



Role of magma mixing in the petrogenesis of the volcanic rocks from Zvezdel palaeovolcano

Raya Raicheva, Peter Marchev

Geological Institute, BAS, Acad. G. Bonchev str., 1113 Sofia, Bulgaria; E-mail: raya@geology.bas.bg

Key words: Eastern Rhodopes, Zvezdel paleovolcano, magma mixing, mingling

Abstract. Magma mixing is an important process in the genesis of the Rhodopian Paleogene volcanism (Marchev et al., 1994; Raicheva et al., 2001; Raicheva, Marchev, 2003). This research provides petrographic evidence for mixing and mingling processes in the eastern part of the Zvezdel volcano.

Zvezdel paleovolcano is located in the Eastern Rhodope volcanic area, which represents a part of the Macedonian-Rhodope-North Aegean volcanic zone (Harkovska et al., 1989). It is considered as a typical stratovolcano (Nedialkov, Pe-Piper, 1998; Yanev et al., 1998) with parasitic and satellite volcanic vents and domes. However the presence of many dikes in the region, some of which were feeder channels for lava flows (Harkovska et al., 1998a; Московски и др., 1990), suggests that Zvezdel could be classified as a shield volcano, rather than a typical stratovolcano.

The volcanic structure is composed of lava flows intercalating with epiclastic rocks, domes and dykes. The volcanic rocks fall in the fields of high-K calc-alkaline series with subordinate calc-alkaline and shoshonite varieties ranging from basalts to andesites. Trace element spiderdiagrams rocks show typical shape for calc-alkaline orogenic rocks. The central part of the volcano is intruded by a comagmatic differentiated intrusive body of gabbroic to granosyenitic composition.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dates from two pyroclastic flows, which underlie and overlie the volcanic sequence, dated at 32.16 ± 0.30 and 31.13 ± 0.06 Ma respectively, constrain the time span of volcanism to approximately 1 Ma (Singer, Marchev, 2000; Moskovski et al., 2004; Georgiev, Marchev, 2005).

Mixing and mingling phenomena of the volcanic rocks from eastern part of Zvezdel involve mag-

matic inclusions, banded lavas and disequilibrium phenocryst associations.

The magmatic inclusions are hosted by biotite-amphibole andesite with $\text{SiO}_2 \sim 62$ wt.%. The enclaves show many of the textural criteria such as ellipsoidal shape, quenched margins, vesicles described by Bacon (1986) and Bacon and Metz (1984) for recognizing undercooled blobs of mafic magma. They have variable contents of SiO_2 and other major elements. Nevertheless, their minor element contents are rather constant and similar to the trace element composition of the basaltic andesites. We suppose that the primary composition of the inclusions was modified by transfer of phenocrysts from one magma to another; volatile transfer to the inclusions with chemical exchange; filling of the inclusion vesicles with chalcedony or agates during /after the formation of the inclusions.

Banded lavas show light and dark bands with different composition and quantity of phenocrysts.

Petrographically the magma mixing events are recognized by the appearance in the same sample of clear, sieved textured plagioclases with both normal and reverse zonations; normal and reverse zoned (with resorbed cores) clinopyroxenes with differing core compositions; resorbed orthopyroxenes with high-Mg clinopyroxene mantles; plagioclase and clinopyroxene microlites with unusually high An and Mg# content respectively.

The chemical and mineral compositions of the studied lavas suggest at least two mixing events. The initial mixing occurs between biotite-amphibole andesites and mafic magma. After a comparatively quiet period, with fractionation to dacitic composition, a new injection of basic magma caused extrusion of mixed andesites and basaltic andesites.

Роля на смесването на магми в петрогенезиса на вулканските скали от Звезделския палеовулкан

Рая Райчева, Петър Марчев

Въведение

Смесването на магми е процес с доказано важна роля за петрогенезиса на палеогенската магматична активност в Източните Родопи (Marchev et al., 1994; Raicheva et al., 2001; Raicheva, Marchev, 2003). В настоящата публикация ние привеждаме нови данни за петрографския и петрохимичен състав на Звезделския палеовулкан, като специално акцентираме на ролята на смесването на магмите за петрографското разнообразие на лавите във вулкана.

