

# Приложение на метода на главните компоненти при тълкуване на еволюцията на Боровишката шошонитова серия, Източни Родопи

*Методи Караджов, Йоцо Янев*

Karadjov, M., Y. Yanev. 1998. Application of the principal component analysis for interpretation of the Borovitza shoshonitic series evolution, Eastern Rhodopes. - *Geochem., Mineral. and Petrol.*, 35, 79-92

**Abstract.** This multivariate method is applied to a Paleogene series consisting of shoshonites, latites, dacites, and low- and high-Si rhyolites. The information matrix includes the whole-rock composition, the groundmass, phenocrysts and some accessories (magnetite and apatite) characterized by 9 oxides and 26 trace elements. Analytical data are standardized by Z-transformation.

This study allows to define two, almost equivalent principal components (PC) which account for >70% of the chemical data variations. According to the minerals (or groundmass) which concentrate some chemical elements (elements with significant values of the eigenvectors are taken into account only), the first PC is called salic-mafic, and the second one matrix-phenocrysts. Because of the fact that the above elements have  $K_d > 1$  for some phenocrysts their crystallization and fractionation lead to decreasing or increasing values of the respective PC. Therefore the PC permit to estimate which are the principal fractionated minerals. For the latites and dacites these minerals are biotite, pyroxene and plagioclase, and for the low- and high-Si rhyolites the more important fractionated minerals are plagioclase and amphibole. According to this study, the examined shoshonites do not belong to this series. It is supposed that the fractional crystallization had two stages, corresponding to the two PC: plagioclase crystallizes first which separation generates a residual melt (represented here by the groundmass). In this melt pyroxene and other mafic minerals crystallize which fractionation leads to the formation of the respective, more acid member of the series. This sequence of crystallization is characteristic for a water-nonsaturated magma.

**Key words:** Principal component analysis, shoshonitic series, fractional crystallization, partition coefficients

**Address:** Geological Institute, Bulgarian Academy of Science, 1113 Sofia, Bulgaria;

e-mail: metodi@geology.bas.bg ; yotzo@geology.bas.bg

**Ключови думи:** метод на главния компонент, шошонитова серия, кристализационна диференциация, коефициенти на разпределение.

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

## Увод

Палеогенската Боровишка вулканска серия е дефинирана от Иванов (1963) като К-суб-алкална с членове от абсарокити до трахириолити, образувана вследствие на кристализационна диференциация. По-късно

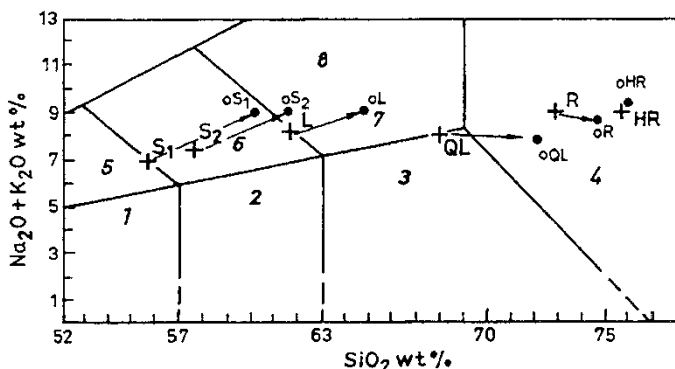
същият автор (Иванов, Стоянова, 1966) приема, че киселите вулканити не са продукт на този процес. Марчев (1985) описва в южната част на Боровишкия вулкански района шошонити, поради което нарича серията шошонитова. Той характеризира петрографски (вкл. състава на

порфирите) и химически (главни елементи и елементи-следи) част от членовете на тази серия (шошонити, латити, кварцлатити, трахити, ниско- и високо-Si риолити). С тези изследвания той потвърждава хипотезата на Иванов от 1963 г. за произхода на Боровишката серия, която допълва с асимилация на коров материал (т.н. AFC процес), флуиден транспорт на някои от химическите елементи и смесване на магми. На основата на разпределението на редкоземните елементи Daieva, Marchev (1986) считат, че еволюцията на магмата от шошонити до латити се извършва следствие на фракциониране на плагиоклаз + орто- и клинопироксен + биотит + титаномagnetит + апатит + оливин. При киселите вулкани рязко се сменя видът на фракционираните минерали като кварцлатитите произлизат от латитите (Marchev et al., 1987) при отделяне на плагиоклаз, орто- и клинопироксен, титаномagnetит и биотит. Продължаващата кристализация на плагиоклаз, санидин, клинопироксен, magnetит и биотит води до формиране на ниско-Si риолити, а отстраняването на тези

минерали, заедно с амфибола — до високо-Si риолити. Фракционирането на титанит и апатит обяснява обедняването на киселите вулкани с леки и средни редкоземни елементи (Daieva, Marchev, 1986).

Добрата петроложка характеристика на вулканитите от южната част на Боровишкия район позволи те да бъдат използвани за прилагане на статистически методи, с което да се провери предлаганата хипотеза за техния произход. За целта са изследвани 6 скални разновидности, предложени от П. Марчев, които покриват почти целия интервал на диференциация на Боровишката серия (с изключение на абсарокитите) и са напълно представителни за тази част на района. Изследваните вулкани са с нарастващо SiO<sub>2</sub> съдържание (фиг. 1) и са наречени от същия автор (Марчев, 1985) съответно: Безводненски шошонити (SiO<sub>2</sub> 55,73%), Кадънски шошонити (SiO<sub>2</sub> 57,46%, т.е. латити според класификацията на IUGS - Le Maitre, 1989), Бездивенски латити (SiO<sub>2</sub> 61,72%), Маденски кварцлатити (SiO<sub>2</sub> 67,84%, т.е. дацити според класификацията на IUGS), Боровишки ниско-Si риолити (SiO<sub>2</sub> 72,81%) и Гьомдъшки високо-Si риолити (SiO<sub>2</sub> 75,63%). Всички вулкани са изградени от впръследи и основна маса в различни пропорции (табл. 1). На същата таблица е показан и съставът на впръследите според химическите анализи на мономинерални проби (Караджов, Андреев, 1998). От нея се вижда, че с нарастване на SiO<sub>2</sub> съдържание на вулканитите химическият състав на някои порфирни минерали се изменя според известните в петрологията закономерности: Mg/Mg+Fe на биотита постепенно намалява (от латитите до високо-Si риолити), а съдържанието на К в него се увеличава; нараства съдържанието на Si и Na в амфибола, а това на калия намалява; нараства албитовият компонент в плагиоклазите; намалява съдържаните на TiO<sub>2</sub> в magnetита. Съставът на пироксените се променя слабо, както в повечето шошонитови серии (Марчев, 1985).

