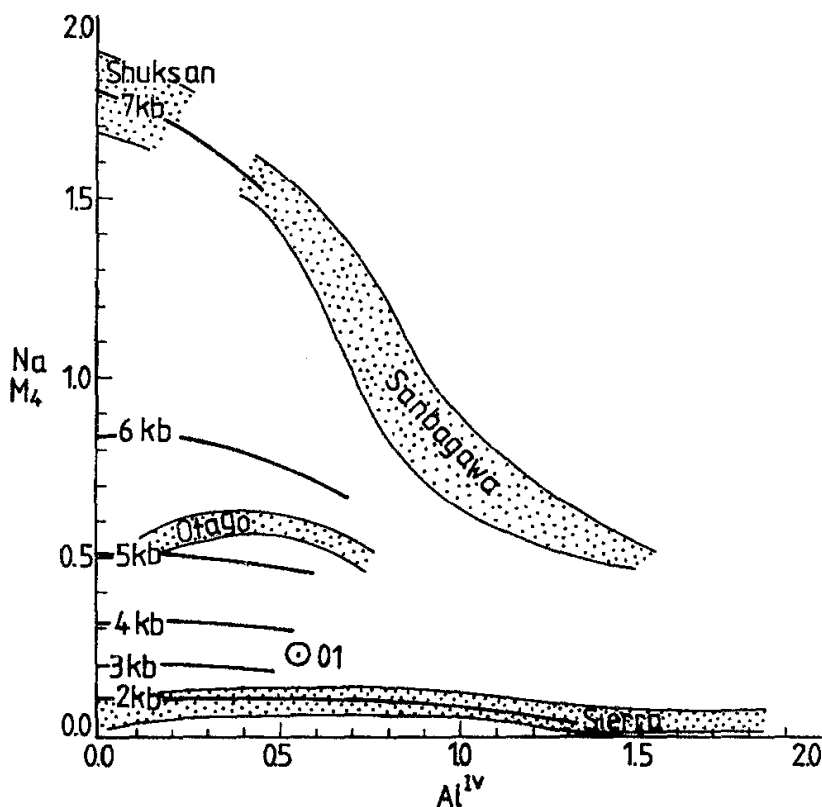
Contents of crossite, pargasite-hastingsite and edenite type isomorphism in the representative chemical compositions of the investigated calcic amphibole

No	Cr		Pg-Hs		Ts		Ed		Остатък			
	NaM4	Fe ³ , Al ^{VI}	(K,Na)A	Al ^{VI} , Fe ³	Al ^{IV}	Fe ³ , Al ^{VI}	Al ^{IV}	(K,Na)A	Al ^{IV}	(K,Na)A	Al ^{IV}	Ti
1	0,24	0,24	0,13	0,13	0,26	0,25	0,25	0,00	0,00	0,00	0,04	0,03
2	0,26	0,26	0,12	0,12	0,24	0,48	0,48	0,00	0,00	0,00	0,04	0,02
3	0,15	0,15	0,38	0,38	0,76	0,13	0,13	0,00	0,00	0,11	0,17	0,03
3a	0,15	0,15	0,28	0,28	0,56	0,28	0,28	0,21	0,21	0,00	0,01	0,03
4	0,30	0,30	0,29	0,29	0,58	0,68	0,68	0,00	0,00	0,00	0,04	0,03
5	0,26	0,26	0,49	0,49	0,98	0,58	0,58	0,00	0,00	0,00	0,05	0,04
6	0,29	0,29	0,46	0,46	0,92	0,58	0,58	0,00	0,00	0,00	0,11	0,05
7	0,17	0,17	0,21	0,21	0,42	0,51	0,51	0,00	0,00	0,51	0,60	0,05
7a	0,17	0,17	0,11	0,11	0,22	0,61	0,61	0,51	0,51	0,00	0,09	0,05

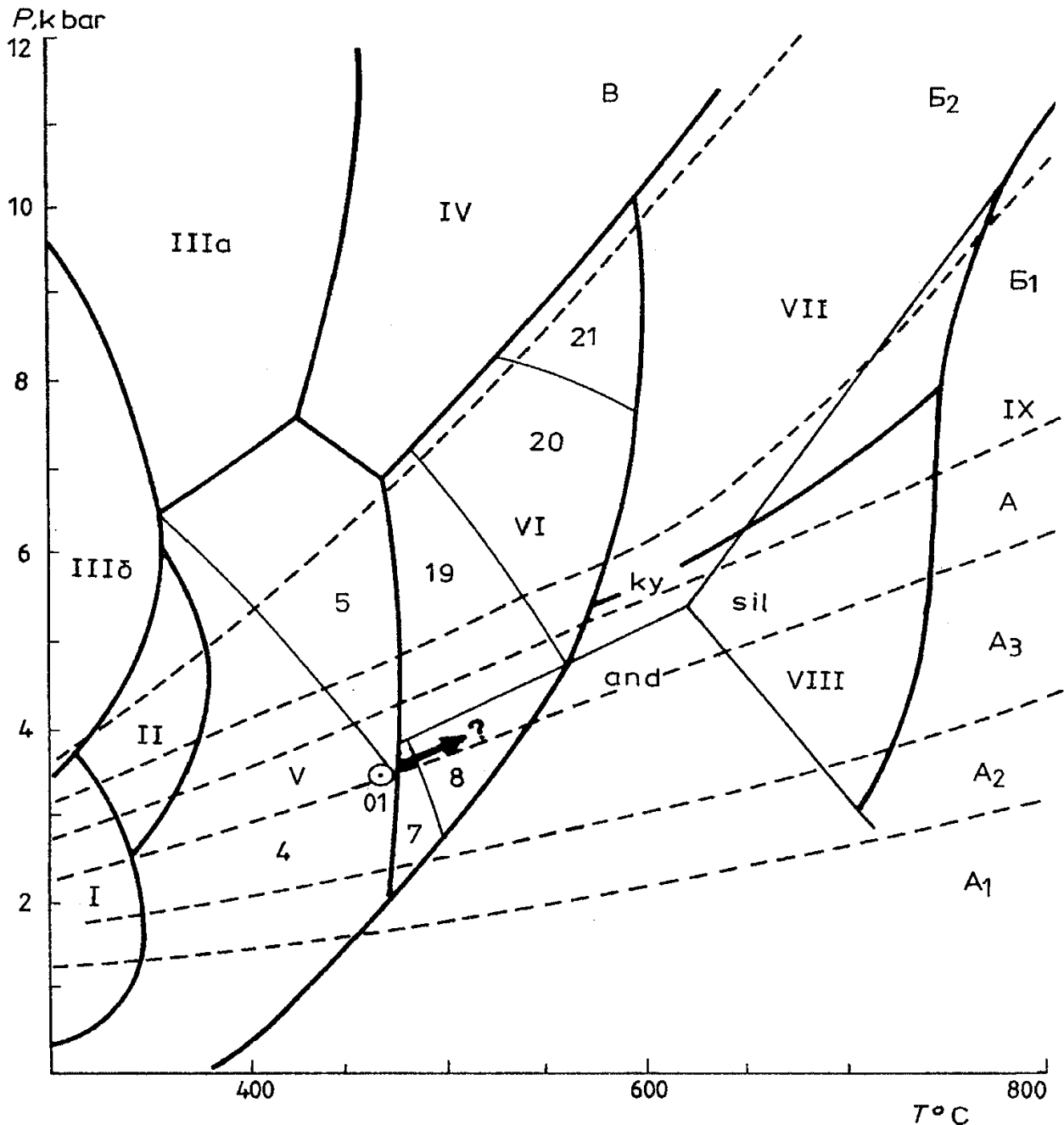
0,21 Fe³ и 0,68 Al^{VI}. Резултатите от проведените изчисления, с оглед отчитане на участието на така очертаващите се типове изоморфни замествания, са дадени на табл. 3. Заслужава внимание обстоятелството, че в състава от по-вътрешните части на по-големите амфиболови кристали, означен с No 3, също взема участие и еденитов тип изоморфизъм. Същевременно, еденитовият тип изоморфизъм е с ограничено участие в еденита (състав No 7). Показателно е, че повишеното съдържание на NaA в чермакита (състави No 5 и 6) не се дължи на еденитов тип изоморфизъм.