Геоложка обстановка

Звезделският палеовулкан е разположен в Източнородопския вулкански район, който е част от Македоно-родопската-североегейска вулканска зона (Harkovska et al., 1989). Вулканът се счита от редица автори за типична стратовулканска постройка, с множество сателитни и паразитни вулкански гърла (Недялков, 1986; Nedialkov, Pe-Piper, 1998; Yanev et al., 1998). Наличието на множество дайкови снопове в района, обаче, служещи за подводящи канали на лавовите потоци (Harkovska et al., 1998a; Московски и др., 1990), предполага, че Звездел е по-скоро щитовиден, отколкото типичен стратовулкан. Вулканската постройка е изградена от лавови потоци, които се проследяват от епикластити и внедрените сред тях куполи и дайки. Най-старите лави лежат върху киселите пирокластити на т.н хоризонт на втори кисел вулканизъм (Иванов, 1960), а най-късните лави са покрити от Равенските пирокластити. Вулканските скали имат базалтов, андезитов до дацитов състав. В централната част на вулкана е внедрена комагматична диференцирана интрузия с габроиден до граносиенитов състав (Nedialkov, Pe-Piper, 1998).

Съществуващите данни за абсолютна възраст на Звезделския палеовулкан са доста противоречиви. Кунов и др. (2000) отделят в района на Обичник по-стара вулканска дейност — Палеозвездел, на базата на една K-Ar възраст от $34,48 \pm 1,87$ млн. г. От друга страна Harkovska et al. (1998b) определят със същия метод възрастта на андезитобазалти от източната част на вулкана на $28,4 \pm 0,9$ и $27,7 \pm 0,9$ млн. г. По-новите и прецизни $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датировки на пирокластичните потоци, които постилат и покриват Звезделските вулканици дават съответно $32,16 \pm 0,30$ и $31,13 \pm 0,06$ млн. г. (Moskovski et al., 2004; Singer, Marchev, 2000; Georgiev, Marchev, 2005), което свидетелства

за значително по-кратък живот на вулкана, около 1 млн. години.

Образците за настоящото изследване са взети предимно от източната периферия на вулкана, където се разкриват всички вулкански разновидности (от базалти до андезити) и се наблюдава цялата гама от скали, формирани при процеса на смесване. В стратиграфията на вулканската постройка базалтите заемат най-високите стратиграфски нива, а андезитите се разкриват на 2—3 нива.

Химичен състав

Преобладаващата част от анализираниите вулкански скали имат висококалийев калциевоалкален химизъм, но отделни образци показват калциевоалкален и шошонитов характер, като повишаването на K е характерно за по-късните потоци. Мултиелементните диаграми на елементите следи показват характерни профили на скали, генерирани в субдукционна обстановка — с Nb-Ta минимум и повишено съдържание на LILE. Хондрит-нормираните редкоземните елементи се характеризират с обогатяване на LREE спрямо HREE, отношение $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 6\text{—}11$ и отчетлива Eu^* аномалия (0,66—0,86). Началните отношения на Sr и Nd изотопи в изследваните скали варират между 0,70713—0,70736 и 0,51235—0,51244 и попадат в полето на стойностите на орогенните терциерни скали от българската част на Източните Родопи.

Петрография на смесените скали

Лавите от горните стратиграфски нива на Звезделския вулкан показват характерни особености на минглинг и смесване, които включват: 1) закалени мафични магмени включения; 2) ивичести минглинг структури и 3) неравновесни фенокристални асоциации.

Магмените включения са вместили в амфибол-биотитов андезит със съдържание на $\text{SiO}_2 \sim 62$ wt.%. Те имат елипсоидна или сферична форма с размери до 10x15 см. Изградени са от порфири от плагиоклаз, клинопироксен, променен оливин и титаномagnetит и ксенокристали от ортопироксен и биотит. Основната маса се състои от микролити от плагиоклаз, пироксен и руден минерал. Често пироксеновите микролити са силно удължени, а плагиоклазовите показват структура тип „лястовича опашка“ което свидетелства за бърз растеж. Това се потвърждава