В настоящата статия се предлага интерпретация на резултатите от обработката на аналитичните данни за скалите от тази серия с метода на главните компоненти за



Фиг. 1. Алкалии-силициева (TAS) диаграма (по Le Maitre, 1989) с фигуративните точки на изследваните вулкани (кръстчетата: S<sub>1</sub> - Безводненски шошонит, S<sub>2</sub> - Кадънски шошонит, L - Бездивенски латит, QL - Маденски кварцлатит, R - Боровишки ниско-Si риолит, HR - Гьомдъшки високо-Si риолит — имената според Марчев, 1985) и тяхната основна маса (черните точки: обозначени с буква "o"). 1 - андезитобазалт, 2 - андезит, 3 - дацит, 4 - риолит, 5 - шошонит, 6 - латит, 7 - трахидацит и 8 - трахит

Fig. 1. TAS diagram after Le Maitre (1989) with the points of the volcanic rocks studied (crosses: S<sub>1</sub> - Bezvodno shoshonite, S<sub>2</sub> - Kadanka shoshonite, L - Bezdiven latite, QL - Maden quartz-latite, R - Borovitza low-Si rhyolite, HR - Gyomdash high-Si rhyolite — the names of the volcanic rocks are after Marchev, 1985) and their groundmass (solid circles: with letter "o"). 1 - basaltic andesite, 2 - andesite, 3 - dacite, 4 - rhyolite, 5 - shoshonite, 6 - latite, 7 - trachydacite and 8 - trachyte

Таблица 1  
 Минерален състав на изследваните вулканити от Боровишката шошонитова серия (южна периферия на вулканския район)  
 Table 1  
 Mineral composition of the studied volcanics of the Borovitzha shoshonitic series (south periphery of the volcanic region)

Порфирни минерали	Безводненски шошонити	Кадънски шошонити (лагити)	Бездивенски лагити	Маденски кварлагити (лагити)	Боровишки ниско-Si риолити	Гьомдъшки високо-Si риолити
Ортопироксен		Wo <sub>2,4</sub> Eп <sub>70</sub>	Wo <sub>2,3</sub> Eп <sub>71,2</sub>			
Клинопироксен	Wo <sub>42,3</sub> Eп <sub>42,1</sub>	Wo <sub>43,5</sub> Eп <sub>43,9</sub>	Wo <sub>43,7</sub> Eп <sub>43,2</sub>	Wo <sub>46,8</sub> Eп <sub>40,3</sub>		
Биотит: Mg#; <sup>IV</sup> Al; K	0,75; 2,66; 1,72	0,70; 2,53; 1,73	0,63; 2,4; 1,65	0,58; 2,45; 1,75	0,54; 2,45; 1,79	0,49; 2,5; 1,86
Амфибол: Mg#; Si; Na				единичен	0,63; 7,07; 0,407	0,64; 7,16; 0,513
Плагиоклаз	Ап <sub>61,6</sub> Ог <sub>2,6</sub>	Ап <sub>36,3</sub> Ог <sub>7,4</sub>	Ап <sub>39,5</sub> Ог <sub>3,3</sub>	Ап <sub>49</sub> Ог <sub>10</sub>	Ап <sub>34,9</sub> Ог <sub>9,4</sub>	Ап <sub>25,3</sub> Ог <sub>7,2</sub>
Санидин	единичен*	единичен*	ксенокристали*	Ог <sub>71</sub> Ab <sub>26</sub>	Ог <sub>63,9</sub> Ab <sub>31,7</sub>	Ог <sub>66,8</sub> Ab <sub>30,8</sub>
Кварц		ксенокристали*	ксенокристали*	да	да	да
Магнетит: TiO <sub>2</sub> %	9,2	8,54	7,95	6,38	4,98	4,38
Количество (%)	39	29,5	22,5	31,5	38,5	24

\* по Марчев (1985)

Заб.: съставът на минералите е според химическия анализ на мономинерални проби (Караджов, Андреев, 1998);  
 количеството на впръсците е изчислен по специален метод също от химическия състав на скалата и минералите в нея (Караджов, Андреев, 1998).  
 Note: the composition of the phenocrysts is according to the chemical analyses of monomineral samples (Karadjov, Andreev, 1998);  
 The quantity of the phenocrysts is also calculated according to their chemical compositions (Karadjov, Andreev, 1998).

проверка на предложената хипотеза за нейния произход. Този метод е част от мултивариантния статистически анализ и е от най-често използваните за геоложка интерпретация на аналитични данни. В най-елементарен вид той може да бъде представен като реорганизационна процедура, с която се постига редукция на оригиналните резултати от химичния анализ в подобни, но с по-ниска размерност (Rock, 1988). От тук следва, че този метод трансформира оригиналната мрежа от  $N$  променливи (в конкретния случай количеството от химичните елементи, анализирани в скалите и минералите) в нова мрежа от  $N$  компоненти, наречени главни компоненти (ГК). С това се постига: 1) ортогоналност на компонентите, без корелация помежду им (Jolliffe, 1986) и 2) по-голямата част от вариациите в началните данни (75-80%) се отразява чрез първите 2-3 компонента. Като следствие от преобразуването се създава възможност местоположението на всяка скала или минерал, разглеждани като точки в  $N$ -мерното пространство на химичните елементи и охарактеризирани чрез количеството на последните, да бъде представено на двумерни диаграми, формирани от отделните ГК. Тези ГК са свързани с най-важните закономерности в системата и се разглеждат като отражение на действието на реални природни процеси (Le Maitre, 1982; Андреев, 1991). Например в магмената петрология това могат да бъдат процесите на магмена диференциация, които са довели до формирането на дадена магмена серия.

## Методика

При настоящото изследване с рентгеноспектрален анализ са анализирани 9 петрогенни оксиди на изброените по-горе 6 скални разновидности, на отделената от тях основна маса, порфирни минерали и някои акцесори (магнетит и апатит). Елементите-следи (26 на брой) в същите са определени с рентгенофлуоресцентен, неутронноактивационен и атомноабсорбционен метод. Резултатите са публикувани в една предшествуваща статия (Караджов, Андреев, 1998). Тези аналитични данни формират изследваната в статията

матрица. Според препоръките в специализираната литература (Rock, 1988) числените стойности в матрицата са стандартизирани, защото част от измерените концентрации са изразени в проценти, а друга - в ppm. В настоящата работа за стандартизиране е използвана така наречената  $Z$  - трансформация (Massart, Kaufman, 1983), която замества получените аналитични резултати с размерности на дисперсията им. Това изравнява статистическото тегло на всички елементи, независимо от количеството им.

Като изчислителен апарат е използвана специализирана компютърна програма PCAWD, която е част от пакета петроложки програми, разработени и адаптирани в дисертацията на Андреев (1991).

С цел постепенното детайлизиране на изследването методът на главните компоненти е прилаган върху три различни извадки от входни данни. Те включват химическия състав на вулканитите и тяхната основна маса, както и: в първата всички порфирни минерали и анализирани акцесорни апатит и магнетит или общо 45 обекта; във втората — само порфирните минерали или общо 36 обекта; в третата — само порфирите с количество над 10% (по данните на Караджов, Андреев, 1998) т. е. клинопироксенът в шошонитите и фелдшпатите във всички вулканити или общо 24 обекта.