Генетични тълкувания

Преминаването от зеленошистен към епидот-амфиболитов фациес, според Добрецов и др. (1970, 1972) и Дук (1976), се маркира от прехода от актинолит към обикновен амфибол, означаван и като изограда на обикновения амфибол. Според Добрецов и др. (1970, с. 390), за граница между актинолит и обикновен амфибол се приема Al^{IV} > 1. Оказва се, че при изследваното находище началото на изоградата на обикновения амфибол е между най-ранния амфиболов състав No 1 и следващия го от по-вътрешните части на по-големите амфиболови кристали състав No 2. Съдържанията на Al^{IV} са съответно 0,75 и 1,05. При това положение трябва да се приеме, че началото на образуване на изучавания калциев амфибол е в най-високотемпературните отдели на зелено-



Фиг. 4. Амфиболов геобарометър за ниско- и средностепенни метаморфни скали (по Brown, 1977). Точка O1 фиксира началото на процеса на образуване на изследвания калциев амфибол
Fig. 4. Amphibole geobarometer for low- to medium-grade metamorphic rocks (after Brown, 1977). Point O1 is the beginning of the formation process of the investigated calcic amphibole



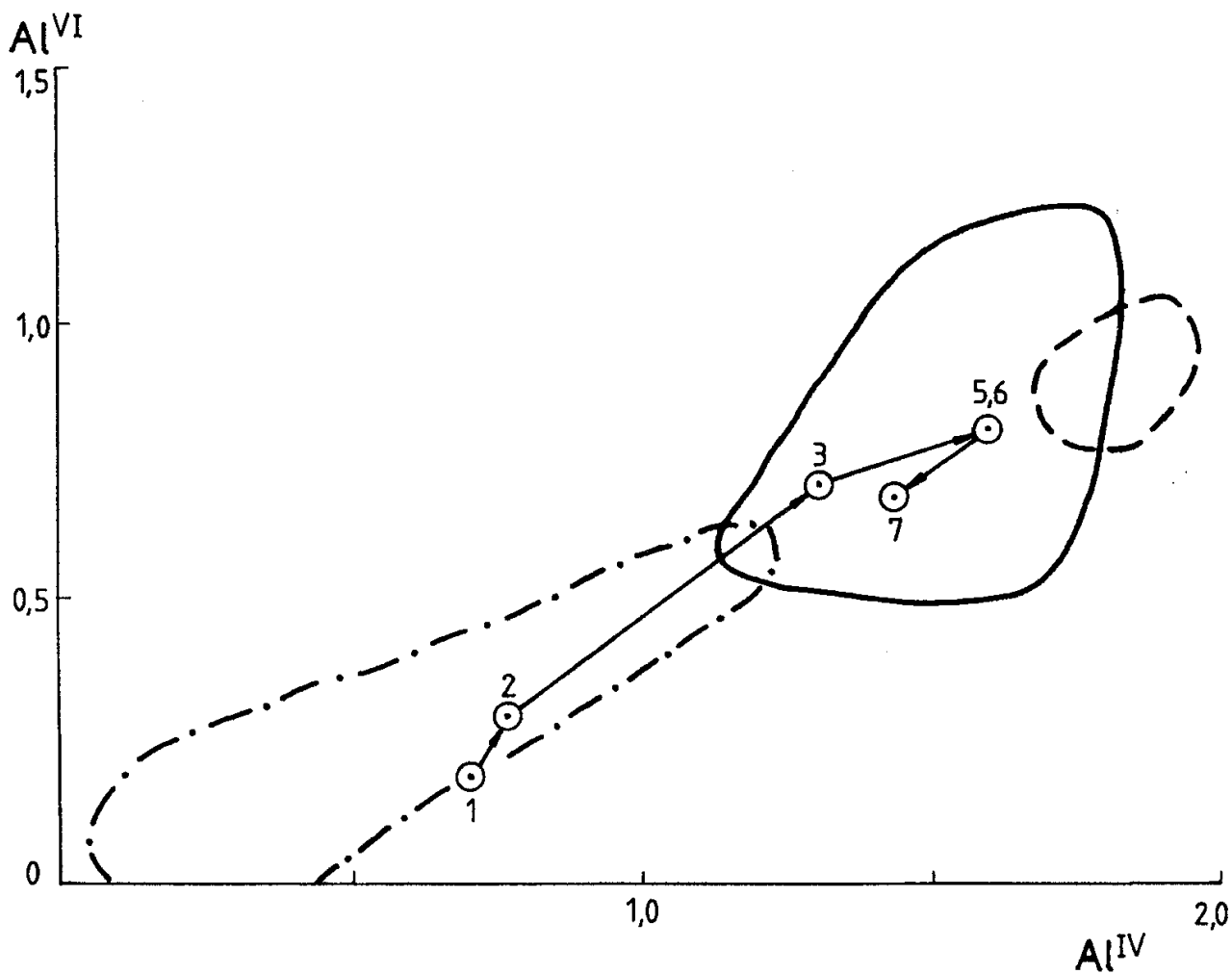
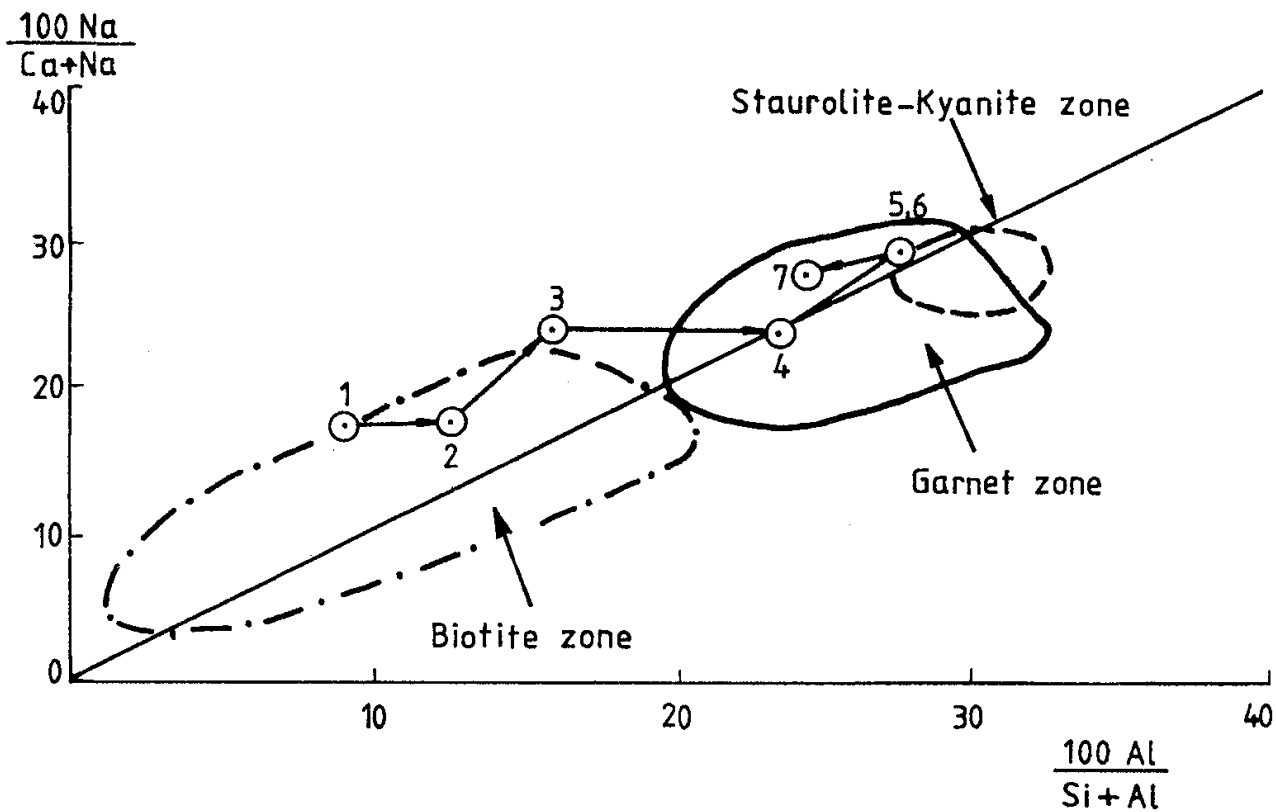
Фиг. 5. Диаграма на регионалнометаморфни фацисе, субфацисе и фациални серии (по Глебовицкий (1977), със съкращения). С тирета са нанесени разграничаващите фациални серии А₁, А₂, А₃, АБ, Б₁, Б₂ и В геотермични линии. Фацисе: I — зоелитов или пумпелиит-пренитов; II — пумпелиит-актинолитов; IIIa — глаукофан-лавсонитов; IIIб — глаукофан-цоизитов; IV — на цоизит-кианит-кварцовите шисти; V — на зелените шисти; VI — на епидотовите амфиболити; VII — на алмандиновите амфиболити; VIII — на къмингтонитовите амфиболити; IX — гранулитов. Субфацисе: 4 — на ниските и умерени налягания на зеленошистния фацис; 5 — на повишените (с алмандинов гранат) налягания на зеленошистния фацис; 7 — гранат-хлорит-мусковитов; 8 — кордиерит-ставролит-хлоритов и ставролит-хлорит-андалузитов; 19 — ставролит-хлорит-мусковитов; 20 — ставролит-биотит-кианит-мусковитов; 21 — кианит-гранат-хлоритов. С точка O1 е означено началото на образуване на калциевия амфибол. Стрелката от точка O1 показва развитието на част от ранния регионалнометаморфен процес

Fig. 5. Diagram of facies, subfacies and facial series (after Глебовицкий (1977), with abbreviations). The dotted lines are geothermal lines, separating the facial series A₁, A₂, A₃, AB, B₁, B₂ and B. Facies: I — zeolite ore pumpellyite-prenite; II — pumpellyite-actinolite; IIIa — glaucophane-lawsonite; IIIb — glaucophane-zoisite; IV — of the zoisite-kyanite-quartz schists; V — of the green schists; VI — of the epidote amphibolites; VII — of the almandine amphibolites; VIII — of the cummingtonite amphibolites; IX — granulitic. Subfacies: 4 — of the low and medium pressure of the greenschist facies; 5 — of the high (with almandine garnet) pressure of the greenschist facies; 7 — garnet-chlorite-muscovite; 8 — cordierite-staurolite-chlorite and staurolite-chlorite-andalusite; 19 — staurolite-chlorite-muscovite; 20 — staurolite-biotite-kyanite-muscovite; 21 — kyanite-garnet-chlorite. The point O1 is the beginning of the calcic amphibole formation. The arrow from point O1 shows the development of part of the early regional metamorphic process