и от закалените, понякога ситно назъбени контакти и миндални празнини, типични за преохладени течни капки от мафична магма (Васон, 1986; Васон, Metz 1984). Включенията имат твърде вариращи концентрации на някои главни елементи като SiO_2 (55,5 – 67 т.%), Al_2O_3 (13,7 – 17,2 т.%), FeO_1 (4,8 – 7,5), MgO (1,6 – 4,2), CaO (5,6 – 7,3), но доста постоянни съдържания на Ti, Na, K и P, както и на редица елементи-следи (Sc, V, Cr, Zr, Th, U, Sr), близки до тези на андезитобазалтите от Звездел. Вероятно първичният им състав е бил модифициран в резултат на различни процеси: трансфер на фенокристали и летливи компоненти между двете магми по време на смесването и запълването на миндалните празнини с халцедон по време или след изстиването на топилките.

Ивичестите минглинг структури са представени най-добре в един андезитобазалтов поток от района на вр. Узунбурун. Микросондовите анализи на различните ивици показват съществени различия в техния химизъм: тъмни ивици с около 58 т.% SiO_2 и светли – с 68 т.% SiO_2 . Наред с това светлите и тъмни ивици се характеризират с различно количество порфирни фази.

Смесените (хибридни) скали са със състав от базалти до андезити. Всички вулкански разновидности съдържат порфири от плагиоклаз, клинопироксен, ортопироксен и титаномангнетит. В базалтите и някои андезитобазалти понякога присъства оливин (често напълно променен), а за ранните андезити са характерни биотитът и амфиболът. Акцесорни минерали са апатит, титаномангнетит и циркон, който се появява в андезитите. В някои андезити и андезитобазалти се наблюдават магматични сулфиди.

Неравновесните порфирни асоциации се изразяват в присъствие в един и същи образец на нормалнозонални и обратнотонални порфири от плагиоклаз и клинопироксен с различен химичен състав; резорбирани Fe ортопироксени, обвити с ивица от богат на Mg клинопироксен; разнообразие в състава плагиоклазови и клинопироксенови микролити и наличие на резорбирани и опациитизирани единични кристали от амфибол в андезитобазалтите.

В хибридните скали отчетливо се открояват две генерации плагиоклаз. Първата е със състав на централните части An_{78-92} и нормалнозонална мантия. Съставите на ядрата в тях са в рав-

новесие с базалтов до андезитобазалтов състав на топилката. Втората генерация плагиоклази има ядра със състав An_{50-65} , които са в равновесие с андезити и обратнотонална ситовидна мантия която достига до An_{85} .

Клинопироксеновите кристали също оформят две различни по състав генерации. Първата, характерна за множество потоци, е нормално-зонална с богати на Mg ядра – Mg\# 77-84 (Wo_{43-44} En_{43-47}) и вариращ състав на външната ивица в различните потоци. Втората генерация се състои от обратнотонални порфири с централни части с по-железист състав (Mg\# 63-74 ; Wo_{36-43} En_{39-45}) и външни ивици, които понякога достигат състава на ядрата от първата генерация. Често ядрата на втората генерация са кородирани и с неравни очертания. Най-железистите състави на клинопироксени (Mg\# 63-66) са характерни за последните потоци и не са в равновесие с нито една от изследваните лави.

Дискусия и заключения

Текстурните характеристики, химичният състав и детайлните минераложки изследвания на лавите и включенията в Звезделския вулкан предоставят информация за механизма и характера на смесване на магмите в недълбока магмена камера. Предполагаме, че смесването и фракционирането в магмените камери е протичало едновременно като редуването на андезитобазалти с андезити свидетелства, че приток на базична магма се е осъществявал неколкократно. Появата на най-железистите клинопироксени в най-късните лавови потоци подсказва за смесване с още по-еволюирали (дацитови) състави, които не се разкриват в източната част на вулкана.

Процесът на смесване започва между голям обем фракционирани биотит-амфиболови андезити с по-малък обем базалти до андезитобазалти, което води до формирането на магматични включения в андезитите. Нарастващят приток на базичния краен член в камерата довежда до механична хибридизация на магмата и формиране на хомогенна андезитобазалтова магма, която се излива на повърхността. След период на спокойна кристализация се стига до още по-кисел състав на камерата, последван от нов приток на базична магма и ерупция на хибридни андезити и андезитобазалти.