## Резултати и интерпретация

Собствените стойности на корелационната матрица (табл. 2) показват, че сумата от първите три ГК обхваща повече от 80% от вариациите в системата. Само първите два от тях надхвърлят 10 % и са значими при достоверност на модела 90%. Под тази гра-

Таблица 2

*Нетривиални собствени стойности (в %) на първите 5 главни компонента (ГК), получени от три извадки*  
Table 2

*Non trivial eigenvalues (in %) of the first 5 principal components extracted from three matrices*

Брой на обектите в извадката	I ГК	II ГК	III ГК	IV ГК	V ГК
45 обекта	31,52	26,26	9,73	9,03	6,61
36 обекта	31,69	24,58	17,93	6,28	5,77
24 обекта	40,72	30,49	9,42	6,35	2,47

ница се счита, че се навлиза в зоната на аналитичните и други грешки. Тези два ГК обаче са с много близки собствени стойности и определянето на единия от тях като

първи, а другият като втори е относително. Те обясняват над 70 % от поведението на разглежданите химически елементи при еволюцията на вулканската серия. Останалите

Таблица 3

Структура на I и II главен компонент на извадка, включваща химическия състав на изследваните вулканити, основната им маса, порфирните минерали, магнетита и апатита (45 обекта)

Table 3

Structure of the I and II principal components extracted from the matrix with the chemical composition of the rocks studied, their groundmass, phenocrysts, magnetite and apatite (45 objects)

Главен компонент			Пглавен компонент		
Елементи и оксиди	нетривиални стойности	минерали с $K_d > 1$	елементи и оксиди	нетривиални стойности	минерали с $K_d > 1$
<b>CaO</b>	<b>0,22</b>	<i>ap</i> , <i>pyr</i> , <i>amph</i> , <i>pl</i>	<b>Yb</b>	<b>0,25</b>	<i>ap</i> , <i>amph</i> , <i>срх</i>
<b>Zr</b>	<b>0,22</b>	<i>amph</i> , <i>ap</i>	<b>Tb</b>	<b>0,24</b>	<i>ap</i> , <i>amph</i> , <i>срх</i>
<b>Eu</b>	<b>0,21</b>	<i>ap</i> , <i>amph</i> , <i>pl</i> , <i>san</i> , <i>срх</i>	<b>Sm</b>	<b>0,23</b>	<i>ap</i> , <i>amph</i> , <i>срх</i>
<b>Ce</b>	<b>0,21</b>	<i>ap</i> , <i>amph</i>	<b>Ce</b>	<b>0,23</b>	<i>ap</i> , <i>amph</i>
<b>Tb</b>	<b>0,21</b>	<i>ap</i> , <i>amph</i> , <i>срх</i>	<b>La</b>	<b>0,23</b>	<i>ap</i> , <i>amph</i>
<b>La</b>	<b>0,21</b>	<i>ap</i> , <i>amph</i>	<b>Eu</b>	<b>0,22</b>	<i>ap</i> , <i>amph</i> , <i>pl</i> , <i>san</i> , <i>срх</i>
<b>Sm</b>	<b>0,20</b>	<i>ap</i> , <i>amph</i> , <i>срх</i>	CaO	0,19	
<b>Yb</b>	<b>0,20</b>	<i>ap</i> , <i>amph</i> , <i>срх</i>	Hf	0,19	
Hf	0,19		Zr	0,18	
Th	0,14		FeO	0,18	
Lu	0,13		Cr	0,17	
Na <sub>2</sub> O	0,11		Lu	0,17	
Sr	0,09		Mn	0,17	
SiO <sub>2</sub>	0,09		Co	0,17	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07		Ni	0,16	
K <sub>2</sub> O	-0,01		V	0,16	
Rb	-0,01		Cu	0,15	
Ta	-0,03		Zn	0,14	
Ba	-0,04		Ti	0,13	
Cs	-0,07		Sc	0,09	
MgO	-0,09		Pb	0,07	
Sc	-0,12		Th	0,03	
Li	-0,15		MgO	0,01	
Pb	-0,16		Li	0,01	
<b>Cu</b>	<b>-0,21</b>	<i>mt</i> , <i>bi</i> , <i>pyr</i> , <i>amph</i>	Ta	-0,01	
<b>Mn</b>	<b>-0,21</b>	<i>mt</i> , <i>amph</i> , <i>срх</i> , <i>bi</i>	K <sub>2</sub> O	-0,03	
<b>Ni</b>	<b>-0,22</b>	<i>mt</i> , <i>amph</i> , <i>bi</i> , <i>pyr</i>	Cs	-0,09	
<b>V</b>	<b>-0,22</b>	<i>mt</i> , <i>bi</i> , <i>amph</i> , <i>срх</i>	Ba	-0,11	
<b>Co</b>	<b>-0,23</b>	<i>mt</i> , <i>amph</i> , <i>bi</i> , <i>pyr</i>	Rb	-0,15	
<b>FeO</b>	<b>-0,24</b>	<i>mt</i> , <i>bi</i> , <i>pyr</i> , <i>amph</i>	Sr	-0,18	
<b>Ti</b>	<b>-0,24</b>	<i>mt</i> , <i>bi</i> , <i>amph</i>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>-0,25</b>	<i>pl</i>
<b>Zn</b>	<b>-0,24</b>	<i>mt</i> , <i>bi</i> , <i>amph</i> , <i>pyr</i>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>-0,28</b>	<i>pl</i> , <i>san</i>
<b>Cr</b>	<b>-0,24</b>	<i>mt</i> , <i>pyr</i> , <i>bi</i> , <i>amph</i>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>-0,29</b>	<i>matrix</i>

Символи на минералите за таблици 3, 4 и 5: *pyr* - пироксени (*срх*-клинопироксен), *amph* - амфибол, *bi* - биотит, *pl* - плагиоклаз, *san* - санидин, *ap* - апатит, *mt* - магнетит, *matrix* - основна маса.

Заб.: В посочените таблици елементите със значими нетривиални стойности са изписани с по-дебел шрифт и само за тях са посочени порфирните минерали, имащи  $K_d > 1$  (минералите с  $K_d > 10$  са изписани с курсив).

Symbols of the minerals in Tables 3, 4 and 5: *pyr* - pyroxenes (*срх* - clinopyroxene), *amph* - amphibole, *bi* - biotite, *pl* - plagioclase, *san* - sanidine, *ap* - apatite, *mt* - magnetite, *matrix* - groundmass.

Note: in these tables the elements with significant values of the eigenvectors are given in bold, and phenocrysts with  $K_d > 1$  are given for them only (minerals with  $K_d > 10$  are in italic).

30 % се разпределят между ГК с ниско статистическо тегло и не могат да се приемат за отражение на други реални процеси.