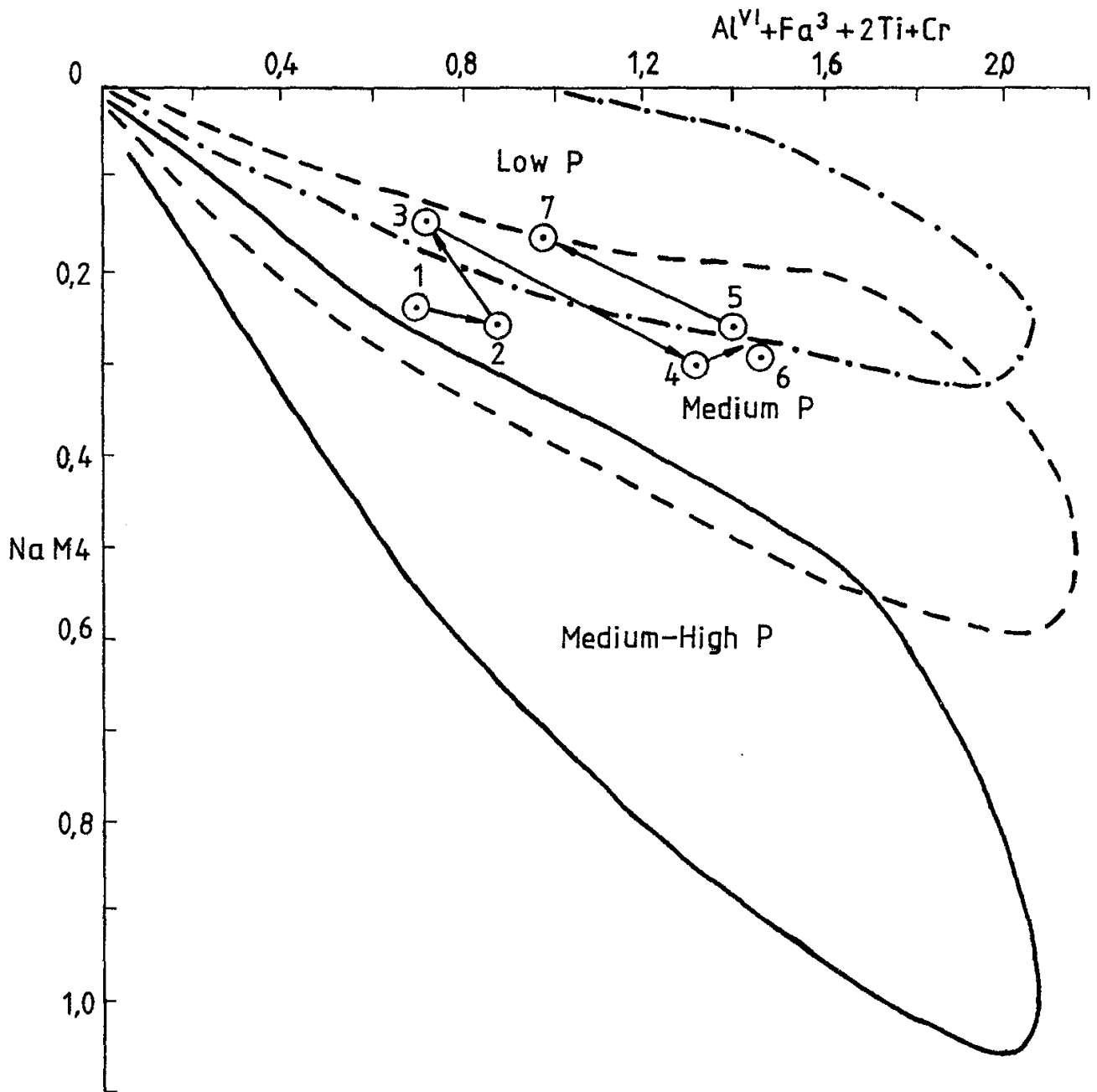
шистния фацис. Този извод се потвърждава и доразвива от постановката на Глебовицкий (1977, с. 34), че обикновен амфибол се образува малко преди високотемпературната граница на фациса на зелените шисти. За началото на разглеждания процес, от геобарометъра на Brown (1977), по данните за NaV и Al^{IV} в най-ранния амфиболов състав No 1, се отчита P около 3,5 kbar (фиг. 4). Ако се приеме, че изоградата на обикновения амфибол е 10°C преди границата между фацисите на зелените шисти и епидотовите амфиболити, по диаграмата на Глебовицкий (1977, рис. 12), при 3,5 kbar се отчита T 465°C (фиг. 5, точка O1). Съответстващата на тези данни точка е в пределите на фациалната серия АБ, която е в междинно положение спрямо типичните андалузит-силиманитови и кианит-силиманитови фациални серии.

Според Дук (1976), при андалузит-силиманитовите фациални серии, изоморфизмът между актинолит и обикновен амфибол е нарушен и не се образуват калциеви амфиболи с Al^{IV} между 0,4 и 0,8, докато при кианит-силиманитовите фациални серии този изоморфизъм протича без прекъсване. Наличието на 0,55 и 0,76 Al^{IV} в двата ранни амфиболови състава (No 1 и 2) е показателно, че в изследваното находище изоморфизмът между актинолит и обикновен амфибол е непрекъснат. Този факт е в съответствие с определената стойност за P, която е извън пределите, присъщи за типичните андалузит-силиманитови фациални серии.

В съответствие с изводите на редица изследователи (Лик, 1967; Закрутин, 1969; Добрецов и др., 1970; Костюк, 1970; Дук, 1976; Глебовицкий, 1977; Мануйлова и др., 1978; обобщения са дадени от Дир и др., 1965 и от Kassoli-Fournarakis et al., 1985), установеното увеличаване на Al^{IV} и Al^{VI} в изследваната поредица от магнезиоамфибол до чермакит е показателно за повишаване на степента на метаморфизъм. Намалването на съдържанието на тези два компонента в еденита, на свой ред, дава основание да се приеме частично понижаване на степента на метаморфизъм в края на процеса, довел до образуването на изследвания калциев амфибол. Посоченото развитие проличава и от фиг. 6 и 7. От тях е видно още, че процесът на метаморфизъм се доближава, но не навлиза в ставролит-кианитовото поле. Това означава развитие в най-високобаричната част на полето на андалузита и, съответно, в пределите на фациалната серия АБ. Фактически налягането е в пределите на умереното, както се потвърждава и от фиг. 8 и 9. Само за еденита от фиг. 8 се остава с известно впечатление за спадане на налягането, но от фиг. 9 става ясно, че налягането е в пределите на умереното. При това положение, понижаването на степента на метаморфизъм в края на процеса на образуване на калциевия амфибол трябва да се отдаде на частично понижаване на температурата. При така очерталата се обстановка, както проличава от фиг. 5, навлизането на метаморфния процес в пределите на фациса на епидотовите амфиболити протича във високобаричната част на гранат-хлорит-мусковитовия субфацис (7). Тесният температурен интервал на гранат-хлорит-мусковитовия субфацис, в съчетание със значителния размах на вариациите на Al^{IV} и Al^{VI} и на точките на фиг. 6 и 7, което е показателно за по-мощни изменения в степента на метаморфизъм, дават основание да се приеме навлизане и във високобаричната част на полето на кордиерит-ставролит-хлоритовия и ставролит-хлорит-андалузитовия субфацис (8). При така трасирания ход на регионалнометаморфния процес, минус-хлоритовата изограда, както проличава това от фиг. 5, се достига при T около 550°C и P около 4,5 kbar. Фактически това са максимално допустимите стойности за T и P за метаморфизма на Мандришката група. Заслужава да се отбележи, че преминаване през гранат-хлорит-мусковитовия субфацис проличава и от минералната парагенеза на част от метапелитите на Орешиновската сви-