Литература

- Иванов, Р. 1960. Магматизмът в Източнородопското палеогенско понижение. Част I – Геология. – *Труд. Геол. Б-я, сер. геохим. и пол. изкоп.*, 1, 311–384.
- Кунов, А., И. Велинов, Й. Янев, Р. Наков, Н. Стефанов, З. Печкай. 2000. Епитермалното златно находище „Обичник“ – Източни Родопи. – *Минно дело и геология*, 2, 28–35

- Московски, Ст., А. Харковска, П. Марчев, С. Джуранов, П. Лилов. 1990. Отчет по тема № 16604-К, зад. 2 “Стратиграфски, петроложки и структурно-вулканоложки изследвания в района на Дамбалшкия вулкански масив”. – *Геофонд, НИС – СУ*, 147 с.

- Недялков, Р. 1986. *Фациално-формационный анализ магматических образований Звездел-Пчелядского рудного поля и их потенциальная рудоносность*. М., МГРИ, Автореферат, 19 стр.

- Bacon, C. 1986. Magmatic inclusions in silicic and intermediate volcanic rocks. — *J. Geophys. Res.* 91, B6, 6091–6112.
- Bacon, C., J. Metz. 1984. Magmatic inclusions in the rhyolites, contaminated basalts, and compositional zonation beneath the Coso volcanic field, California. — *Contrib. Mineral. Petrol.*, 85, 346–365.
- Georgiev, S., P. Marchev. 2005. Oligocene pyroclastic rocks and a petrified forest in the Nanovitsa depression. — *Geochem., Mineral., Petrol.* 42, 47–65.
- Harkovska, A., Y. Yanev, P. Marchev. 1989. General features of the Paleogene orogenic magmatism in Bulgaria. — *Geologica Balc.* 19, 1, 37–72.
- Harkovska, A., Z. Pecskey, P. Marchev, M. Popov. 1998a. How old the acidic dykes of the Zvezdel swarm (Eastern Rhodopes, Bulgaria) are? — *Geologica Balc.*, 28, 1–2, 69–70.
- Harkovska, A., G. Pe-Piper, K. Stoykova, R. Nedyalkov, S. Moskovski. 1998b. Late Oligocene (Early Chatian) epiclastics and lava bodies of intermediate composition from the Eastern Rhodopes (Bulgaria). — *C. R. Acad. bulg. Sci.*, 51, 7–8, 53–56.
- Marchev P., R. Raicheva, P. Larson. 1994. Magma mixing in a collisional setting: preliminary data from the Tertiary volcanism in the Eastern Rhodope mountains, Bulgaria. — *C. R. Acad. bulg. Sci.*, 47, 3, 63–66.
- Moskovski, S., V. Karloukovski, Z. Milakovska, A. Harkovska, M. Pringle. 2004. Lithological and magnetostratigraphic correlation of Paleogene sections from the Eastern Rhodopes (SE Bulgaria). — *Geol. Carpatica*, 55, 3, 251–260.
- Nedialkov, R., G. Pe-Piper. 1998. Petrology of the volcanism in the southeastern part of the Momchilgrad-Arda volcanic region, southeastern Bulgaria. — *Acta Vulcanologica*, 10, 2, 243–254.
- Raicheva R., P. Marchev, O. Vaselli. 2001. Mixed and mingled lavas at lower oligocene Madjarovo and Zvezdel volcanoes, Eastern Rhodopes (Bulgaria). — In: *Abstract volume, Romanian Journ Mineral Deposits. ABCD –GEODE 2001 workshop*, Vata Bai, Romania, 8–12 June. 2001, 88–89.
- Raicheva, R., P. Marchev. 2003. Compositional and textural evidence for magma mixing in the late stage evolution of the Zvezdel paleovolcano, SE Rhodopes, Bulgaria. — In: *Abstracts. Final GEODE-ABCD (2003) workshop*, Seggau, Austria, 47–48.
- Singer, B., P. Marchev. 2000. Temporal evolution of arc magmatism and hydrothermal activity, including epithermal gold veins, Borovitsa caldera, southern Bulgaria. — *Econ. Geol.* 95, 1155–1164.
- 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. — *Acta Vulcanologica*, 10, 2, 279–291.