

Геол. ан. Балк. полуос. Ann. Geol. Penins. Balk.	63 (1999)	165–182	Београд, децембар 2000 Belgrade, Decembre 2000
---	-----------	---------	---

UDC (УДК) 552.08:54:552.32(497.11)

Original scientific paper  
Оригинални научни рад

## CHEMISTRY OF AMPHIBOLES AND GEOBAROMETRY OF INTERMEDIATE AND ACIDIC ROCKS OF SERBIA

by

Milenko Vukov\* and Vladimir Pavlov\*\*

Chemistry of Ca–amphiboles (Al<sup>I</sup>) and geobarometer pair Ca–amphibole/plagioclase (Al:Si) are used for determination of levels and pressures of consolidation of mainly young, Tertiary intermediate and acid calc–alkaline plutons within Inner Dinarides, the Vardar zone, and the Serbo–Macedonian massif. Geobarometry of granitic rocks are calculated according to the basis of crystallochemical composition of amphibole (Al<sup>IV</sup>, Na+K, A) and on the basis of mineral pair Am–Bt ( $\bar{X}K_2O$ ). Other igneous rocks, plutonic (gabbro–diorite, olivine–gabbro, gabbro–pegmatite, ultramafite) and holocrystalline volcanic, as well as metamorphosed igneous (metasyenite, amphibolite) rocks, and enclaves, for which are existing chemistry analyses of amphiboles (plagioclases and/or biotites), are presented also, for comparison.

**Key words:** geobarometry, intermediate and acidic rocks, chemistry, Ca–amphibole, biotite, plagioclase. Serbia.

На основу хемизма Са–амфибола (Al<sup>I</sup>) као и геобарометарског пара Са–амфибол/плагиоклас (Al:Si), одређени су нивои/притисци консолидације углавном младих – терцијарних интермедијарних и киселих калкоалкалних плутона Унутрашњих Динарида, Вардарске зоне и Српско–македонске масе. Анализирана је и геобарометрија гранитоидних стена преко кристалохемијског састава амфибола (Al<sup>IV</sup>, Na+K, А) и минералног пара Ам–Бт ( $\bar{X}K_2O$ ). Због корелације приказане су и друге плутонске (габродiorит, оливин–габро, габро–пегматит, ултрамафит), холокристаласте вулканске и метаморфисане (метасијенит, амфиболит) магматске стене, као и анклаве, за које постоје хемијске анализе амфибола (плагиокласа и/или биотита).

**Кључне речи:** геобарометрија, интермедијарне и киселе стене, хемизам, Са–амфибол, биотит, плагиоклас, Србија.

### INTRODUCTION

Genetic types (origin) and geotectonic conditions of magma genesis, as well as physical–chemical conditions of crystallisation with the age of minerals, represent, besides

\* University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, Djušina 7, 11000 Belgrade.

\*\* GI RAS, Staromonetny per. 35, 109017 Moscow, Russia.

Table 1. Chemical composition of amphibole and biotite from granitic rocks of Drenje, Kopaonik, Golija, and Zeljin.

Табела 1. Хемијски састав амфибола и биотита из гранитоидних стена Дрења, Копачника, Голије и Желјина.

	biotite (биотит)						amphibole (амфибол)					
	Dr	Kp			Gl	Ze	Kp			Gl	Ze	
		$\bar{z}$	z	pi	8	$\bar{s}$	$\bar{z}$	z	pi	8	$\bar{s}$	
SiO <sub>2</sub>	37.30	35.55	36.90	37.70	36.90	36.50	47.70	44.20	46.10	46.80	46.60	
TiO <sub>2</sub>	2.78	2.65	3.32	2.48	3.86	2.38	1.80	1.83	1.16	1.52	1.30	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.70	18.55	14.30	12.25	12.10	15.40	8.50	9.00	6.60	9.45	9.20	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.85	2.23	4.04	5.61	2.70	8.53	2.05	5.78	4.48	5.78	4.98	
FeO	15.46	18.96	14.83	14.24	18.40	8.34	13.73	11.23	11.90	11.00	9.24	
FeO <sup>1</sup>	<b>18.90</b>	<b>20.97</b>	<b>18.47</b>	<b>19.29</b>	<b>20.83</b>	<b>16.03</b>	<b>15.57</b>	<b>16.43</b>	<b>15.93</b>	<b>16.20</b>	<b>13.72</b>	
MnO	0.37	0.43	0.42	0.71	0.35	0.22	0.43	0.51	0.71	0.38	0.42	
MgO	11.18	8.34	12.45	13.23	10.96	13.84	11.05	11.69	13.06	10.25	12.86	
CaO	0.56	0.72	1.48	2.66	1.23	0.61	9.67	11.14	11.83	10.75	11.84	
Na <sub>2</sub> O	0.20	0.26	0.23	0.32	0.18	0.14	1.84	1.39	1.56	1.34	0.92	
K <sub>2</sub> O	9.41	8.57	8.00	6.60	8.95	7.31	1.40	1.75	0.84	1.19	0.67	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.15	0.14	0.09	0.06	0.26	0.02	0.03	0.03	0.09	0.04	0.04	
H <sub>2</sub> O <sup>±</sup>	<.01	<.01	no	<.01	<.01	no	nr	no	<.01	<.01	0.07	
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	2.57	3.42	3.37	3.78	2.90	6.64	1.98	1.57	1.19	2.11	1.32	
crystallochemical formula (кристалохемијска формула)												
(O=22, 14-CNK)						(O=23, 13-CNK)						
Si	5.760	5.547	5.702	5.835	5.863	5.637	Si	6.973	6.546	6.800	6.896	6.775
Al <sup>IV</sup>	2.240	2.453	2.298	2.165	2.137	2.363	Al <sup>IV</sup>	1.027	1.454	1.146	1.104	1.225
Ti									.054			
Z	8	8	8	8	8	8	Z	8			8	8
Al <sup>VI</sup>	.615	.956	.304	.068	.127	.438	Al <sup>6</sup>	.437	.116		.536	.351
Ti	.323	.311	.386	.289	.461	.276	Ti	.198	.204	.129	.168	.142
Fe <sup>3+†</sup>							Fe <sup>3s</sup>	.382	.665	.600	.230	.517
Fe <sup>2+†</sup>	2.441	2.736	2.387	2.497	2.768	2.070	Fe <sup>2s</sup>	1.522	1.370	1.311	1.767	1.151
Mg	2.574	1.940	2.868	3.053	2.596	3.186	Mg	2.408	2.581	2.872	2.252	2.787
Mn	.048	.057	.055	.093	.047	.029	Mn	.053	.064	.089	.047	.052
Y	6.010	6	6	6	5.999	5.999	C	5	5	5	5	5
Ca	.093	.120	.245	.441	.209	.101	Ca	1.515	1.768	1.870	1.697	1.844
Na	.060	.079	.069	.096	.055	.042	Na	.485	.232	.130	.303	.156
K	<b>1.854</b>	<b>1.706</b>	<b>1.577</b>	<b>1.303</b>	<b>1.814</b>	<b>1.440</b>	B	2	2	2	2	2
X	2.070	1.905	1.891	1.840	2.078	1.583	Na	.036	.167	.316	.080	.104
							K	.261	.331	.158	.224	.125
							A	.297	.498	.474	.304	.308

no = undermined; nr = not considered;  $\text{FeO}^l$  = total iron as FeO ( $\text{FeO}^l = \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \times 0.89981$ );  $\text{Fe}^{2+\#}$ ,  $\text{Fe}^{3+\#}$  = stoichiometrically calculated.

**Symbols for calc-alkaline Tertiary igneous rocks of Serbia (including enclaves and schlieren) which contain Ca-amphibole:** **Dr** = Drenje, quartz-diorite; **Kp** = Kopaonik (Jošanička Banja road-Kopaonik); **Kp-ž** – small-grained granodiorite vein, **Kp-gd** (unpublished) – gabbro-diorite vein, **Kp-z** – fine-grained granodiorite, **Kp-pi** – porphyroid quartz-monzonite; **G1** = Golija, quartz-monzonite (the Crna reka source); **Že** = Željina: **Že-sr** – average value for granitoid (Vukov, 1988), **Že-gd** – gabbro-diorite (Vukov & Terzić, 1992), **Že-š** – banded schlieren, **Že-a** – enclave (Vukov, 1989), **Že-ss** – light schlieren (Op.cit.), **Že-st** – dark schlieren (Op.cit.); **Bg** = Bogatić (unpublished): **Bg-z** – granular tonalite, **Bg-p** – porphyritic tonalite; **Cr** = Cer (Knežević, 1992; Knežević et al., 1994): **Cr-qm** – quartz-monzonite, **Cr-a** –enclave; **Sr** = Surdulica (Vasković, 1998): **Sr-gnd/a** – granodiorite (enclave), **Sr-gnd** – granodiorite, **Sr-mg** – quartz-monzonite, **Sr-t/a** – tonalite (enclave), **Sr-gd/a** – gabbro-diorite (enclave).