Фиг. 6 и 7. Диаграми на Laird, Albee (1981) с нанесени точки за изследвания калциев амфибол
 Fig. 6 and 7. Diagrams of Laird, Albee (1981) with points for the investigated calcic amphibole

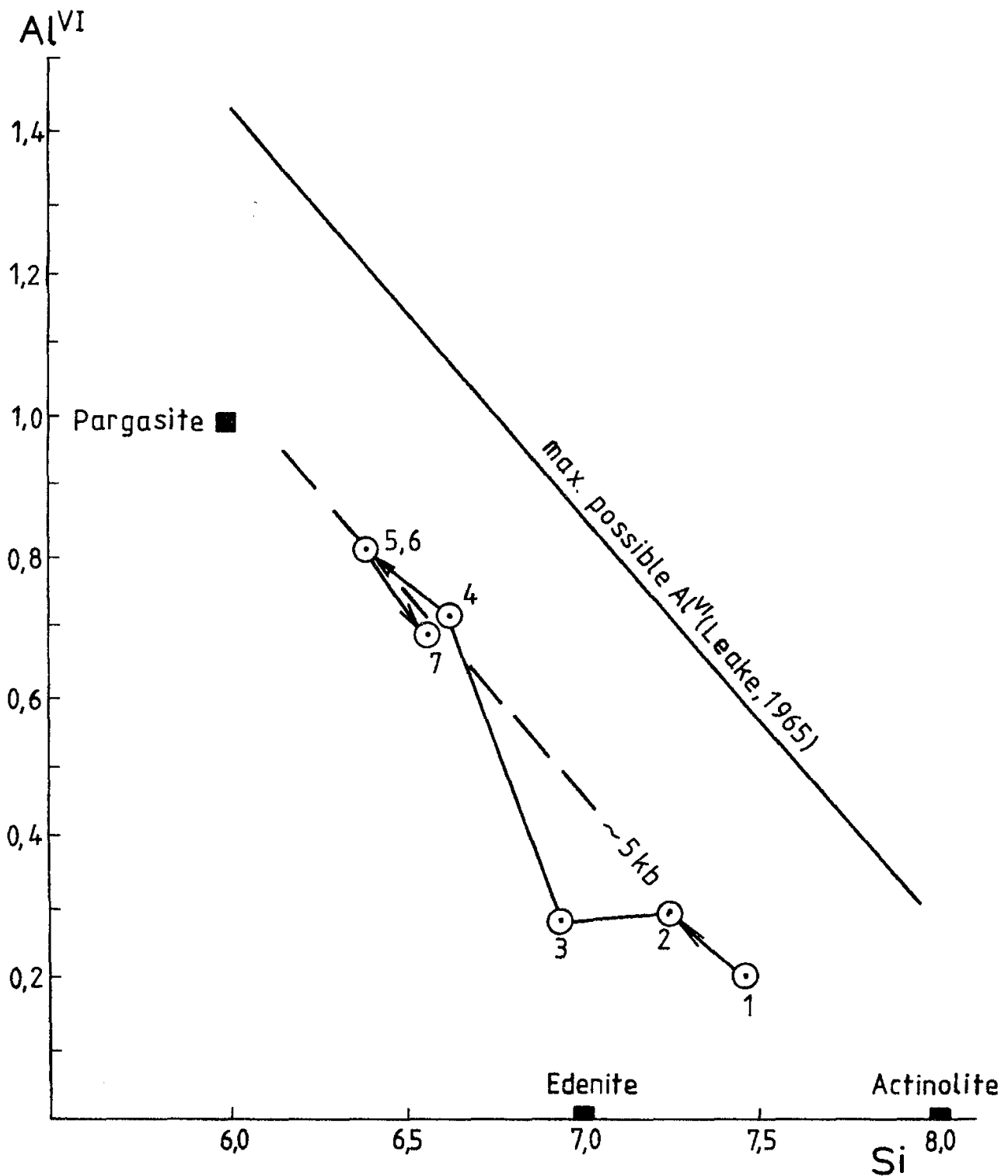


Фиг. 8. Диаграма на Laird et al. (1984) с нанесени точки за изследвания калциев амфибол
 Fig. 8. Diagram of Laird et al. (1984) with points for the investigated calcic amphibole

та. Особено добре такива скали са представени по билото на И—СИ от с. Мандрица. Описание за тях е дадено от Боянов и др. (1990, с. 5) в точка 7 на типовия разрез на Орешиновската свита.