## Структура на главните компоненти

При интерпретацията на структурата на ГК

се взимат под внимание само значимите нетривиални стойности (>90% от максималната стойност) на отделните химически елементи в структурата на собствените вектори. Тези елементи имат коефициенти на разпределение минерал/основна маса ( $K_d$ : за петрогенните оксиди - по Караджов,

Таблица 4

Структура на I и II главен компонент на извадка, включваща химическия състав на изследваните вулканисти, основната им маса и порфирните минерали (36 обекта)

Table 4

Structure of the I and II principal components extracted from the matrix with the chemical composition of the rocks studied, their groundmass and phenocrysts (36 objects)

I главен компонент			II главен компонент		
Елементи и оксиди	нетривиални стойности	минерали с $K_d > 1$	елементи и оксиди	нетривиални стойности	минерали с $K_d > 1$
MgO	-0,29	pyr, amph, bi	Ba	-0,16	san, bi, amph, pl
FeO	-0,28	pyr, amph, bi	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,16	pl, san
Cr	-0,27	pyr, bi, amph	K <sub>2</sub> O	-0,15	san, bi
Co	-0,25	amph, bi, pyr	Ti	-0,12	
V	-0,24		Co	-0,11	
Cu	-0,24		Sr	-0,10	
Zn	-0,24		Cu	-0,07	
Ni	-0,24		Rb	-0,07	
Ti	-0,21		Ni	-0,07	
Sc	-0,21		V	-0,07	
Mn	-0,19		Li	-0,05	
Li	-0,14		Cs	-0,04	
Cs	-0,12		Na <sub>2</sub> O	0,00	
Sm	-0,11		MgO	0,00	
Ba	-0,11		Zn	0,00	
Yb	-0,09		FeO	0,02	
Lu	-0,08		Cr	0,08	
Tb	-0,07		Sc	0,08	
Rb	-0,04		SiO <sub>2</sub>	0,10	
CaO	-0,04		CaO	0,12	
Ce	-0,01		Eu	0,12	
K <sub>2</sub> O	0,00		Pb	0,17	
Ta	0,02		Th	0,18	
Eu	0,02		Mn	0,19	
Hf	0,03		Zr	0,22	
La	0,03		Ta	0,23	
Zr	0,07		Lu	0,27	
Th	0,13		Tb	0,28	
Pb	0,13		Hf	0,28	
Sr	0,20		Sm	0,29	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,22		La	0,31	amph
SiO <sub>2</sub>	0,24		Yb	0,31	amph, cpx
Na <sub>2</sub> O	0,29	pl	Ce	0,33	amph

1996; за елементите-следи — по Караджов, Караджова, 1998) > 1 (табл. 3, 4 и 5).

Поради това, че ГК имат различна структура в трите разглеждани извадки те ще бъдат интерпретирани поотделно.

Първата извадка на изследването (табл. 3)

включва всички порфири и двата анализирани акцесорни минерала (магнетит и апатит). В този случай се вижда, че I ГК корелира положително с редкоземните елементи, Zr и Ca. Техен основен концентратор е апатитът, имащ в повечето случаи  $K_d > 10$  (както и

Таблица 5

Структура на I и II главен компонент на извадка, включваща химическия състав на изследваните вулканисти, основната им маса, клинопироксена и фелдшпатите (24 обекта)

Table 5

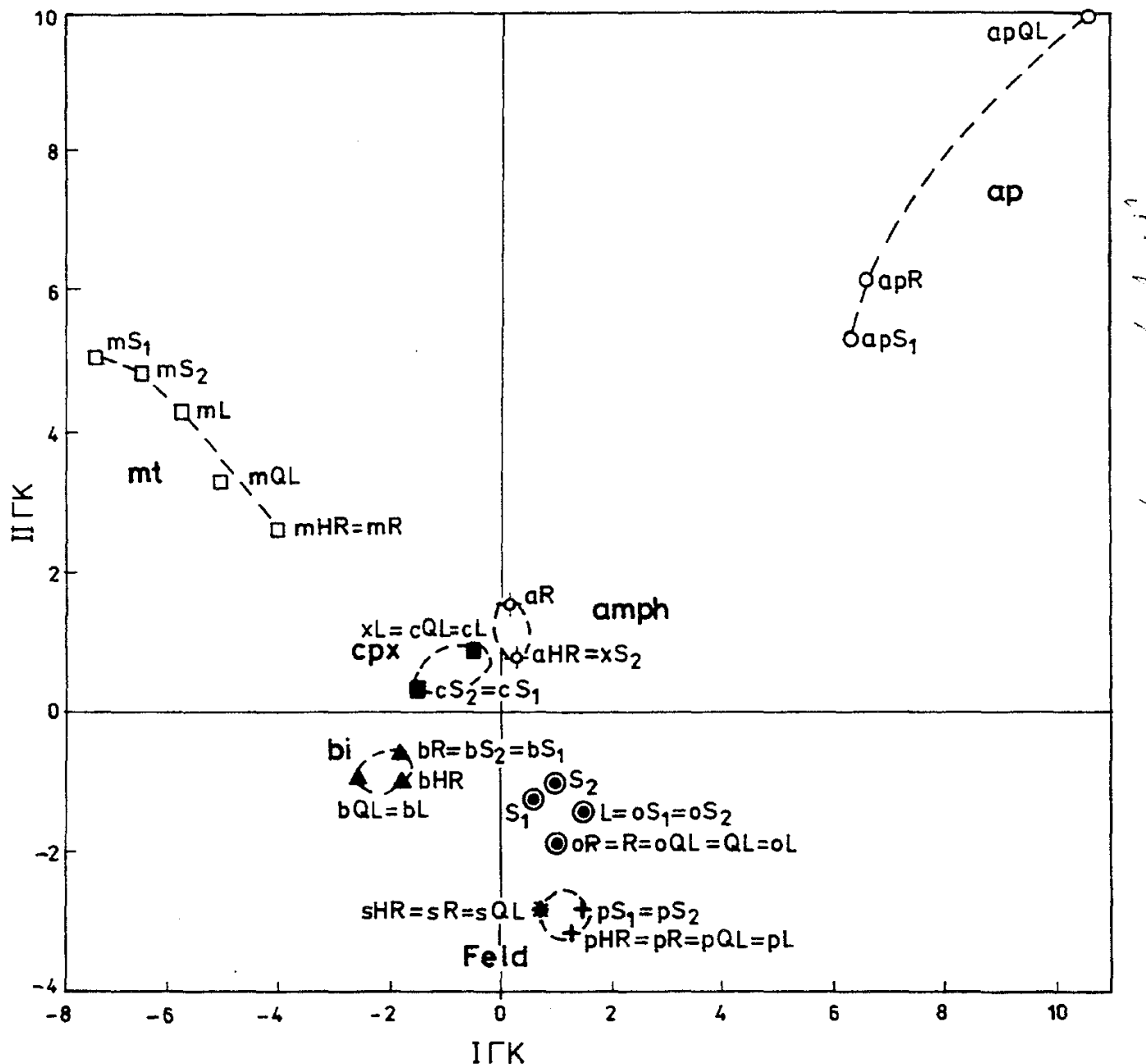
Structure of the I and II principal components extracted from the matrix with the chemical composition of the studied rocks, their groundmass, clinopyroxene and feldspars (24 objects)