**Symbols for other igneous and metamorphosed igneous rocks of Serbia which contain amphibole:** **Lc** = Lovci, Lapovo-Jagodina (Nikolić, 1996): **Lc-a** – amphibolite (amphibolised ultramafite), **Lc-G** – olivine-gabbro; **Rs** = Tara, Rastište (Radivojević, 1986): **Rs-G** – gabbro-pegmatite; **Mc** = Mačedonce, Medveđa (Vukov & Milovanović, 1993): **Mc-l** – lamprophyre; **Gr** = Gora – Sar Mt. (Čirić, 1994, Čirić & Milovanović, 1996): **Gr-pi** – porphyroid metasyenite (with Ca-amphibole); **Gr-Na-Ca**, **Na-Am** – pyroxene and amphibole metasyenites (with Na- and Na-Ca-amphiboles); **Zl** = Železnik – Majdanpek (unpublished): **Zl-u** – metamorphosed ultramafite; **Ts** = Trstenik – Majdanpek (unpublished): **Ts-G** – metamorphosed gabbros; **Fg** = Fruška Gora, holocrystalline latite (Matović, 1998).

po = nije određeno; nr = nije račeno;  $\text{FeO}^l$  = укупно гвожђе као FeO ( $\text{FeO}^l = \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \times 0.89981$ );  $\text{Fe}^{2+\#}$ ,  $\text{Fe}^{3+\#}$  = стехиометријски израчунато.

**Ознаке калкоалкалних терцијарних магматских стена Србије (укључујући анклаве и шлере у њима) који садрже Са-амфиболе:** **Dr** = Дрење, кварц-диорит; **Kp** = Копаник (пут Јошаничка Бања-Копаник); **Kp-ž** – жица ситнозрног гранодиорита, **Kp-gd** (непубликовано) – жица габродиорита, **Kp-z** – ситнозрни гранодиорит, **Kp-p** – порфироидни кварц-монзонит; **G1** = Голија, кварц-монзонит (изворинте Црне реке); **Že** = Желина: **Že-sr** – средња вредност за гранитоид (Vukov, 1988), **Že-gd** – габродиорит (Vukov & Terzić, 1992), **Že-š** – тракасте шлере, **Že-a** – анклава (Vukov, 1989), **Že-ss** – шлери светла (Op.cit.), **Že-st** – шлери тамна (Op.cit.); **Bg** = Богатић (непубликовано): **Bg-z** – зрнасти тоналит, **Bg-p** – порфирски тоналит; **Cr** = Цер (Knežević, 1992; Knežević et al., 1994): **Cr-qm** – кварц-монзонит, **Cr-a** – анклава; **Sr** = Сурдулица (Vasković, 1998): **Sr-gnd/a** – гранодиорит (анклава), **Sr-gnd** – гранодиорит, **Sr-gm** – кварц-монзонит, **Sr-t/a** – тоналит (анклава), **Sr-gd/a** – габродиорит (анклава).

**Ознаке осталих магматских и метаморфисаних магматских стена Србије које садрже амфиболе:** **Lc** = Lovci, Lapovo-Jagodina (Nikolić, 1996): **Lc-a** – амфиболит (амфиболизиран ултрамафит), **Lc-G** – оливин-габро; **Rs** = Tara – Растисте (Radivojević, 1986): **Rs-G** – габро-пегматит; **Mc** = Мацедонце – Медвеђа (Vukov & Milovanović, 1993): **Mc-l** – лампрофир; **Gr** = Гора – Шар Планина (Čirić, 1994, Čirić & Milovanović, 1996): **Gr-pi** – порфироидни метасијенит (са Са-амфиболом); **Gr-Na-Ca**, **Na-Am** – пироксенски и амфиболски метасијенити (са Na- и Na-Ca-амфиболима); **Zl** = Железник – Мајданпек (непубликовано): **Zl-u** – метаморфисани ултрамафит; **Ts** = Трстеник-Мајданпек (непубликовано): **Ts-G** – метаморфисни габроид; **Fg** = Фрушка Гора, холокристални латит (Matović, 1998).

petrographic, fundamental (logical and interrelated) characteristics of igneous rocks. The knowledge of the physical and chemical conditions about crystallization of igneous rocks in Serbia is relatively modest (Maksimović & Jovanović, 1984, 1988; Vukov, 1989, 1990; Vasković, 1998), mainly because modest knowledge about coexisting minerals, i.e. their chemistry (from which these inferences were deduced). More data and information exist about genesis and geotectonic conditions of magma generation, especially for those that gave young intermediate and acid calc-alkaline plutons, such as: **Kosmaj** (Vasković, 1987), **Polumir** (Pantó et al., 1988), **Željina** (Vukov, 1989, 1995), **Cer** (Steiger et al., 1989, Karamata et al., 1990; Knežević et al., 1994), **Boranja** (Karamata et al., 1990), and **Surdulica** (Vasković, 1998). Genetic and geotectonic characteristics were deduced mostly according to mineral assemblages and chemical composition of rocks (including isotope ratio).

The framework for genetic, geotectonic, and physical-chemical considerations of igneous, including Tertiary, rocks of Serbia is based on the new conception of plate tectonic, as products of the lithospheric plate (microplate) interactions (Karamata, 1975, 1977, 1982, 1983; Karamata & Djordjević, 1980 etc.).

### ANALYTICAL METHODS

Estimates of the crystallization pressure ( $P_{H_2O}$ ), or depth of solidification, for igneous rocks of Serbia are based on the empirically and experimentally established relation between the crystallization pressure/depth and total alumina ( $Al^I$ ) in **Ca-amphiboles** (Hammarstrom & Zen E-an, 1986; Hollister et al., 1987; Rutter et al., 1989; Johnson & Rutherford, 1989), and the aluminium and silica distribution (and/or An% of plagioclase) among the coexisting **amphibole** and **plagioclase** (Fershtater, 1990). The analysis covers young Tertiary intermediate and acid calc-alkaline plutons of Bogatić, Cer, Kopaonik, Željina, Golija, and Surdulica – those for which the chemistry of amphiboles are available.

For the aim of assessment of the method applicability, geobarometry was considered on the basis of empirical amphibole-biotite pair and amphibole geobarometer. Other fresh, or metamorphosed igneous rocks also were studied, as well as enclaves in the same Tertiary igneous rocks.

Geobarometry (and geothermometry) of **amphibole-biotite** pair is based on the distribution of alkalis  $f(X_{K,O}) = 0.5X^{(Bt)}_{K,O} + X^{(Am)}_{K,O}$ ,  $X_{K,O} = K/(K+Na)$ , alumina content in coordination six –  $Al^{VI} /_{Bt,Am} K_d Al^{VI} = Bt X_{Al^{VI}} : Am X_{Al^{VI}}$ ,  $X_{Al^{VI}} = Al^{VI} / (Al^{VI} + Fe^I + Mg + Ti)$ , and manganese  $^{VI}K_d / X_{Mn} = (1 - X_{Mn})^{Bt} X / (1 - X_{Mn}) : X_{Mn} / Am$ ,  $X_{Mn} = Mn / (Mn + Fe + Mg)$  between the coexisting biotite and amphibole (Perchuk & Fedkin, 1976). The **amphibole** geobarometer is based on the crystallochemical composition of amphibole, or discriminants:  $Al^{IV}$ ,  $K+Na$ , and vacancy in the A-site, by which granitoids are distinguished as subvolcanic (and subsurface), hypabyssal, abyssal (and ultra-abyssal) consolidated (Manujlova et al., 1975).

For the purpose of this work, eleven samples of amphiboles and biotites from granitic rocks of Kopaonik, Golija, and Željina were analysed by the conventional wet method in GIRA Laboratories of Moscow (Table 1). Also were considered all available (published, or not) electron microprobe/classic chemical analyses of amphibole (and associated biotite

and plagioclase) of intermediate and acid calc-alkaline plutons (Tables 2 and 3): granitic rocks of **Želj**in (Vukov, 1988), quartz-monzonite of **Cer** (Knežević et al., 1994), granular and porphyritic granitoids of **Surdulica** (Vasković, 1998), granular and porphyritic tonalites of **Bogatić** (unpublished). For an indirect confirmation of the solidification level, were considered also enclaves in the same plutons: **Želj**in (Vukov, 1989), **Cer** (Knežević, 1992; Knežević et al., 1994), and **Surdulica** (Vasković, 1998). The consideration included positions of mafic, ultramafic and vein rocks of: **Kopaonik** gabbro-diorite (unpublished), **Želj**in gabbro-diorite (Vukov & Terzić, 1992), **Rastište** on **Tara Mt.** gabbro-pegmatite (Radivojević, 1986); metamorphosed olivine-gabbro of the **Lovci** village, **Lapovo-Jagodina** (Nikolić, 1996); metamorphosed ultramafite and gabbros rocks of **Majdanpek** (unpublished); porphyroid metasyenite of **Gora** on **Šara Mt.** (Ćirić, 1994; Ćirić & Milovanović, 1996); lamprophyre of the **Macedonice** on **Medvedja** (Vukov & Milovanović, 1993), and holocrystalline volcanic latite of **Fruška Gora** (Matović, 1998).

Calculated chemical analyses of minerals are uniformly using computer software (Richard, 1995) into crystallochemical formulas: amphibole on  $O=23$  (13-CNK), biotite on  $O=22$  (14-CNK), and plagioclase to  $O=32$ . The scarcity of biotite analyses and consequent low reliability of Am-Bt geobarometry did not allow precise definition of its crystallochemical formula. Total iron ( $FeO^I$ ), in analyses where  $Fe_2O_3$  is given, is recalculated from the following relation:  $FeO^I = FeO + Fe_2O_3 \times 0.89981$ , whereas depths are calculated using  $h(km) = 3.5 \times P_s$  ( $P_{H,O}$ ).