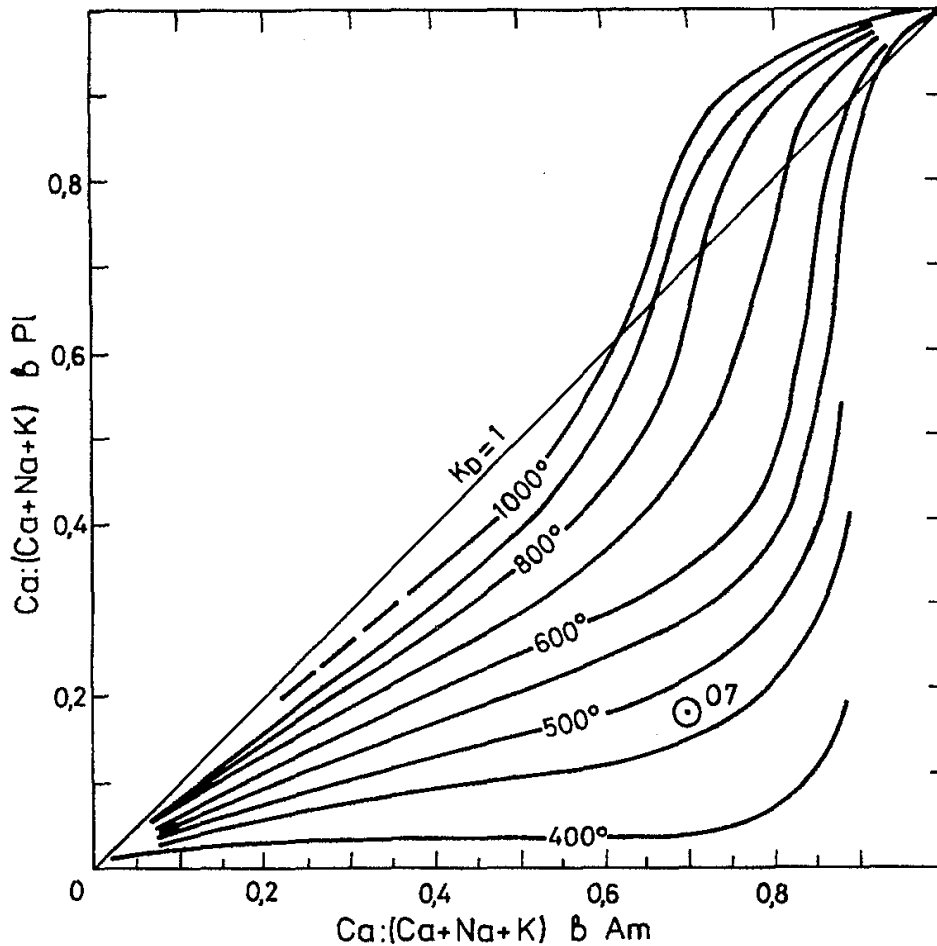
Протичането на процеса на регионален метаморфизъм във високобаричната част на полето на андалузита позволява да се приеме за него геотермичният градиент на линията, която разделя полетата на кианита и андалузита. От фиг. 5, за тази линия, при P 4,0 и 5,0 kbar, се отчита T 490 и 580°C. От посочените величини се изчислява геотермичен градиент 90°C/kbar, 27°C/km, 1°C/37 m.

Участие на еденитов тип изоморфизъм в калциеви амфиболи от регионалнометаморфни скали, според Судовиков и др. (1970, с. 157 и 159), се осъществява само в условията на амфиболитов фацес в парагенеза с кьмингтонит. Доколкото в изследваното находище и като цяло в Мандришката група такива



Фиг. 9. Диаграма на Raase (1974) с нанесени точки за изследвания калциев амфибол
 Fig. 9. Raase's diagram (1974) with points for the investigated calcic amphibole

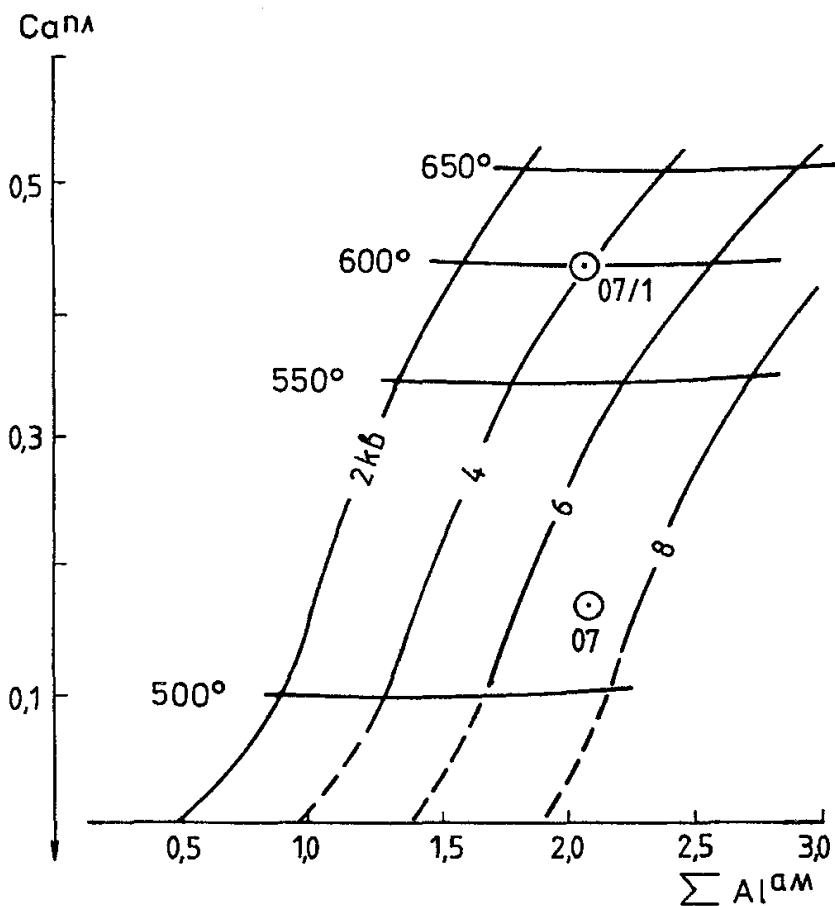
условия няма, би трябвало да се приеме, че участието на еденитов тип изоморфизъм в по-вътрешните части на по-големите амфиболови кристали (състав No 3) и особено в частично развитите най-външни зони, отнасящи се към еденит (състав No 7), е обусловено от приток на натрий от постъпващи от дълбочина флуиди. В подкрепа на този извод е и повишеното съдържание на калций в посочените състави, понеже, според Шкодзънски (1970, с. 19), повишаването на химичния потенциал на алкалиите, води до преразпределение на калция



