

# Алтерације перидотита контролисане карактером флуида на примеру харцбургита Рудника - Серпентинизација или талкизација?

Стефан Петровић, Наталија Батоћанин



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Алтерације перидотита контролисане карактером флуида на примеру харцбургита Рудника - Серпентинизација или талкизација? | Стефан Петровић, Наталија Батоћанин | Записници српског геолошког друштва | 2020 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0005652>

# ЗАПИСНИЦИ СРПСКОГ ГЕОЛОШКОГ ДРУШТВА

за 2019. ГОДИНУ

COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE LA SOCIÉTÉ SERBE DE GÉOLOGIE

pour les années 2019

REPORTS OF THE SERBIAN GEOLOGICAL SOCIETY

for the year 2019

Beograd, 2019.

Стефан Петровић<sup>1</sup>, Наталија Батоћанин<sup>2</sup>  
Stefan Petrović<sup>1</sup>, Natalija Batoćanin<sup>2</sup>

## АЛТЕРАЦИЈЕ ПЕРИДОТИТА КОНТРОЛИСАНЕ КАРАКТЕРОМ ФЛУИДА НА ПРИМЕРУ ХАРЦБУРГИТА РУДНИКА – СЕРПЕНТИНИЗАЦИЈА ИЛИ ТАЛКИЗАЦИЈА?

### THE ALTERATION STYLE IN PERIDOTITES CONTROLLED BY FLUID CHARACTER USING HARZBURGITES FROM RUDNIK AS THE EXAMPLE – SERPENTINIZATION OR TALCIZATION?

(ЗБОР-SESSION, 12.12.2019.)

ОРИГИНАЛНИ НАУЧНИ РАД – TRAVAIL SCIENTIFIQUE – RESEARCH PAPER

**Апстракт.** У раду су приказани резултати испитивања серпентинисаних харцбургита Брђана (43°58'45,1" СГШ, 20°25'12,6" ИГД) и талкизираних харцбургита откривених у интервалу 429-559,8 м у истражној бушотини 330А/18 (44°07'33,2" СГШ, 20°30'28,5" ИГД) на Руднику. Узорци оба доломита показују карактеристике резидуалних харцбургита из омотача, односно тектонита; лепидобластичне, бластохрнате, или порфирокластичне структуре и масивне текстуре. Серпентинисани харцбургити и серпентинити Брђана су изграђени од серпентина, ретких реликата оливина и ортопироксена, акцесорног спинела, и веома ретког секундарног магнезита и магнетита. Најдоминантнији састојак (местимично гради и преко 80 % вол. стене) је високомагнезијски серпентин, средњег састава  $[(Mg_{10,66}Fe^{2+}_{1,04})_{11,70}(Fe^{3+}_{0,06}Al_{0,03}Si_{7,94})_{8,03}O_5(OH)_4]$ . Присуство реликата оливина и ортопироксена указује да се серпентинизација одвијала на нижим температурама (<400°C) деловањем водених раствора. Низак садржај алуминијума (0,00-0,03 *a.p.f.u.*) потврђује овакво гледиште. У харцбургитима Рудника, за разлику од харцбургита Брђана, преовлађује секундарни талк, скоро идеалног састава:  $[Mg_{2,98}Fe_{0,03}Si_{3,98}O_{10}(OH)_2]$ . Харцбургити Рудника су изграђени од оливина (форстерит средњег састава  $Fe_{90,42}Fa_{9,58}$ ) и ромбичних пироксена који су потпуно замењени талком. Моноклинични пироксен, аугит-диопсид, средњег састава  $En_{71,4}Wo_{26,3}Fs_{2,3}$  је присутан у ниским садржајима у форми ексолуционих ламела у ромбичним пироксенима. Редак серпентин, средњег састава  $[(Mg_{9,46}Fe^{2+}_{0,49})_{9,95}(Cr^{3+}_{0,31}Al_{1,81}Si_{6,06})_{8,18}O_5(OH)_4]$  настао је на рачун оливина. Доминантан талк се појављује у влакнастим и радијалним агрегатима или гради траке. Кристалише у широком опсегу температура, али је његово образовање само на рачун ромбичних пироксена по реакцији:  $3MgSiO_3 + H_2O + SiO_2 = Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ , захтевало силицијом богате флуиде какве су највероватније донели дајкови и плитке интрузије кварцлатита. Температура флуида је, обзиром на асоцијацију минерала: форстерит + талк, била изнад 490°C. Повишен садржај алуминијума (>3 *a.p.f.u.*) у серпентину потврђује ово гледиште. Остаје отворено питање да ли су талкизирани перидотити индикатори близине киселих магматских стена? Серпентинисани перидотити то свакако нису.