### AMPHIBOLE AND PLAGIOCLASE CRYSTALLOCHEMISTRY AND DEPTHS OF SOLIDIFICATION

The depth level of the granitoid rocks formation in Serbia, calculated using crystallochemical aluminium ( $Al^I$ ) content in Ca-amphibole (Table 2, Fig. 1) and empirical criteria (Hammarstrom & Zen E-an, 1986; Hollister et al., 1987; Johnson & Rutherford, 1989), is in fair agreement with the results obtained using alumina and silica distributions between the coexisting amphibole and plagioclase (Table 2, Fig. 2) and respective criteria (Fershtater, 1990); whereas the last best agrees with  $P(0.5 \text{ kbar}) = 4.23 \times Al^I - 3.46$  (Johnson & Rutherford, 1989), especially for high pressures (Table 3).

Through often based on a modest number of analyses, the study of the depth level of formation, or the general internal pressure of solidification, principally for young granitic rocks of Serbia, allows numerous inferences consistent with the geological and petrological facts.

Among the studied plutons, at the deepest levels of about 17.5 km and  $P \approx 5$  kbar (Table 3), were formed quartz-monzonite of **Cer** (Cr-qm), the older rheomorphic intrusion phase, and quartz-diorite-tonalite rocks of **Želj**in (**Že**-sr). The latter rocks, judging by the varieties of schlieren ( $\bar{s}s$  -light,  $\bar{s}t$  -dark,  $\bar{s}$  - streaked), underwent long and poly-phase late- and post-magmatic transformations (probably affected by retarded or supplied fluids) during ascending to moderate depths of 10-11 km and at  $P=3.2$  kbar. In reaction with the same fluids, at  $P=3.7$  kbar, were formed metasomatic gabbro-diorites (gd) as a

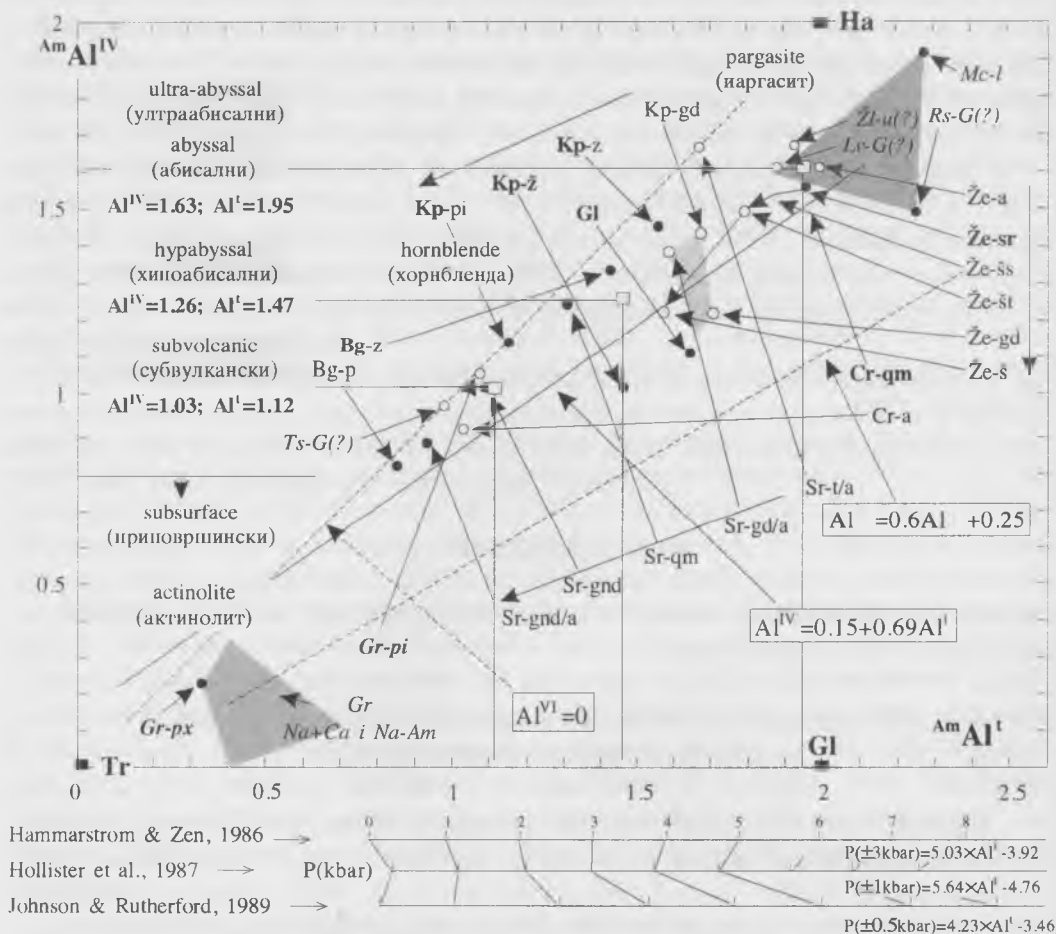


Fig. 1.  $\text{Al}^{\text{I}}-\text{Al}^{\text{IV}}$  diagram of amphibole for igneous rocks of Serbia. Explanation: graphical representations of pressure, in relation to  $\text{Al}^{\text{I}}$ , are derived from relations:  $P(\pm 3 \text{ kbar}) = 5.03 \times \text{Al}^{\text{I}} - 3.92$  (Hammarstrom & Zen, 1986),  $P(\pm 1 \text{ kbar}) = 5.64 \times \text{Al}^{\text{I}} - 4.76$  (Hollister et al., 1987),  $P(\pm 0.5 \text{ kbar}) = 4.23 \times \text{Al}^{\text{I}} - 3.46$  (Johnson & Rutherford, 1989); solidification levels, in function of  $\text{Al}^{\text{IV}}$  (Manujlova et al., 1975) are felt-tip penciled: subvolcanic (and subsurface), hypabyssal, and abyssal (and ultra-abysal); Tr = tremolite, GI = glaucophane, Ha = hastingsite.

Сл. 1.  $\text{Al}^{\text{I}}-\text{Al}^{\text{IV}}$  дијаграм амфибола из магматских стена Србије. Објашњење: графички прикази притиска, у зависности од  $\text{Al}^{\text{I}}$ , изведени су из израза:  $P(\pm 3 \text{ kbar}) = 5.03 \times \text{Al}^{\text{I}} - 3.92$  (Hammarstrom & Zen, 1986),  $P(\pm 1 \text{ kbar}) = 5.64 \times \text{Al}^{\text{I}} - 4.76$  (Hollister et al., 1987),  $P(\pm 0.5 \text{ kbar}) = 4.23 \times \text{Al}^{\text{I}} - 3.46$  (Johnson & Rutherford, 1989); нивои консолидације, у функцији  $\text{Al}^{\text{IV}}$  (Manujlova, et al., 1975), дати су као осенчени називи: субвулкански (и приповршински), хипоабисални и абисални (и ултраабисални); Tr = тремолит, GI = глаукофан, Ha = хастингсит.

Table 2. Crystallochemical composition parameters for plagioclase, amphibole, and biotite from igneous rocks of Serbia.

Табела 2. Параметри кристалохемског састава плагиокласа, амфибола и биотита из магматских стена Србије.