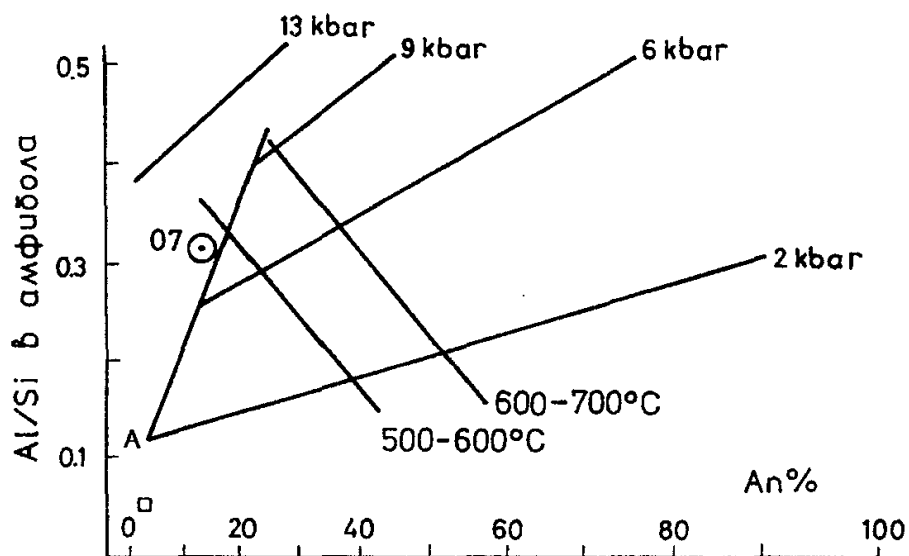
Фиг. 10. Амфибол-плагиоклазов геотермометър (по Перчук, Рябчиков, 1976). Пояснения в текста
 Fig. 10. Hornblende-plagioclase geothermometer (after Перчук, Рябчиков, 1976). Explanations in the text

от амфибола към плагиоклаза. В контекста на извода за привнос на натрий заслужава да се отбележи, че повишеното участие на NaM4 в чермакитовите състави (No 5 и 6), се дължи на паргасит-хейстингситов тип изоморфизъм, което е присъщо за нормален регионален метаморфизъм (Дук, 1976; Глебовицкий, 1977; Мануйлова и др., 1978; Kassoli-Fournaraki et al., 1985). Както проличава от приведените на табл. 2 данни за Fe^3/Fe , степента на окисление на желязото за преобладаващата част от химични състави, е около 0,50, докато в съставите с участие на еденитов тип изоморфизъм тя е значително по-ниска, съответно 0,27 за състав No 3 и 0,14 за състав No 7. Посочените данни дават основание за извода, че постъпващите от дълбочина флуиди са с понижен окислителен потенциал спрямо действащите на място метаморфозиращи флуиди.

Микроскопските и микросондовите изследвания показват, че хабитусът на амфиболовите кристали се оформя от чермакитовите състави. Според Чесноков (1966), за обикновен амфибол от метаморфни скали е присъщо отношение $[010]:[001]$ от 1:4 до 1:5. Както вече се отбеляза, при кристалите на изследвания калциев амфибол това отношение варира в пределите от 1:5 до 1:10. В съответствие с разработената от Kostov (1977) концепция за генетичното значение на хабитуса на кристалите на минералите, удължаването на хабитуса



Фиг. 11. Экспериментален плагиоклаз-амфиболов геотермобарометър (по Plyusnina, 1982).
 Пояснения в текста
 Fig. 11. Experimental plagioclase-hornblende geothermobarometer (after Plyusnina, 1982).
 Explanations in the text



Фиг. 12. Амфибол-плагиоклазов геобарометър за метаморфни скали (по Ферштатер, 1990).
 Пояснения в текста
 Fig. 12. Hornblende-plagioclase geobarometer for metamorphic rocks (after Ферштатер, 1990).
 Explanations in the text

при изследвания калциев амфибол дава основание да се приеме по-висока степен на пресищане в метаморфозиращите разтвори спрямо по-често срещаната.

С оглед прилагането на геотермометри и геобарометри, основаващи се на двойката амфибол-плагноклаз, са проведени 10 пълни силикатни анализа на плагноклаза, едновременно с анализирането на калциевия амфибол. Оказа се, че вариациите в състава на плагноклаза са минимални. Ограничени са в пределите от $(\text{Na}_{0,84}\text{Ca}_{0,17}\text{Mg}_{0,01})_{1,02}(\text{Si}_{2,83}\text{Al}_{1,16}\text{Fe}^{3+}_{0,01})_{3,99}\text{O}_8 - \text{An}_{17}$, до $(\text{Na}_{0,77}\text{K}_{0,01}\text{Ca}_{0,19}\text{Mg}_{0,03})_{1,00}(\text{Si}_{2,81}\text{Al}_{1,17}\text{Fe}^{3+}_{0,01})_{3,99}\text{O}_8 - \text{An}_{20}$. Като съществуващ с плагноклаза, може да се счита еденитът. Измененията в състава на калциевия амфибол в една или друга степен са резултат от взаимодействие с плагноклаза, в което в края на изучавания процес, освен влияние на Т и Р, определена роля играе и привносът на натрий. Понеже, както вече се отбеляза, при привноса на натрий от плагноклаза се извлича калций, за съществуващ с еденита би трябвало да се приеме най-киселият плагноклазов състав. По геотермометъра на Перчук, Рябчиков (1976) се отчита Т около 470°C (фиг. 10, точка О7). Получената стойност е твърде ниска. Геотермометърът на Blundy, Holland (1990) не е използван поради големите отклонения, които дава при плагноклаз с ниско анортитово съдържание. Освен това, този геотермометър се основава на реакции със забележимо участие на кварц, какъвто в изследваната скала е представен съвсем оскъдно. По геотермобарометъра на Plyusnina (1982) се отчита Т около 515°C и Р около 7 kbar (фиг. 11, точка О7). Стойността за Т е в допустимите граници, но тя се дава само от състава на плагноклаза. Стойността за Р на свой ред е завишена с около 3 kbar. По геобарометъра на Ферштатер (1990) точен отчет не може да се направи, но също се очертава завишена стойност за Р (фиг. 12, точка О7). Доколкото при отчитане на Р и по двата метода взима участие алуминият в калциевия амфибол, може да се предположи, че неговото съдържание е завишено спрямо равновесното разпределение с плагноклаза. Ако се приеме, че алуминият в калциевия амфибол е равновесен с плагноклаза, за стойност на Р от 4 kbar, каквато е най-вероятна, според геотермобарометъра на Plyusnina (1982), се изисква плагноклаз с 43 % анортитово съдържание и стойност за Т 600°C (фиг. 11, точка О7/1). От всички посочени отклонения проличава, че парагенетичните връзки между калциевия амфибол и плагноклаза са нарушени. Това положение би могло да се отдаде на по-бързото протичане на метаморфния процес, осуетило достигането на равновесие. Показателно в това отношение е и обстоятелството, че в Мандришката група и особено в Орешиновската свита, на близки разстояния идват както съвсем дребнозърнести до плътни мрамори, кварцити и филити, явно повлияни само от изменения в условията на зеленошистен фацис, така и поедрозърнести метаморфити, продукт на ранния регионален метаморфизъм, като мусковит-биотит-амфиболови шисти и изследваната скала, в които са проявени процеси в условията на епидот-амфиболитов фацис. Тази обстановка, както и нарушените парагенетични връзки между калциевия амфибол и плагноклаза и повишената степен на пресищане в метаморфозиращите флуиди, дават основание за извода, че процесите в пределите на епидот-амфиболитовия фацис през ранния регионален метаморфизъм на Мандришката група, са протекли сравнително бързо и в ограничен интервал от време. За неравномерната проява на метаморфизма, по всяка вероятност, е играла роля и различната флуидна проникваемост на скалите.