I главен компонент			II главен компонент		
Елементи и оксиди	нетривиални стойности	минерали с $K_d > 1$	елементи и оксиди	нетривиални стойности	минерали с $K_d > 1$
Sm	-0,25	срх	Pb	-0,29	matrix
FeO	-0,24	срх	Ta	-0,28	matrix
Yb	-0,23	срх	Th	-0,27	matrix
Mn	-0,23	срх	SiO <sub>2</sub>	-0,27	matrix
Cu	-0,23	срх	Rb	-0,26	matrix
V	-0,23	срх	Cs	-0,25	matrix
Co	-0,23	срх	La	-0,21	
Zn	-0,23	срх	Ce	-0,19	
Cr	-0,22		Hf	-0,19	
Ti	-0,22		Tb	-0,16	
Lu	-0,21		Zr	-0,14	
MgO	-0,21		Li	-0,14	
Ni	-0,21		Lu	-0,12	
Tb	-0,20		K <sub>2</sub> O	-0,12	
Sc	-0,19		Yb	-0,11	
Ce	-0,18		Na <sub>2</sub> O	-0,10	
Hf	-0,17		Ti	-0,05	
La	-0,16		Ba	-0,03	
Zr	-0,13		Sm	-0,01	
Cs	-0,12		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	
CaO	-0,10		Zn	0,04	
Ta	-0,10		FeO	0,09	
Th	-0,09		Mn	0,10	
Pb	-0,08		V	0,11	
Eu	-0,05		Sr	0,13	
Li	-0,03		Cu	0,13	
Rb	-0,03		Co	0,14	
Ba	0,01		Cr	0,15	
SiO <sub>2</sub>	0,04		MgO	0,17	
K <sub>2</sub> O	0,07		Ni	0,19	
Sr	0,14		Sc	0,19	
Na <sub>2</sub> O	0,18	pl	Eu	0,23	pl, san, срх
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,21	pl, san	CaO	0,26	срх, pl

някой порфири, главно амфиболът, но с  $K_d$  малко над 1). Първият ГК корелира отрицателно с фемифилните елементи, концентрирани главно в магнетита, който има също  $K_d > 10$  (както и във фемичните минерали, но с  $K_d$  също малко над 1). Поради това, че I ГК противопоставя апатита (в положителната част на неговия вектор — фиг. 2) на магнетита (в отрицателната част на вектора) той е наречен *апатит-магнетитов*.

Вторият ГК противопоставя също апатита, но на фелдшпатите (с отрицателни стойности на концентрираните в тях елементи, имащи  $K_d > 1$ ), т. е. той е *апатит-фелдшпатов*. Фемичните минерали имат близки до нулата стойности на двата ГК поради много по-ниските  $K_d$  (макар и над единица) спрямо тези на апатита и магнетита.

При втората извадка (табл. 4) се избягва



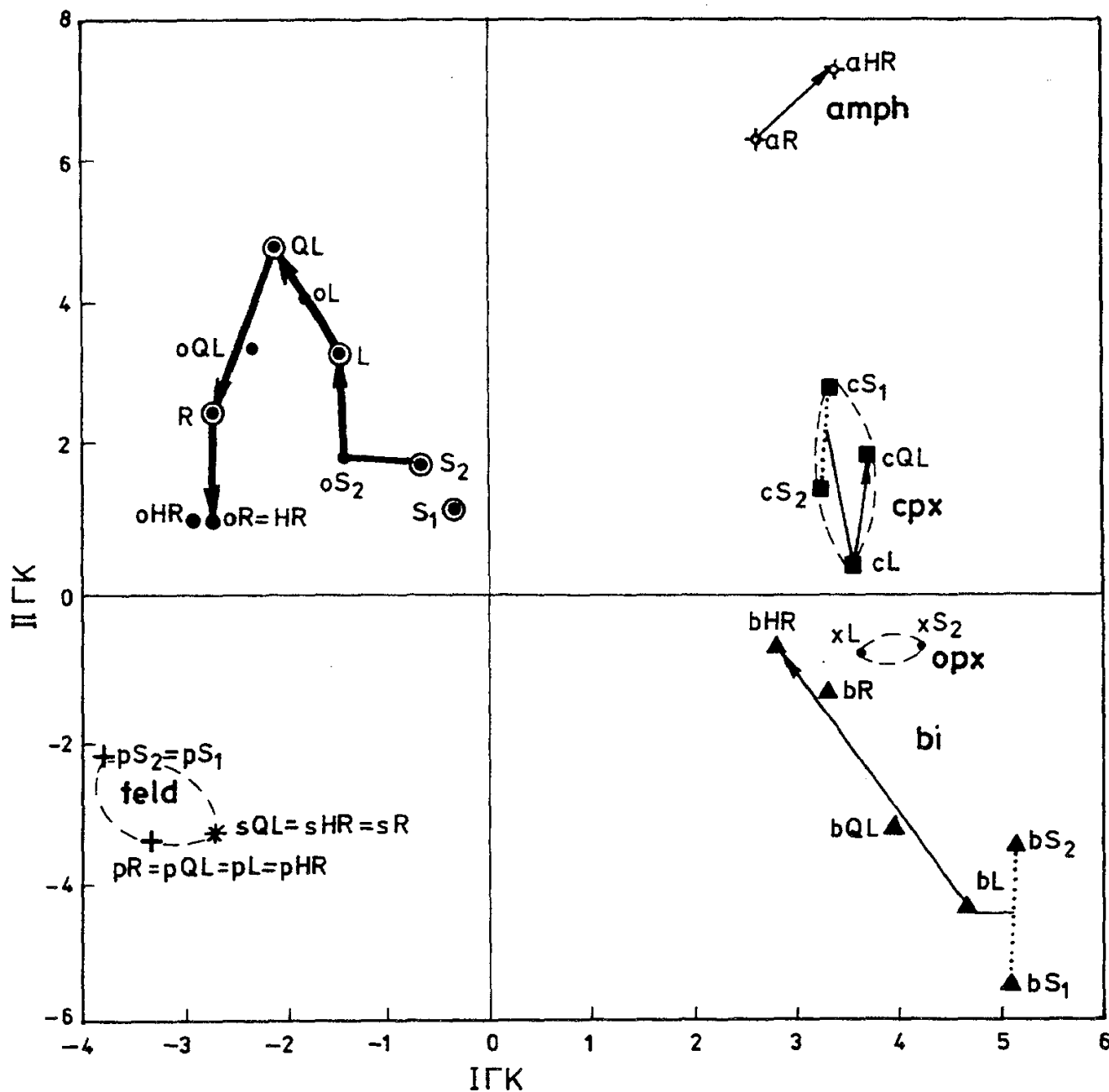
Фиг. 2. Разпределение върху равнината на I и II главен компонент на фигуративните точки на изследваните вулканисти ( $S_1$ ,  $S_2$ , L, LQ, R, HR — виж фиг. 1), основната им маса (с буквата “o” пред обозначенията на вулканистите) и всички изследвани минерали (a - амфибол, ap - апатит, b - биотит, c - клинопироксен, m - магнетит, p - плагиоклаз, s - санидин, x - ортопироксен), общо 45 обекта. С пунктир е посочен тренда на състава на апатита и магнетита