		Gl	Bogatic		Cer		Željin					
		(3)	z	p	qm	a	sr	ss	št	a	s	gd
		(3)	(2)	(2)	(4)	(?)	(55)	(3)	(3)	(3)	(3)	(2)
Pl	Al		1.242	1.228	1.362		1.391					1.477
	Si		2.755	2.768	2.704		2.608					2.519
	Al/Si		0.451	0.440	0.503		0.533					0.586
	An	38 <sup>x</sup>	24.10	22.16	37.45	35.25	38.99	39 <sup>x</sup>	44 <sup>x</sup>	42 <sup>x</sup>	39 <sup>x</sup>	48.62
Am		(1)	(1)	(1)	(6)	(3)	(22)	(1)	(1)	(1)	(1)	(2)
	Al <sup>I</sup>	1.640	1.429	.847	1.967	1.056	1.941	1.858	1.798	1.988	1.575	1.705
	Al <sup>IV</sup>	1.104	1.324	.834	1.512	.914	1.551	1.520	1.499	1.607	1.225	1.222
	D/N	<b>H</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>H</b>	<b>H</b>
	Si	6.896	6.676	7.166	6.488	7.086	6.449	6.480	6.501	6.373	6.775	6.778
	Al <sup>I</sup> /Si	.238	.214	.118	.303	.149	.301	.287	.277	.311	.232	.251
	Na+K	.607	.595	.297	.538	.359	.633	.726	.643	.601	.385	.450
	D/N	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>H</b>
	A	.304	.311	.133	.398	.272	.596	.482	.439	.477	.228	.354
	D/N	<b>H</b>	<b>H</b>	<b>S</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>A</b>
XK <sub>2</sub> O	.369	.153	.013	.416	.329	.414	.362	.364	.394	.322	.202	
Bt		(1)	(1)	(2)	(6)	(2)	(33)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
	XK <sub>2</sub> O	.971	.1	.942	.991	.960	.985	.981	.987	.982	.972	.981
Bt/ Am	( $\bar{X}K_2O$ )	.670	.576	.477	.703	.644	.699	.671	.675	.688	.647	.591
	P/kbar	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>&lt;&lt;</b>	<b>7.5</b>	<b>6</b>	<b>7.5</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7.5</b>	<b>6</b>	<b>1.5</b>
		<b>Kopaonik</b>				<b>Surdulica</b>				<b>Fg</b>	<b>Mc</b>	
		gd	z	z	pi	gnd/a	gnd	qm	t/a	gd/a		l
		(3)	(3)	(3)	(3)	(12)	(22)	(8)	(5)	(8)	(12)	(19)
Pl	Al					1.417	1.399	1.327	1.379	1.484	1.356	1.466
	Si					2.599	2.619	2.702	2.627	2.554	2.638	2.508
	Al/Si					0.545	0.534	0.491	0.525	0.581	0.514	.584
	An%	53 <sup>x</sup>	43 <sup>x</sup>	40 <sup>x</sup>	38 <sup>*</sup>	43.40	37.72	29.75	36.56	44.59	34.18	48.98
Am		(1)	(1)	(1)	(1)	(3)	(3)	(3)	(5)	(5)	(13) <sup>y</sup>	(8)
	Al <sup>I</sup>	1.677	1.464	1.570	1.146	.929	1.087	1.312	1.680	1.597	2.422	2.285
	Al <sup>IV</sup>	1.435	1.027	1.454	1.146	.887	1.087	1.255	1.680	1.387	2.173	1.923
	D/N	<b>A</b>	<b>H</b>	<b>A</b>	<b>H</b>	<b>S</b>	<b>H</b>	<b>H</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>
	Si	6.565	6.973	6.546	6.800	7.113	6.901	6.745	6.314	6.613	5.827	6.077
	Al <sup>I</sup> /Si	.255	.210	.240	.168	.131	.157	.194	.266	.241	.416	.376
	Na+K	.697	.882	.498	.474	.310	.402	.510	.525	.480	.987	.786
	D/N	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>H</b>	<b>H</b>	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>H</b>	<b>H</b>	<b>H</b>	<b>A</b>	<b>A</b>
	A	.575	.297	.497	.473	.206	.111	.273	.194	.284	.459	.753
D/N	<b>A</b>	<b>H</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>H</b>	<b>S</b>	<b>H</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	
XK <sub>2</sub> O		.409	.664	.333	.229	.214	.280	.305	.283	.465		
Bt		(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(3)	(1)	(2)	(5)	
	XK <sub>2</sub> O		.956	.958	.931	.958	.975	.980	.983	.986	.905	
Bt/ Am	( $\bar{X}K_2O$ )	.682	.881	.632	.593	.594	.630	.644	.634	.634	.685	
	P/kbar	<b>7</b>	<b>&gt;&gt;</b>	<b>&lt;5</b>	<b>&lt;2</b>	<b>&lt;2</b>	<b>4.5</b>	<b>&lt;6</b>	<b>5</b>	<b>7</b>		

Table 2. (continued) – Табела 2. (наставак).

		Zl	Ts	Gora						Tara	Lovci	
				pi (porphyroid)			px (pyroxene)			Rs-G	G	am
		(5)	(1)	(1)			(2)					
Pl	Al	1.063	1.042	.983			.963					
	Si	2.910	2.447	3.032			3.003					
	Al/Si	.365	.425	0.324			.321					
	An%	11.4	11.4	0.00			3.50					
		(7)	(6)	(11)	(5)	(7)	(1)	(1)	(1)	(1)	(4)	(?)
				Ca <sup>Z</sup>	Na–Ca <sup>Z</sup>	Na <sup>Z</sup>	Ca <sup>Z</sup>	Na–Ca <sup>Z</sup>	Na <sup>Z</sup>			
Am	Al	1.935	.982	1.090	.433	.382	.325	.406	.719	2.278	1.883	2.971
	Al <sup>IV</sup>	1.682	.950	1.071	.308	.147	.223	.357	.110	1.494	1.601	2.036
	D/N	A	S	H	S	S	S	S	S	A	A	A
	Si	6.318	7.050	6.929	7.692	7.853	7.777	7.643	7.890	6.506	6.399	5.964
	Al/Si	.306	.139	.157	.056	.049	.042	.053	.091	.350	.294	.498
	Na+K	.744	.537	.643	1.220	1.804	1.062	1.323	1.498	.319	.650	.753
	D/N	A	A	A	A	A	A	A	A	S	A	A
	A	.359	.285	.431	.250	.258	.940	.089	.114	.056	.425	.571
	D/N	A	H	A	H	H	A	S	S	S	A	A
	XK <sub>2</sub> O	.163	.169				.035					
Bt		(4)	(6)				(4)					
	XK <sub>2</sub> O	.721	.982				.974					
Bt/Am	(XK <sub>2</sub> O)	.442	.575				.504					
	P/kbar	<<	<1				<<					

(mn) = number of analyses; <sup>x</sup> = optically determined plagioclase composition; <sup>y</sup> = Mg–cummingtonite (Fe–Mg–Mn–amphibole); <sup>z</sup> (Ca, Na–Ca, Na): Ca<sup>Z</sup> = Ca–amphibole, Na–Ca<sup>Z</sup> = Na–Ca–amphibole, Na<sup>Z</sup> = alkalic amphibole; G = gabbro; am = amphibolite. Other symbols same as in Table 1. Formation depth levels by crystallochemical composition of amphibole –f=40–60% (Manujlova et al., 1975): S = subvolcanic (Al<sup>IV</sup><1, Na+K<0.44 A<0.24); H = hipabyssal (Al<sup>IV</sup>=1–1.3, Na+K=0.44–0.53, A=0.24–0.33); A = abyssal (Al<sup>IV</sup>>1.3, Na+K>0.53, A>0.33); D/N = depth. P/kbar (general inner pressure) = H<sub>2</sub>O pressure (from Perchuk & Fed'kin, 1976).

(mn) = број анализа; <sup>x</sup> = оптички одређен састав плаггиокласа; <sup>y</sup> = Mg–кумингтонит (Fe–Mg–Mn–амфибол); <sup>z</sup> (Ca, Na–Ca, Na): Ca<sup>Z</sup> = Ca–амфибол, Na–Ca<sup>Z</sup> = Na–Ca–амфибол, Na<sup>Z</sup> = алкални амфибол; G = габро; am = амфиболит. Остале ознаке као на табели 1. Дубински нивои образовања према кристалохемијском саставу амфибола –f=40–60% (Manujlova et al., 1975): S = субвулкански (Al<sup>IV</sup><1, Na+K<0.44 A<0.24); H = хипоабисални (Al<sup>IV</sup>=1–1.3, Na+K=0.44–0.53, A=0.24–0.33); A = абисални (Al<sup>IV</sup>>1.3, Na+K>0.53, A>0.33); D/N = ниво. P/kbar (општи унутрашњи притисак) = притисак H<sub>2</sub>O (по Perchuk & Fed'kin, 1976).

lens in the highest endocontact part of the pluton (Vukov & Terzić, 1992). The composition of the enclave from Željic rocks (Ze–a) indicates its homogenisation at P=4.9 kbar, and that it is a likely residual remain of the Željic magma formation, unlike the enclaves from quartz–monzonite of Cer (P=1 kbar, h=3.5 km) for which we have not a plausible explanation.

Solidified at depth levels shallower than the former, are polyphase and polytype volcanic–plutonic complexes of Surdulica, Kopaonik, Bogatić, and Golija, which is principally and indirectly confirmed by their geologic–petrologic and metallogenitic properties.

Rocks of Kopaonik complex, excluding gabbro–diorite, which formed at greatest depths at P=3.2 kbar, are granular granitic rocks (Kp–z); at P=2.7 kbar, vein rocks



(Kp-ž); and porphyroid rocks (Kp-pi) at shallowest levels and P=1.4 kbar, compatible with the model of their metasomatic origin (Dimitrijević & Dragić, 1957; Stefanović & Pavlović, 1960, Dimitrijević & Karamata, 1969). Gabbro-diorite veins of Kopaonik (Kp-gd) were solidified at greater depths, at P=3.6 kbar, then other Kopaonik phases. These depths are similar to those where gabbro-diorite of Željin (Že-gd) and Surdulica (Sr-gd) were formed.

Table 3. Solidification (in kbar) depth levels of igneous rocks of Serbia by different criteria and sources.

Табела 3. Дубински нивои консолидације (у кбар) магматских стена Србије према различитим критеријумима и ауторима.