Благодарности. Изследването беше финансово подкрепено от Националният фонд „Научни изследвания“, договор НЗ-503.

Л и т е р а т у р а

- Боянов, И., М. Русева, В. Топракчиева, Е. Димитрова. 1990. Литостратиграфия мезозойских пород в Восточных Родопах. — *Geologica Balc.*, 20, 5, 3—28.
- Глебовицкий, В. А. 1977. Минеральные фации как критерий оценки параметров метаморфизма. — В: В. А. Глебовицкий (ред.). *Термо- и барометрия метаморфических пород*. Л., Наука, 5—39.
- Дир, У. А., Р. А. Хауи, Д. Зусман. 1965. *Породообразующие минералы. Т. 2. Цепочечные силикаты*. М., Мир, 406 с.
- Добрецов, Н. Л., В. В. Ревердатто, В. С. Соболев, Н. В. Соболев, В. В. Хлестов. 1970. *Фации метаморфизма*. М., Недра, 432 с.
- Добрецов, Н. Л., В. С. Соболев, В. В. Хлестов. 1972. *Фации регионального метаморфизма умеренных давлений*. М., Недра, 280 с.
- Дук, Г. Г. 1976. Эволюция химизма состава кальциевых амфиболов основных метаморфических пород в различных типах метаморфизма. — *Изв. АН СССР, сер. геол.*, 1, 12—23.
- Закрутин, В. В. 1969. Об эволюции амфиболов при метаморфизме. — *Зап. Всес. минер. общ.*, 94, 1, 13—24.
- Костюк, Е. А. 1970. *Статистический анализ и парагенетические типы амфиболов метаморфических пород*. М., Наука, 312 с.
- Лик, Б. Э. 1967. Соотношения между составом известковых амфиболов и степенью метаморфизма. — В: Питчер, У. С., Г. У. Флинн (ред.). *Природа метаморфизма*. М., Мир, 311—330.
- Мануйлова, М. М., В. В. Зарубин, Ю. И. Михайлова. 1978. Использование составов сосуществующих роговых обманок и биотитов для разделения различных по глубинности фациальных серий метаморфических пород. — *Зап. Всес. минер. общ.*, 107, 1, 65—80.
- Перчук, Л. Л., И. Д. Рябчиков. 1976. *Фазовое соответствие в минеральных системах*. М., Недра, 287 с.
- Судовиков, Н. Г., В. А. Глебовицкий, А. С. Сергеев, В. П. Петров, А. Л. Харитонов. 1970. *Геологическое развитие глубинных поясов (Северное Приладожье)*. Л., Наука, 227 с.
- Ферштатер, Г. Б. 1990. Эмпирический плагиоклаз-роговообманковый барометр. — *Геохимия*, 3, 328—335.
- Чесноков, Б. В. 1966. О связи облика кристаллов амфиболов с их химическим составом. — *Зап. Всес. минер. общ.*, 95, 4, 453—455.
- Шкодзынский, В. С. 1970. *Минеральные парагенезисы на контакте гранитоидов с основными породами*. М., Наука, 109 с.
- Boyanov, I., M. Russeva. 1989. Lithostratigraphy and tectonic position of the mesozoic rocks in the East Rhodopes. — In: *Geologica Rhodopica*, 1, Sofia, Univ. Press, 22-33.
- Blundy, J. D., I. J. B. Holland. 1990. Calcic amphibole equilibrium and a new amphibole-plagioclase geothermometer. — *Contrib. Mineral. Petrol.*, 104, 2, 208-224.
- Brown, E. H. 1977. The crossite content of Ca-amphibole as a guide to pressure of metamorphism. — *J. Petrol.*, 18, 1, 53-72.
- Kassoli-Fournaraki, A., G. Eleftheriadis, K. Michailidis. 1985. Amphibole's chemistry as pressure and temperature indicator in amphibolites from the Serbo-Macedonian massif (Greece). — *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 65, 2/3, 247-264.
- Kostov, I. 1977. Crystal chemistry of the minerals: relationship between crystal structure, condition of crystallisation and growth morphology. — *Geochem., Mineral. and Petrol.*, 7, 8-21.
- Laird, J., A. L. Albee. 1981. Pressure, temperature and time indicators in mafic schist: their application to reconstructing the polymetamorphic history of Vermont. — *Am. J. Sci.*, 281, 127-175.
- Laird, J., M. A. Lauphere, A. L. Albee. 1984. Distribution of ordovician and devonian metamorphism in mafic and pelitic schists from Vermont. — *Am. J. Sci.*, 284, 376-413.
- Leake, B. E. 1978. Nomenclature of amphiboles. — *Mineral. Mag.*, 42, 324, 533-563.
- Leake, B. E. et al. 1997. Nomenclature of amphiboles. Report of the Subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. — *Eur. J. Mineral.*, 9, 3, 623-651.
- Papadopoulos, P., N. Arvanitidis, I. Zanas. 1989. Some preliminary geological aspects on the Makri unit (phyllite series), Peri-Rhodope zone. — In: *Geologica Rhodopica*, 1, Sofia, Univ. Press, 34-42.
- Papike, J. J., K. L. Cameron, K. Balduin. 1974. Amphiboles and pyroxenes: Characterization of other and quadrilateral components and estimates of ferric iron from microprobe data. — *Abstr. Program Geol. Soc. Am.*, 6, 1053-1054.
- Plyusnina, L. P. 1982. Geothermometry and geobarometry of plagioclase-hornblende assemblages. — *Contrib. Mineral. Petrol.*, 80, 2, 140-146.
- Raase, P. 1974. Al and Ti contents of hornblende, indicators of pressure and temperature of regional metamorphism. — *Contrib. Mineral. Petrol.*, 48, 3, 231-236.