Fig. 2. Plot of the I and II principal component with points of the volcanic rocks studied ( $S_1$ ,  $S_2$ , L, LQ, R, HR — see Fig. 1), their groundmass (with letter “o”) and all studied minerals (a - amphibole, ap - apatite, b - biotite, c - clinopyroxene, m - magnetite, p - plagioclase, s - sanidine, x - orthopyroxene), total 45 objects. The dotted lines indicate the trends of the apatite and magnetite



доминиращото влияние на апатита и магнетита с техните изключително високи  $K_d$ . При нея се разглеждат само порфирните минерали (пироксени, биотит, амфибол и фелдшпати). Първият ГК тук корелира положително с елементите, концентрирани в плагиоклаза и отрицателно - във всички фемични минерали. Ето защо този ГК е наречен *салично - фемичен*. Това се вижда и от фиг. 3: фемичните минерали са разположени в отрицателната част на вектора на I

ГК, а фелдшпатите — в положителната. Вторият ГК противопоставя елементите, концентрирани главно в амфибола (в средните по състав безамфиболови вулканити съответно в основната маса) на тези, съсредоточени във фелдшпатите и биотита (единствено Ва се концентрира и в амфибола). Ето защо II ГК е наречен *матрикс - биотит-фелдшпатов* (т. е. *матрикс - порфирен*) или за киселите вулканити *амфибол - биотит-фелдшпатов*. Фигура-



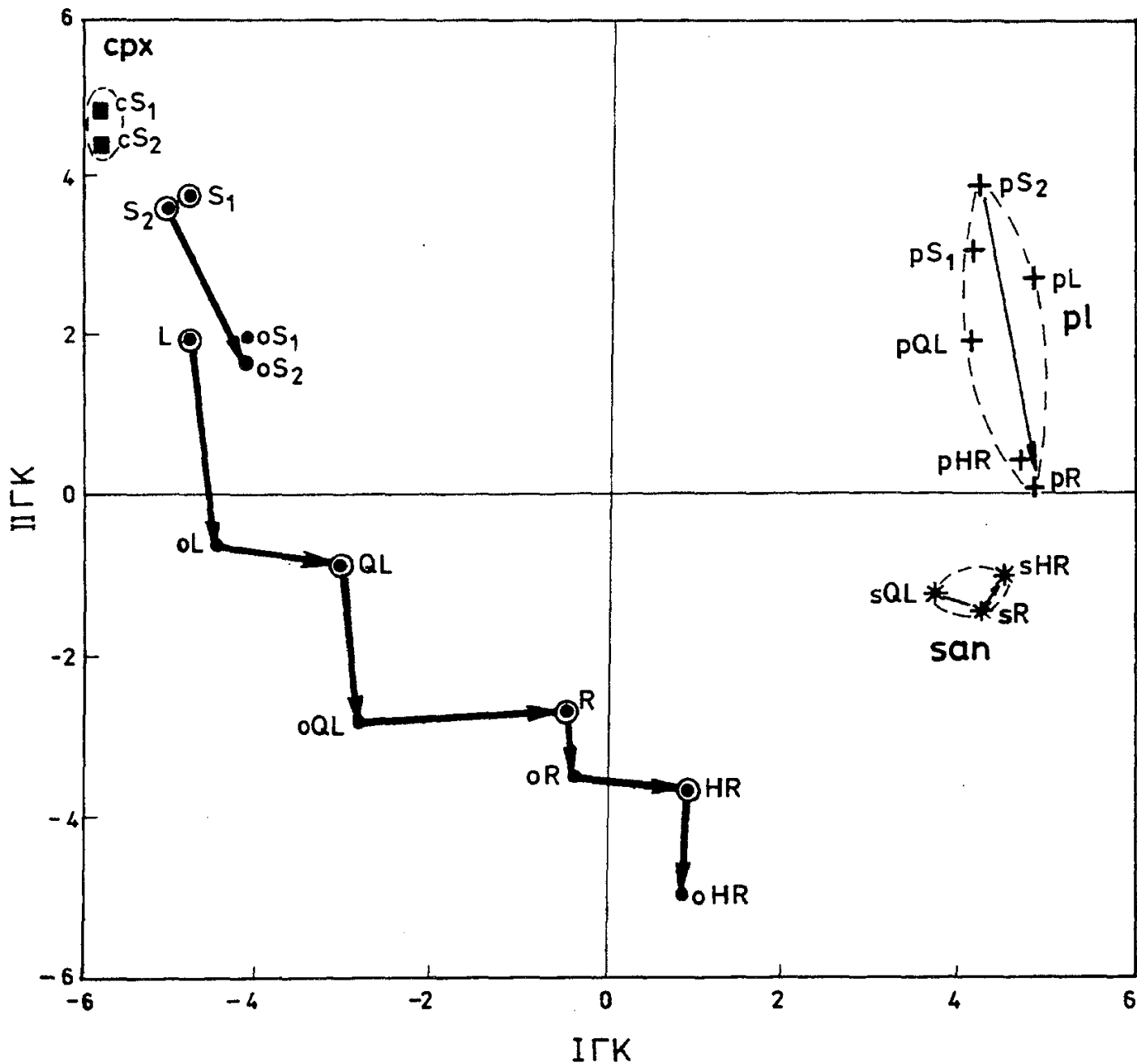
Фиг. 3. Разпределение върху равнината на I и II главен компонент на фигуративните точки на вулканитите, основната им маса и порфирите (за буквените обозначения виж фиг. 1 и 2), общо 36 обекта. С тънки линии е посочен тренда на състава на порфирните минерали, с дебела линия — тренда на вулканитите и основната им маса

Fig. 3. Plot of the I and II principal component with points of the volcanic rocks studied, their groundmass and phenocrysts (symbols as in Fig. 1 and 2), total 36 objects. The fine lines indicate the trends of the minerals, and the solid one the trend of the volcanics and their groundmass

тивните точки на пироксените са разположени близо до нулевите стойности на ГК.

Изследването на третата извадка (табл. 5) представлява детайлизиране на втората, като в нея са включени само минералите, които са в количество > 10% (клинопироксенът в шохонитите и фелдшпатите). И двата ГК по същество имат същия характер като във втората извадка и запазват името си: *салично - фемичен* на I ГК и *матрикс - порфирен* на II. И наистина II ГК положително корелира с

елементите, натрупващи се в разглежданите тук порфири (клинопироксен и фелдшпати). Той корелира отрицателно с тези, които се концентрират в основната маса, поради това, че амфиболът не е включен в изследването. Ето защо на фиг. 4 в отрицателната част на вектора на II ГК се разполагат фигуративните точки само на скалите и основната им маса (тези на санидина са много близко до нулевата стойност).