	Hbl	Hbl-Pl	Hbl-Bt		Hbl	Hbl-Pl	Hbl-Bt		Hbl	Hbl-Pl	Hbl-Bt
	1	2	3		1	2	3		1	2	3
Bg-z	2.6	<3-4	<1	Gl	3.5	(3-4)	<7(?)	Fg	6.8	>>6	7
Bg-p	0.1	0.5-1.5	<<	Kp-gd	3.6	2-(3-4)	--	Gr-pi	1.1 <sup>Q</sup>	(3-4) <sup>u</sup>	--
Cr-qm	4.9	5	7.5	Kp-z	3.2	(3-4)	>>(?)	Gr-px	<< <sup>Q</sup>	<< <sup>u</sup>	<<
Cr-a	1	<1.5	<6	Kp-ž	2.7	2-(3-4)	7	Gr-alk	<< <sup>Q</sup>	<< <sup>u</sup>	--
Že-a	4.9	5	<7.5	Kp-pi	1.4	<2	<5	Lc-am	9.1	(?) <sup>z</sup>	--
Že-sr	4.7	<5	7.5	Sr-t/a	3.6	>3-4	<6	Lc-G	4.5	(?) <sup>z</sup>	--
Že-ss	4.4	<5	7	Sr-gd/a	3.3	2-(3-4)	5	Mc-l	6.2	>6	--
Že-št	4.1	>(3-4)	7	Sr-qm	2.1	2-(3-4)	4.5	Rs-G	6.2	(?) <sup>y</sup>	--
Že-š	3.2	<(3-4)	6	Sr-gnd	1.1	<1.5	>1.5	Žl-u	4.7	>>6 <sup>x</sup>	<<
Že-gd	3.7	2-(3-4)	>1.5	Sr-gnd/a	0.5	>0.5	>1.5	Ts-G	0.7	≈2 <sup>x</sup>	<1

1 = Johnson & Rutherford, 1989; 2 = Fershtater, 1990; 3 = Perchuk & Fed'kin, 1976. <sup>x</sup> = present metasomatic plagioclase; <sup>y</sup> = plagioclase not analysed; <sup>z</sup> = plagioclase lacking; <sup>u</sup> = present metamorphic plagioclase; <sup>Q</sup> = rocks metamorphosed at P≈7 kbar (Čirić, 1994) according to Al<sup>IV</sup> and Na(M4) contents in alkalic amphiboles (Brown, 1977). Symbols same as in Tables 1 and 2.

1 = Johnson & Rutherford, 1989; 2 = Fershtater, 1990; 3 = Perchuk & Fed'kin, 1976. <sup>x</sup> = присутан метасоматски плагноклас; <sup>y</sup> = није рађен плагноклас; <sup>z</sup> = плагноклас је одсутан; <sup>u</sup> = присутан метаморфни плагноклас; <sup>Q</sup> = стене су метаморфисане при P≈7 кбар (Čirić, 1994) на основу садржаја Al<sup>IV</sup> и Na(M4) у алкалним амфиболима (Brown, 1977). Ознаке као иа табелама 1 и 2.

Igneous rocks of **Surdulica** complex formed similarly to those of Kopaonik, only in a wider range of depth (and age). The deepest formed are more basic pre-existent rocks, present in enclaves (Vasković, 1998), first tonalite (Sr-t/a) and later gabbro-diorite (Sr-gd/a) at P=3.6 kbar, and P=3.3 kbar, respectively. Formed at the shallowest levels are granodiorite (Sr-gnd) at P=1.1 kbar, and present in "enclaves" (Sr-gnd/a) at P=0.5 kbar. The calculated depth of quartz-monzonite (Sr-qm) solidification at P=2.1 kbar is partly contradicted by the geological facts, because this rock is believed the youngest phase (Vasković, 1998) and thus should be the shallowest.

**Tonalites of Bogatić** formed: granular types (Bg-z) at P=2.6 kbar, and porphyric types (Bg-ž) much later in shallower levels at P=0.1 kbar probably as veins, because the former is penetrated by drilling at 1416 m and the latter on the former at 1500 m (Vukov & Milivojević, 1993).

**Quartz–monzonte of Golija** (Gl) formed at  $P=3.5$  kbar, however, for a comprehensive interpretation of the whole complex, quartz–monzonite and minerals of other rock phases and types ought to be analysed in detail.

Crystallisation of metamorphosed igneous rocks which contain secondary Ca–amphiboles (and/or plagioclases), then mafic and ultramafic, and holocrystalline porphyritic rocks are beyond the scope of this work. A piece of information is mentioned, however, or **porphyroid metasyenite of Gora** (Gr–pi), metamorphosed at  $P\approx 7$  kbara (Ćirić, 1994). According to crystallochemical composition of Ca–amphibole and Al<sup>i</sup> relics (Table 2), the rocks solidified at a small depth and  $P=1.1$  kbar (Fig. 1, Table 3). A similar pressure value is derived from the Al:Si ratio for amphibole and plagioclase (Fig. 2) assuming  $An\approx 50$  for the primary plagioclase.

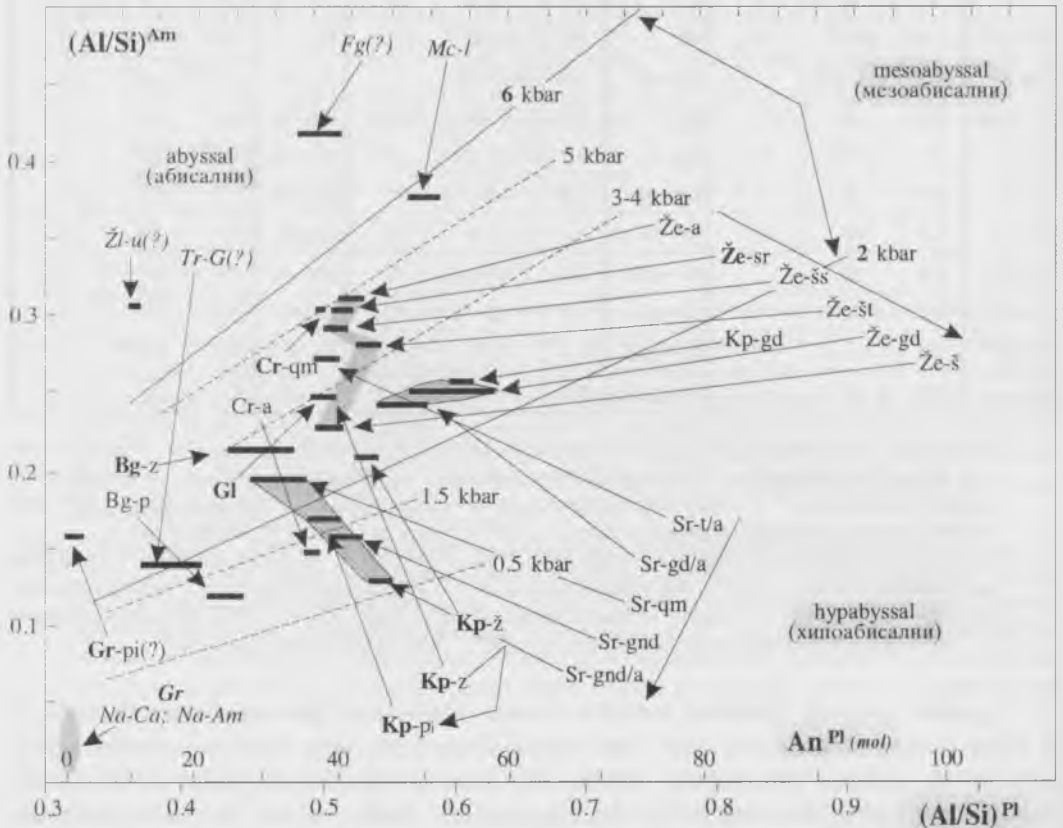


Fig. 2. Empirical diagram of  $(Al:Si)^{Pl}/An^{Pl} - (Al:Si)^{Am}$  and pressure relationship in plagioclases and amphiboles from igneous rocks (Fershtater, 1990).

Сл. 2. Емпиријски дијаграм односа  $(Al:Si)^{Pl}/An^{Pl} - (Al:Si)^{Am}$  и притиска у плагиокласима и амфиболима из магматских стена (Fershtater, 1990).

**Amphibole–biotite geobarometer.** The pressures (depths) of igneous rocks solidification in Serbia based on potassium potential (Fig. 3, Tables 2 and 3), or on the reduced empirical amphibole–biotite geobarometer (Perchuk & Fed'kin, 1976), are generally (excluding Bogatić tonalite) much higher than those determined using  $^{Am}Al^i$  (Johnson &

Rutherford, 1989) or  $^{Pl,Am}Al/Si$  geobarometer (Fershtater, 1990), but the formation sequence of the rock types is consistent with the former. This geobarometer requires a very precise definition of the crystallochemical formula and a careful interpretation on account of the often present potassium metasomatism and amphibole biotitisation in granitic rocks of Serbia. An error is not excluded in our analyses, because the analysed mineral concentrates, particularly from the rocks of Golija and Kopaonik (Kp-z), were not sufficiently pure.

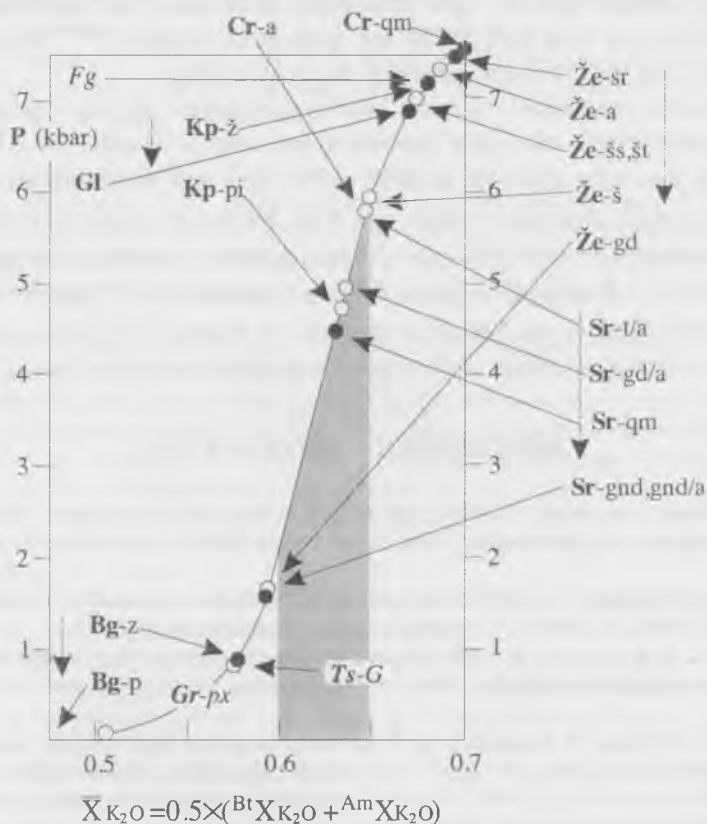


Fig. 3. Empirical diagram of the general pressure relation to the  $(\bar{X}_{K_2O})$  coefficient distribution between biotite and amphibole from granitoids (Perchuk & Fed'kin, 1976). Explanation:  $(\bar{X}_{K_2O}) = 0.5 \times ({}^{Bt}X_{K_2O} + {}^{Am}X_{K_2O})$ ,  $X_{K_2O} = K : (K + Na)$ .

Сл.3. Емпиријски дијаграм зависности од општег притиска коефицијента расподеле  $(\bar{X}_{K_2O})$  између биотита и амфибола из граиитоида (Perchuk & Fed'kin, 1976). Објашњење:  $(\bar{X}_{K_2O}) = 0.5 \times ({}^{Bt}X_{K_2O} + {}^{Am}X_{K_2O})$ ,  $X_{K_2O} = K : (K + Na)$ .

**Amphibole geobarometer.** Relative solidification levels of granitic rocks, determined on different parameters, i.e. on  $Al^{IV}$  content (Fig. 1, Table 2), sum of  $Na+K$  and cations in A-site (Table 2), and amphibole geobarometer (Manujlova et al., 1975), are principally in agreement. Explanations of individual differences have not any specific importance at present, because the available analyses are not representative (except those for Željina) in neither quantity or quality.

## CONCLUSION

The congruity of the calculated solidification depths/pressures for granitic rocks of Serbia by the amphibole geobarometer, or of the total aluminium ( $Al^I$ ) content and the relation  $P(\pm 0.5 \text{ kbar}) = 4.23 \times Al^I - 3.46$  (Johnson & Rutherford, 1989), and of amphibole-plagioclase geobarometer and silica and alumina distribution  $^{Bl,Am}(Al:Si)$  between the coexisting minerals (Fershtater, 1990), is quite satisfactory. The sequence of phase solidification within different igneous rock complexes, determined on amphibole-biotite geobarometer (Perchuk & Fed'kin, 1976) and potassium potential ( $^{Bl,Am}(X_{K_2O})$ ), is congruent with the former, only the calculated pressures are much higher.

By the above mentioned criteria, quartz-monzonites of Cer (older rheomorphic phase) and granitic rocks of Zeljin formed at the deepest levels ( $h > 17 \text{ km}$ ). Rocks of Surdulica, from the early phase of tonalitic ( $h \approx 13 \text{ km}$ ) and gabbro-dioritic ( $h \approx 11.5 \text{ km}$ ) composition to quartz-monzonite rocks ( $h \approx 7 \text{ km}$ ), formed at moderate levels, where also formed quartz-monzonites of Golija ( $h \approx 12 \text{ km}$ ), granular tonalites of Bogatić ( $h \approx 9 \text{ km}$ ), and granitic rocks of Kopaonik sequentially from granular ( $h \approx 11 \text{ km}$ ) to vein ( $h \approx 9 \text{ km}$ ) to porphyroid ( $h \approx 5 \text{ km}$ ) types. Porphyric tonalites of Bogatić and the youngest granodioritic rocks of Surdulica solidified at the shallowest depth levels ( $h < 2 \text{ km}$ ).

## REFERENCES – ЛИТЕРАТУРА

- Brown E.H., 1977: Comparison of Mineralogy and Phase Relation of Blueschists from the North Cascades, Washington, and Greenschists from Otago, New Zeland.– *Bull. Geol. Society of Am.*, 85, 333–344.
- Dimitrijević M. & Dragić D., 1957: The structure of the Kopaonik Granodiorite Massif.– *Vesnik Zav. geol. geofiz. istraž.*, 13, 299–313, Beograd (in Serbian, English summary).
- Dimitrijević M. & Karamata S., 1969: Beitrag zur Entstehungstrage des Granodioritmassivs von Kopaonik (Zentral Serbien).– *Zapiski SGD za 1966. godinu*, 611–613, Beograd (in Serbian, German summary).
- Ćirić A., 1994: Petrology of metasyenites and associated rocks of Gora (northern slopes of the Shara Mt.).– *Magistarska teza, Rud.-geol. fak.*, 1–133, Beograd (in Serbian, English abstract – unpublished).
- Ćirić A. & Milovanović D., 1996: Chemical Composition of the Amphiboles from the Metasyenites of Gora (SW Serbia).– *Geol. anal. Balk. poluos.*, 60/2, 313–328, Beograd (in Serbian and English).
- Hammarstrom J.M. & Zen E-en., 1986: Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer.– *Am. Min.*, 71, 1297–1313.
- Hollister L.S., Grissom G.C., Peters E.K., Stowell H.H. & Sisson V.B., 1987: Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons.– *Am. Min.*, 72, 231–239.
- Fershtater G.B. (Ferštater G.B.), 1990: Empirical hornblende-plagioclase geobarometer.– *Geohim.*, 3, 328–335, Moskva (in Russian).
- Johnson M.C. & Rutherford M.J., 1989: Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks.– *Geology*, 17, 837–841.
- Karamata S., 1975: Geologic evolution of our country from Triassic to Quaternary.– *Radovi Geoinstituta*, 10, 1–15, Beograd (in Serbian, English summary).
- Karamata S., 1977: The origin of igneous rocks of Yugoslavia and their metallogeny.– *Izvest. AN SSSR*, 12, 44–54, Moskva (in Russian).

- Karamata S., 1982: Plate Tectonic Modelling in Tethys-type Realms – Application of Yugoslav Area.– X Jubil. Kongres geol. Jug., 1, 549–566, Budva.
- Karamata S., 1983: Characteristics of plate tectonic in Tethys-type terenes.– Geotek., AN SSSR, 6, 52–66, Moskva (in Russian).
- Karamata S. & Djordjević P., 1980: Origin of the Upper Cretaceous and Tertiary magmas in the Eastern part of Yugoslavia.– Bull. de L'Acad. Serbe des Sci., LXXII, 20, 99–108, Beograd.
- Karamata S., Steiger R., Djordjević P. & Knežević V., 1990: New data on the origin of granitic rocks from Western Serbia.– Bull. de L'Acad. Serbe des Sci., CII, 32, 1–9, Beograd.
- Knežević V., 1992: Petrološka studija tercijarnih magmatskih stena planine Cer u zapadnoj Srbiji.– Rud.–geol. fak., MKPG, 1–315, Beograd (in Serbian, unpublished).
- Knežević V., Karamata S., Cvetković V. & Peckay Z., 1994: Genetic Groups of the Enclaves in the Granitic Rocks of the Cer Mountain (Western Serbia).– Geol. an. Balk. poluos., 58, 2, 219–234, Beograd (in Serbian and English).
- Maksimović Z. & Jovanović L., 1984: Termic evolution of ultrabasic rocks in the Central and Inner Dinarides (Yugoslavia).– Geohim., 2, 147–159, Moskva (in Russian).
- Maksimović Z. & Jovanović L., 1988: Geothermobarometry and geospeedometry of lherzolites and harzburgites from some ophiolite complexes.– Bull. de L'Acad. Serbe des Sci., XCVIII, 30, 83–95, Beograd.
- Manujlova M.M., Zarubin V.V., Mihajlova Ū.I., 1975: Chemical composition of hornblende and biotite as criteria of depth of granitic rocks formation.– Izv. AN SSSR, 12, 37–49, Moskva (in Russian).
- Matović V., 1998: Technical and petrological features of latites of Fruška Gora Mt.– Magistarska teza, Rud.–geol. fak., 1–231, Beograd (in Serbian, English abstract – unpublished).
- Nikolić T., 1996: Petrologija metamornih ultramafitskih i mafitskih stena u području sela Lovci (Lapovo–Jagodina).– Diplomski rad, Rud.–geol. fak., 1–87, Beograd (in Serbian, unpublished).
- Pantó Gy., Jović V., Főrizs I. & Vukov M., 1988: Genetic significance of REE accessory minerals in granitic rocks.– Vesnik, Geozavod, Ser. A., Geol., 44, 197–213, Beograd.
- Perchuk L.L. & Fed'kin V.V. (Perčuk L.L. & Fed'kin V.V.), 1976: Temperature and gas residue of granitoid rocks formation.– In: Kratz K.O. (Ed.) Termodinamičeskij režim metamorfizma, 97–105, Leningrad (in Russian).
- Radivojević S., 1986: Proučavanje sulikatnih minerala gabro–pegmatita Rastišta na Tari.– Diplomski rad, Rud.–geol. fak., 1–57, Beograd (in Serbian, unpublished).
- Richard L.R., 1995: Minpet.– Mineralogical and Petrological Data Processing System.
- Rutter M.J., Van der Laan S.R. & Wyllie P.J., 1989: Exspermental data for a proposed empirical igneous geobarometer. Aluminum in hornblende at 10 kbar pressure.– Geology, 17, 897–900.
- Stefanović M. & Pavlović Z., 1960: Contribution of the knowledge of petrological characteristics of the granitoid massif of the Mountain of Kopaonik.– Vesnik Zav. geol. geofiz. istraž., Ser. A, 18, 273–304, Beograd (in Serbian, English summary).
- Steiger R. H., Knežević V. & Karamata S., 1989: Origin of some genetic rocks from the southern margin of the Pannonian basin in Western Serbia, Yugoslavia.– Fifth meeting of the European Union of Geosciensis, Strasburg, TERRA Abstract, 1, 52–53, Oxford.
- Vasković N., 1987: Petrogenetic characteristics on Kosmaj monzogranite.– Radovi Geoinstituta, 20, 91–114, Beograd (in Serbian, English summary).
- Vasković N., 1998: Petrology of contact–metamorphic rocks around granitoid massif of Surdulica.– Doktorska disertacija, Rud.–geol. fak., 1–500, Beograd (in Serbian, English abstract–unpublished).
- Vukov M., 1988: Chemistry of Petrogenic Minerals from Željnj Granitoid Pluton.– Geol. an. Balk. poluos., 52, 447–480, Beograd (in Serbian, English summary).
- Vukov M., 1989: Petrologija i geoemija granitoida Željnjina.– Doktorska disertacija, Rud.–geol. fak., 1–500, Beograd (in Serbian, unpublished).
- Vukov M., 1990: PT–conditions of crystallisation of the Željnj granitoid.– XII Kongres geologa Jugoslavije, II, 188–197, Ohrid (in Serbian, English summary).
- Vukov M., 1995: Genetic and Geotectonic Types of Željnj Granitoids (Yugoslavia).– Geol. an. Balk. poluos., 59/2, 299–326, Beograd (in Serbian and English).