Фиг. 4. Разпределение върху равнината на I и II главен компонент на фигуративните точки на вулканитите, основната им маса и част от порфирите: клинопироксена в шохонитите и фелдшпатите (за буквените обозначения виж фиг. 1 и 2), общо 24 обекта. С тънки линии е посочен тренда на състава на порфирните минерали, с дебела линия — тренда на вулканитите и основната им маса

Fig. 4. Plot of the I and II principal component with the points of the volcanic rocks studied, their groundmass and some phenocrysts: clinopyroxenes in shoshonites and feldspars (symbols as in Fig. 1 and 2), total 24 objects. The fine lines indicate the trends of the minerals, and the solid one the trend of the volcanics and their groundmass

## Генетично тълкуване на главните компоненти

Както беше посочено по-горе в изследваните ГК химическите елементи със значими нетривиални стойности имат  $K_d > 1$ , т.е. тези елементи се концентрират в една или повече минерални фази. От това следва, че отстраняването на тези минерали ще доведе до изменение на съдържанието на дадени елементи в остатъчната топилка (обедняване или обогатяване) и съответното увеличение или намаление стойността на ГК на основната маса по отношение на това на съответните вулкани (съобразно знака на стойността на елемента в ГК). Ето защо и двата ГК могат да се интерпретират като отразяващи кристализационната диференциация, вероятно два нейни етапа.

При първата извадка (фиг. 2) акцесорите магнетит и апатит "подтискат" ролята на повечето порфирни минерали. Фигуративните точки на последните, както и тези на основната маса и вулканите са трудно отличими по стойностите на ГК за да могат да бъдат интерпретирани в генетичен смисъл.

При втората извадка, когато се разглеждат само порфирните минерали (фиг. 3) се вижда, че шошонитите, латитите, кварцлатитите, ниско-Si риолити и съответната им основна маса (отговаряща на остатъчната топилка) са с прогресивно намаляващи стойности на салично-фемичния I ГК. Като се има предвид, че той положително корелира с елементите, концентрирани в плагиоклаза кристализацията и отстраняването му от топилката ще доведе до намаляване стойностите на този ГК, т.е. до стойностите на основната маса. От фигурата се вижда, че стойността на I ГК за латита е същата като тази на основната маса на шошонита. Тъй като не може да се предположи, че при шошонитите няма кристализация и фракциониране на плагиоклази най-вероятно латитите не са произлезли от тази шошонитова топилка. При риолитите също се наблюдават еднакви стойности на I ГК на вулканите и основната им маса, което тук се дължи на голямото участие на санидина във фракционния процес (стойността на I ГК на последния, с отрицателен знак, е по-

малка от тази на плагиоклаза).

Вторият ГК има нарастващи стойности в редицата шошонитова основна маса - латит - латитова основна маса - кварцлатит и намаляващи — в редицата кварцлатит - кварцлатитова основна маса - ниско-Si риолит - риолитова основна маса (последната съвпада с високо-Si риолит). Този ГК корелира положително с елементите, концентриращи се в основната маса (във вулканите, при които още не е започнала кристализация на амфибол) и отрицателно с елементите, концентриращите се в биотита и фелдшпатите. Кристализацията и отстраняването на последните ще доведе до обогатяване на основната маса с елементите, корелиращи положително с II ГК (главно редкоземните елементи) и съответно до нарастване на стойностите на ГК. Това не важи за шошонитите, които имат равни стойности с тези на основната маса. В кварцлатитите (всъщност дацити) обаче започва кристализация на амфибол (поради малкото му количество в тази скала той е анализиран само в риолитите). Елементите, корелиращи положително с II ГК се концентрират в него, а не в основната маса. Отстраняването на амфибола ще доведе до намаление на стойностите на II ГК. Наблюдаваната инфлексна точка на линията, съединяваща фигуративните точки на вулканите и техната основна маса (фиг. 3) се дължи на появата и фракционирането на амфибол в кварцлатитите и по-киселите от него скали. Рязкото изменение на характера на фракциониращите се минерали при образуването на киселите скали се изтъква от Daieva, Marchev (1986), но те сочат други минерали. При най-киселите членове на серията обаче фигуративните точки на вулканите и основната им маса се припокриват, което налага детайлизиране чрез изследване на третата извадка.

Линията, съединяваща фигуративните точки на латита и кварцлатита е успоредна на тренда на фигуративните точки на биотита, отразяващ изменението на състава му в различните вулкани. Следователно еволюцията на химизма на този минерал най-добре описва изменението на химическия състав при тези вулкани. След

инфлексната точка фигуративните точки на кварцлатита и ниско-Si риолит са подредени в линия, подобна на тази на амфибола, който явно най-добре описва еволюцията на вулканитите от тази част на серията.

При третата извадка (фиг. 4) повечето фемични минерали не са включени в матрицата, но ГК имат практически същия характер. Разположението на фигуративните точки на вулканитите и основната им маса обаче позволява да се интерпретира реда на кристализация и фракциониране, което не беше възможно в предишната извадка. Първият ГК нараства от побазичните (с изключение на шошонитите) към по-киселите вулканити. Стойностите на основната маса на дадена вулканска скала обаче е еднаква с тази на самата скала. Като се има предвид, че този ГК корелира отрицателно с всички елементи, концентриращи се в пироксените, тяхната кристализация във вече образуваната остатъчна топилка (тук представена като основна маса) и отстраняването им ще доведе до увеличение на стойностите на I ГК, т. е. до стойностите на по-киселите вулканити. Само стойността на шошонитовата основна маса е по-голяма от тази на латита. Тъй като е трудно да се предположи, че в шошонитовата топилка няма фракциониране на пироксени отново се вижда (както и в предишната извадка), че латитите вероятно не са произлезли от тази топилка. В риолитите обаче не кристализира пироксен и неговата "роля" вероятно се поема от санидина — трендът на последния в общи линии отговаря на вектора, съединяващ фигуративните точки на основната маса и вулканитите.

Вторият ГК намалява от шошонитите до високо-Si риолити (фиг. 4), но тук стойността на основната маса на побазичната скала е еднаква с тази на следващата в редицата по-кисела скала. Поради това, че ГК корелира положително с елементите, концентриращи се главно във фелдшпатите, тяхната кристализация и отстраняване ще доведе до повишаване концентрацията на останалите елементи в основаната маса. Тъй като тези елементи имат отрицателни стойности това води до

намаление стойността и на ГК. Линията, съединяваща фигуративните точки на вулканитите и на основната им маса е паралелна на линията на плагиоклазите. Ето защо може да се предположи, че II ГК отразява кристализацията и фракциониранието главно на плагиоклазите, което води до образуването на остатъчната топилка, т. е. на основната маса. Ролята на K-фелдшпат не може да бъде напълно оценена, тъй като неговият състав не се изменя съществено. От друга страна той концентрира същите елементи като плагиоклаза. Само стойността на  $K_d$  на Ba в K-фелдшпати е значително по-висок от този в плагиоклазите (Караджов, Караджова, 1998).