- Vukov M. & Terzić M., 1992: Metamorphic Origin of Željin Gabro-diorite.– Ibid., 56/1, 285–297, Beograd (in Serbian and English).
- Vukov M. & Milivojević M., 1993: The First Finding of Tertiary Tonalite in Mačva.– Ibid., 57/1, 309–321. Beograd (in Serbian and English).
- Vukov M. & Milovanović D., 1993: Lamprophyre of Mačedonce at Medvedja.– Ibid., 57/2, 239–256, Beograd (in Serbian and English).

## РЕЗИМЕ

### ХЕМИЗАМ АМФИБОЛА И ГЕОБАРОМЕТРИЈА ИНТЕРМЕДИЈАРНИХ И КИСЕЛИХ СТЕНА СРБИЈЕ

#### УВОД

Генетски тип (порекло) и геотектонски услови образовања магми, као и физичко–хемијски услови кристализације и старост минерала представљају, поред петрографских, фундаменталне (логичне и међусобно зависне) карактеристике магматских стена. Проученост физичко–хемијских услова кристализације магматских стена Србије је релативно скромна (Maksimović & Jovanović, 1984, 1988, Vukov, 1989, 1990; Vasković, 1998), углавном због слабе проучености коегзистентних минерала, тј. њиховог хемизма (на основу којих се и изводе ови закључци). Нешто је веће познавање генезе и геотектонских услова образовања магми, посебно оних из којих су образовани млађи интермедијарни и кисели калкоалкални плутони, на пример: **Космаја** (Vasković, 1987), **Полумира** (Panto et al., 1988), **Жељина** (Vukov, 1989, 1995), **Цера** (Steiger et al., 1989; Karamata et al., 1990; Knežević et al., 1994), **Борање** (Karamata et al., 1990) и **Сурдулице** (Vasković, 1998). Генетске и геотектонске карактеристике су изведене првенствено из асоцијације петрогених минерала и хемијског састава стена (укључујући садржај изотопа).

Оквир за генетска, геотектонска и физичко–хемијска разматрања магматских стена Србије, укључујући и терцијарне, постављен је на основама нове концепције, тзв. тектонике плоча, као продуката интеракције плоча (микроплоча) литосфере (Karamata, 1975, 1977, 1982, 1983; Karamata & Djordjević, 1980 и др.).

#### АНАЛИТИЧКИ ПОСТУПАК

Израчунавање притиска ( $P_{\text{н.о}}$ ), тј. дубине консолидације магматских стена Србије заснива се на емпиријским и експерименталним путем утврђеној вези између притиска/дубине кристализације и укупног садржаја алуминијума ( $Al^I$ ) у **Са–амфиболима** (Hammarstrom & Zen E-an, 1986; Hollister et al., 1987; Rutter et al., 1989; Johnson & Rutherford, 1989) и расподели алуминије и силиције ( $и/или An\%$  плагиокласа) између коегзистентних **амфибола** и **плагиокласа** (Fershtater, 1990). Анализа обухвата младе – терцијарне интермедијарне и киселе калкоалкалне плутоне Богатића, Цера, Копаоника, Жељина, Голије и Сурдулице, тј. оне за које постоје хемијске анализе амфибола.

У циљу процене применљивости метода анализирана је и геобарометрија заснована на емпиријском амфибол–биотитском пару и амфиболском геобарометру.

Проучене су такође и друге свеже или метаморфисане магматске стене, као и анклаве у истим терцијарним магматитима.

Геобарометрија (и геотермометрија) **амфибол–биотитског** пара се заснива на расподели алкалија  $/(X_{K_2O})=0,5 \times (X_{K_2O}^{Bt} + X_{K_2O}^{Am})$ ,  $X_{K_2O} = K:(K+Na)$ , алуминије у координацији шест –  $Al^{VI} / X_{Al^{VI}} = X_{Al^{VI}}^{Bt} : X_{Al^{VI}}^{Am}$ ,  $X_{Al^{VI}} = Al^{VI} : (Al^{VI} + Fe^{1+} + Mg + Ti)$  и мангана  $X_{Mn} = X_{Mn} : (1 - X_{Mn})^{Bt} \times (1 - X_{Mn}) : X_{Mn}^{Am}$ ,  $X_{Mn} = Mn : (Mn + Fe + Mg)$  између коегзистентних биотита и амфибола (Perchuk & Fed'kin, 1976). **Амфиболски** геобарометар се заснива на кристалохемијском саставу амфибола, тј. дискриминантама:  $Al^{IV}$ ,  $K+Na$  и садржају катјона у положају **A**, према којима се разликују гранитоиди субвулканских (и приповршинских), хипоабисалних, абисалних (и ултраабисалних) услова консолидације (Manujlova et al., 1975).

За потребе овог рада урађено је једанаест анализа амфибола и биотита из гранитоидних стена Копаоника, Голије и Жељина, класичним мокрим путем у лабораторијама ГИ РАН у Москви (табела 1). За разматрања су коришћене и све доступне (публиковане или не) микрохемијске/хемијске анализе амфибола (као и биотита и плагиокласа који са њим асоцирају) из интермедијараних и киселих калкаоалкалних плутона (табеле 2 и 3): гранитоид Жељина (Vukov, 1988), кварц–монцонит Цера (Кнежевић et al., 1994), зрнасти и порфирски гранитоиди Сурдулице (Vasković, 1998), зрнасти и порфирски тоналити Богатића (непубликовано). Разматране су, због индиректне потврде нивоа консолидације, анклаве из плутона: Жељина (Vukov, 1989), Цера (Кнежевић, 1992; Кнежевић et al., 1994) и Сурдулице (Vasković, 1998). Анализирани су и позиције базичних, ултрабазичних и жичних стена из габродиорита Копаоника (непубликовано), габродиорита Жељина (Vukov & Terzić, 1992), габро–пегматита Растишта на Тари (Radivojević, 1986); метаморфисаних оливин–габрова – село Ловци, Лапово–Јагодина (Nikolić, 1996); метаморфисаних ултрамафита и габроида код Мајданпека (непубликовано); порфиرويدних метасијенита Горе – Шар планина (Čirić, 1994; Čirić & Milovanović, 1996); лампрофира Маћедонца – Медвеђа (Vukov & Milovanović, 1993) и холокристалстих вулканита – латита Фрушке Горе (Matović, 1998).

Све коришћене хемијске анализе минерала су, без обзира на изворну литературу, једнообразно прерачунате употребом рачунарског софтвера (Richard, 1995) на кристалохемијске формуле: амфибол на  $O=23$  (13–CNK), биотит на  $O=22$  (14–CNK) и плагиоклас на  $O=32$ . Због оскудног броја анализа биотита и самим тим мале поузданости  $Am-Bt$ –геобарометрије, нисмо посебно утачњавали кристалохемијску формулу овог минерала. Укупно гвожђе ( $Fe^{O1}$ ) у анализама где је дато  $Fe_2O_3$ , прерачунато је преко израза  $Fe^{O1} = FeO + Fe_2O_3 \times 0,89981$ , док су дубине израчунате преко израза  $h(km) = 3,5 \times Ps$  ( $P_{H_2O}$ ).

## КРИСТАЛОХЕМИЈСКИ САСТАВИ АМФИБОЛА И ПЛАГИОКЛАСА И ДУБИНСКИ НИВО КОНСОЛИДАЦИЈЕ

Дубински ниво образовања гранитоидних стена Србије израчунат према кристалохемијском садржају алуминије ( $Al^I$ ) у Са–амфиболима (табела 2, сл. 1) и емпиријских критеријума (Hammarstrom & Zen E-an, 1986; Hollister et al., 1987; Johnson & Rutherford, 1989) солидно је сагласан са резултатима добијеним на

основу расподеле алуминије и силиције између коегзистентних амфибола и плагио-класа (табела 2, сл. 2) и одговарајућих критеријума (Fershtater, 1990), при чему је највећа сагласност последњег са изразом  $P(0,5 \text{ kbar})=4,23 \times Al^1-3,46$  (Johnson & Rutherford, 1989), а посебно за веће притиске (табела 3).

Извршеном анализом дубинског нивоа образовања, односно општег унутрашњег притиска при консолидацији, проучаваних углавном младих гранитоидних стена Србије, а поред најчешће скромног броја анализа, могу се донети бројни закључци углавном сагласни са геолошко–петролошким чињеницама.

Од проучаваних плутона у најдубљим нивоима, на дубини од око 17,5 km и  $P \approx 5 \text{ kbar}$  (табела 3), образовани су кварц–монцонити **Цера** (Cr–qm) – старија реоморфно – интрузивна фаза, као и кварциоритско–тоналитске стене **Жељина** (Že–sr). Последње су током издизања, судећи по различитим типовима шлира (šs – светлих, št – тамних, š – тракастих), трпеле дуготрајне и вишефазне касномагматске и постмагматске трансформације (вероватно под утицајем заосталих и принетих флуида) све до одговарајућих умерених дубина од око 10–11 km и при  $P=3,2 \text{ kbar}$ . Под утицајем истих флуида образовани су, при  $P=3,7 \text{ kbar}$ , и метасоматски габродиорити (gd) који граде сочиво у највишем ендоконтактном делу плутона (Vukov & Terzić, 1992). Састав анклава из жељинских стена указује да су оне хомогенизоване при  $P=4,9 \text{ kbar}$ , те да вероватно представљају резидуални остатак заостао при образовању жељинске магме, за разлику од анклава из кварц–монцонита Цера ( $P=1 \text{ kbar}$ ,  $h=3,5 \text{ km}$ ) за које немамо логично геолошко објашњење.

У плићим дубинским нивоима, од првих, консолидовани су полифазни и поли-типни вулканско–плутонски комплекси Сурдулице, Копаоника, Богатића и Голије, које углавном и индиректно потврђују и њихове геолошко–петролошке и металогенетке карактеристике.

Од стена **копаоничког** комплекса, изузимајући габродиорит, у највећим дубинама при  $P=3,2 \text{ kbar}$ , образовани су зрнасти гранитоиди (Kr–z); затим при  $P=2,7 \text{ kbar}$  жичне стене (Kr–ž); док су порфиرويدни типови (Kr–pi) образовани у најплићим нивоима и то при  $P=1,4 \text{ kbar}$ , сагласно мишљењу о њиховом метасоматском пореклу (Dimitrijević & Dragić, 1957; Stefanović & Pavlović, 1960, Dimitrijević & Karamata, 1969). Значајно је да су жице габродиорита Копаоника (Kr–gd) консолидоване на већим дубинама, при  $P=3,6 \text{ kbar}$ , у односу на друге копаоничке фазе. Те дубине су иначе блиске дубинама на којима су образовани габродиорити Жељина (Že–gd) и Сурдулице (Sr–gd).

Магматске стене **сурдуличког** комплекса образоване су слично копаоничким, али са ширим интервалом дубина (и старости). У највећим дубинама образовани су базичнији претходници, присутни као анклаве (Vasković, 1998), прво тоналити (Sr–t/a) а потом и габродиорит (Sr–gd/a), и то при  $P=3,6 \text{ kbar}$ , односно  $P=3,3 \text{ kbar}$ . У најплићим нивоима образовани су гранодиорити при  $P=1,1 \text{ kbar}$  (Sr–gnd), а присутни као "анклаве" (Sr–gnd/a) при  $P=0,5 \text{ kbar}$ . Израчунатој дубини консолидације кварц–монцонита (Sr–qm) –  $P=2,1 \text{ kbar}$ , донекле противурече геолошке чињенице, јер се сматрају најмлађом фазом (Vasković 1998) која би због тога требала бити и најплића.

**Тоналити Богатића** образовани су при  $P=2,6 \text{ kbar}$  – зрнасти типови (Bg–z), док су порфирски типови (Bg–ž) образовани знатно касније у плићим дубинским



нивоима при  $P=0,1$  kbar, вероватно као жице, јер је први (z) набушен на 1.416-ом метру, а други (ž) у првом на 1.500-ом метру дубине (Vukov & Milivojević, 1993).

**Кварцмонцити Голије** (Gl) образовани су при  $P=3,5$  kbar, али би за целовитије сагледавање целог комплекса обавезно требало детаљно анализирати минерале кварц-монцитита као и минерале других фаза и типова стена.

Кристализација метаморфисаних магматских стена које садрже секундарне Са-амфиболе (и/или плагиокласе), затим базичних и ултрабазичних, као и холокристалистих порфирских стена, због специфичних карактеристика и ограничености простора нису предмет проучавања овог рада. Издвајамо, међутим, као интересантне податке добијене за **порфиرويدне метасијните Горе** (Gr-pi), метаморфисане при  $P\approx 7$  kbara (Ćirić, 1994). Према кристалохемијском саставу реликата Са-амфибола и  $Al^I$  (табела 2) консолидовани су врло плитко, при  $P=1,1$  kbar (сл. 1, табела 3). Слична вредност произилази и из односа  $Al:Si$  амфибола и плагиокласа (сл. 2) уз претпоставку да је примарни плагиоклас  $An\approx 50$ .

**Амфибол-биотитски геобарометар.** Израчунати притисци (дубине) при консолидацији магматских стена Србије, добијени на основу потенцијала калије (сл. 3; табеле 2 и 3), тј. редукованог емпиријског амфибол-биотитског геобарометра (Perchuk & Fed'kin, 1976), углавном су (изузимајући тоналите Богатића) знатно виши (и преко 3 kbara) од истих опредељених према геобарометру  $^{Am}Al^I$  (Johnson & Rutherford, 1989) и  $^{Pl,Am}Al/Si$  (Fershtater, 1990), али је редослед образовања типова унутар комплекса сагласан првим. Овај геобарометар изискује врло прецизно утањивање кристалохемијске формуле и опрезну интерпретацију због често присутне калијске метасоматозе и биотитизације амфибола у нашим гранитоидним стенама. У нашим анализама вероватно је присутна и грешка због недовољно чистих концентрата анализираних минерала, посебно из стена са Голије и Копаонка (Кр-з).

**Амфиболски геобарометар.** Релативни нивои консолидације гранитоидних стена опоределиени према различитим параметрима, тј. према садржају  $Al^{IV}$  (сл. 1, табела 2), суми  $Na+K$  и катјона у позицији А (табела 2) и амфиболском геобарометру (Manujlova et al., 1975), углавном су међусобно сагласни. Објашњења појединачних одступања у овом тренутку немају већу специфичну тежину, јер постојеће анализе по квантитету и квалитету најчешће нису репрезентативне (изузимајући жељинске).

## ЗАКЉУЧАК

Према извршеној анализи постоји солидна сагласност израчунатих дубина/притиска консолидације гранитоидних стена Србије према амфиболском геобарометру, тј. садржају укупне алуминије ( $Al^I$ ) и израза  $P(\pm 0,5 \text{ kbar})=4,23 \times Al^I - 3,46$  (Johnson & Rutherford, 1989) као и амфибол-плагиокласног геобарометра и расподеле силиције и алуминије  $^{Bl,Am}(Al:Si)$  између коегзистентних минерала (Fershtater, 1990). Редослед консолидације појединих фаза унутар различитих магматских комплекса, опредељен према амфибол-биотитском геобарометру (Perchuk & Fed'kin, 1976) и потенцијалу, калије ( $^{Bl,Am}X_{K_2O}$ ), сагласан је претходном, али су израчунати притисци углавном знатно виши.

Према првим критеријумима у најдубљим нивоима ( $h>17$  km) образовани су кварц-монцити Цера (старија реоморфна фаза) и гранитоидне стене Жељина. У

умереним нивоима образоване су стене Сурдулице, почев од раних фаза тоналитског ( $h \approx 13$  km) и габродиоритског ( $h \approx 11,5$  km) састава, потом кварц–монцонитске стене ( $h \approx 7$  km). У истим нивоима образовани су и кварц–монцонити Голије ( $h \approx 12$  km), зрнасти тоналити Богатића ( $h \approx 9$  km) и гранитоидне стене Копаоника, по следу од зрнастих ( $h \approx 11$  km), преко жичних ( $h \approx 9$  km) до порфиرويدних ( $h \approx 5$  km) типова. У најплићим дубинским нивоима ( $h < 2$  km) очврсли су порфирски тоналит Богатића и најмлађе гранодиоритске стене Сурдулице.