## Заклучение

Методът на главните компоненти дава възможност да се изследва едновременно поведението на всички макро- и микрокомпоненти при еволюцията на една магмена серия за разлика от широко използваните в петрология двуелементни Харкерови диаграми (напр. фиг. 1). За Боровишката шошонитова серия това изследване позволи да се направят следните изводи:

1. Подтвърждава се, че основният процес, който води до формирането на серията е кристализационната диференциация. Тя обяснява над 70% от вариациите в химизма на серията и на съставлящите я минерали. Същото доказват и Sr изотопи, чието начално отношение за скалите на Боровишката серия е много близко (Marchev et al., 1987; Yanev et al., 1998).

2. Основните порфирни минерали, чието фракциониране оказва най-голямо влияние за образуването на кварцлатитите от латитите са плагиоклазът, биотитът и пироксенът, а в редицата кварцлатити-ниско- и високо-Si риолит - амфиболът и плагиоклазът. Това се различава от мнението на Marchev et al. (1987), които открояват ролята на амфибола едва при образуването на високо-Si риолити. С това изследване обаче ролята на K-фелдшпат не може да бъде оценена напълно.

3. Предполага се, че кристализационната диференциация е двуетапна: отначало кристализира плагиоклазът, чието фракционирание води до топилки със състав на основната маса; в тези топилки кристализират пироксен и другите фемични минерали, чието фракционирание пък води до образуване на съответната по-кисела скала. Това по-ранно кристализиране на плагиоклаза е характерно за водоненаситени магми (Naney, 1983).

4. Съпоставката на стойностите на I ГК на Кадънските и Безводненските шошонити с тези на Бездивенските латити (фиг. 3 и 4) сочи, че последните не са произлезли от шошонитите, както счита Марчев (1985). Това потвърждава геоложките наблюдения, според които тези вулканити принадлежат на две редици (ако се разгледа мястото им в цялостната еволюция на магматизма на Боровишката калдера — Иванов, 1972; Янев, 1990). Те се намират в суперпозиционно положение (според съществуващите данни са с различна геохронологичка възраст) и имат различен ход на диференциация. Кадънските и Безводненските шошонити са приабонски (Иванов, 1972; Lilov et al., 1987) и са част от една антидромна редица (латити → шошонити → абсарокити). Бездивенските латити са част от една ранноолигоценска хомодромна редица (латити и малко шошонити → кварцлатити, т. е. дацити → ниско-Si риолити → високо-Si риолити). *Благодарности.* Авторите изказват своята благодарност на служителите на Геологическия институт: ст. н. с. А. Андреев за адаптирането и предоставяне на програмата PCAWD и за ценните критически забележки към методическата част на работата, както и на Ц. Милутинова и Н. Кръстева за начертаване на фигурите.

## Литература

- Андреев, А. П. 1991. *Многомерен анализ на геоложки системи.* Автореферат кандидат. дисерт., ГИ БАН, 34 с.
- Иванов, Р. 1963. Магматизмът в Източнородопското палеогенско понижение. II-Петрохимическо развитие и провинциални особености. - *Труд. геол. Бълг., Сер. геохим., минер. и петрогр.*, 4, 297-323.
- Иванов, Р. 1972. Вулкано-тектонски структури в Боровишкото понижение. - *Изв. Геол. инст., Сер. геохим., минер. и петрогр.*, 21, 193-210.
- Иванов, Р., Ц. Стоянова. 1966. Разсеяни елементи в Източнородопските вулкански серии. - *Труд. геол. Бълг., Сер. геохим., минер. и петрогр.*, 6, 83-102.
- Караджов, М. 1996. *Рентгено-флуоресцентни методи в геохимията на редките и разсеяни елементи.* Автореферат кандидат. дисерт., ГИ БАН, 32 с.
- Караджов, М., А. Андреев. 1998. Изчисление на количествата на минералите и общите коефициенти на разпределение в скалите от Боровишкия вулкански район, Източни Родопи. - *Геохим., минерал. и петрол.*, 33, 99-111.
- Караджов, М., И. Караджова. 1998. Коефициенти на разпределение минерал/основна маса на елементи-следи в Боровишката вулканска серия. - *Геохим., минерал. и петрол.*, 33, 91-98.
- Марчев, П. 1985. *Петрология на палеогенските вулканити в района на селата Безводно и Русалско, Кърджалийско.* Автореферат кандидат. дисерт. Соф. Унив., 26 с.
- Янев, Й. 1990. *Киселият вулканизъм на Боровишката калдера и неговата рамка.* Хабилит. труд, ГИ БАН, 170 с.
- Daieva, L. I., P. G. Marchev. 1986. REE in Borovitsa Eo-Oligocene shoshonitic series. - *C. R. Acad. bulg. Sci.*, 39, 5, 79-81.
- Jolliffe I. T. 1986. *Principal Components Analysis.* New York, Springer, 271 p.
- Le Maitre R.W. 1982. *Numerical Petrology.* Amsterdam, Elsevier, 281 p.
- Le Maitre, R. W. (ed.). 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms.* Recommendations of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Oxford, Blackwell, 193 p.
- Lilov, P., Y. Yanev, P. Marchev. 1987. K/Ar dating of the Eastern Rhodope Paleogene magmatism. - *Geologica Balc.*, 17, 5, 49-58.
- Massart D.L., L. Kaufman. 1983. *The Interpretation of Analytical Chemical Data by Use of the Cluster Analysis.* New York, Wiley, 237 p.
- Marchev, P., A. Андреев, P. Lilov, M. Popov, L. Daieva. 1987. Petrogenesis of the Oligocene silicic lavas from Borovitsa volcanic area, SE Bulgaria: Inferences from major and trace element and Sr-O isotopic geochemistry. - *Intern. Symp. Petrogenesis and Mineralization of Granitoides. Abstracts.* Guangzhou, China, 216-218.
- Naney, M. T. 1983. Phase equilibria of rock-forming ferromagnesian silicates in granitic systems. — *Am. J. Sci.*, 283, 993-1013.

Rock, N. M. S. 1988. *Numerical Geology*. Berlin, Springer, 427 p.

Yanev, Y., F. Innocenti, P. Manetti, G. Serri. 1998. Upper Eocene-Oligocene collision-related volcanism in Eastern Rhodopes (Bulgaria)-Western Thrace

(Greece): Petrogenetic affinity and geodynamic significance. - *Tertiary Magmatism of the Rhodopian Region. Acta Vulcanol.*, **10**, 2, 279-291.

*Приета на 26.10.1998 г.*

*Accepted October, 26, 1998*