<sup>1</sup> Универзитет у Београду, Географски факултет, Студентски трг 3/III, Београд, Србија; University of Belgrade, Faculty of Geography, Studentski trg 3/III, 11000 Belgrade, Serbia

<sup>2</sup> Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Ђушина 7, 11000 Београд, Србија; University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, Djusina 7, 11000 Belgrade, Serbia  
e-mail: natalijabatocanin@yahoo.com

**Кључне речи:** Рудник, Брђани, харцбургити, серпентинити, талк

**Abstract.** This paper presents results obtained by studying of serpentinized harzburgites from Brdjani (43°58'45.1" N 20°25'12.6" E) and the core samples of talcized harzburgites in the 429-559.8 m interval in the exploration borehole 330A/18 (44°07'33.2" N, 20°30'28.5" E) on the Rudnik Mts. Samples from the both localities display features of residual mantle harzburgites, i.e. tectonites and lepidoblastic, blastogranular or porphyroclastic texture and massive structure. Serpentinized harzburgites and serpentinites from Brdjani consist of serpentine, scarce relics from olivine and orthopyroxene, accessory spinel and very seldom secondary magnesite and magnetite. The prevailing constituent (sporadically makes over 80 % rock volume) is magnesium-rich serpentine of the avg. composition  $[(\text{Mg}_{10.66}\text{Fe}^{2+}_{1.04})_{11.70}(\text{Fe}^{3+}_{0.06}\text{Al}_{0.03}\text{Si}_{7.94})_{8.03}\text{O}_5(\text{OH})_4]$ . The remained relics of olivine and orthopyroxene suggest on serpentinization process under the action of aqueous solutions whose temperature was below 400°C. The low alumina content (0.00-0.03 *a.p.f.u.*) supports such statement. In harzburgites from Rudnik, in respect to those from Brdjani, prevails secondary talc of almost ideal composition:  $[\text{Mg}_{2.98}\text{Fe}_{0.03}\text{Si}_{3.98}\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$ . These harzburgites are made of olivine (forsterite of average composition  $\text{Fo}_{90.42}\text{Fa}_{9.58}$ ) and orthopyroxene, which are almost entirely replaced by talc. Clinopyroxene, augite–diopside ( $\text{En}_{71.42}\text{Wo}_{26.32}\text{Fs}_{2.24}$  in average) are low abundant and commonly occurs as exsolution lamellas in orthopyroxene. Scarce serpentine derived after olivine. The most abundant constituent, talc, appears either in fibrous and radiating clusters or forms bands. Talc crystallizes in a wide temperature range but its formation only on account orthopyroxene following reaction:  $3\text{MgSiO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2 = \text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ , requires silica-rich fluids that were brought most probably by quartzlatite dykes and shallow intrusions. According to coexisting forsterite and talc, the temperature of fluids had to be at least 490°C. The elevated alumina content ( $>3$  *a.p.f.u.*) in serpentine supports such statement. Are such talcized peridotites indicative for the vicinity of acid igneous bodies remained an open question? Nevertheless, the serpentinized peridotites are certainly not.

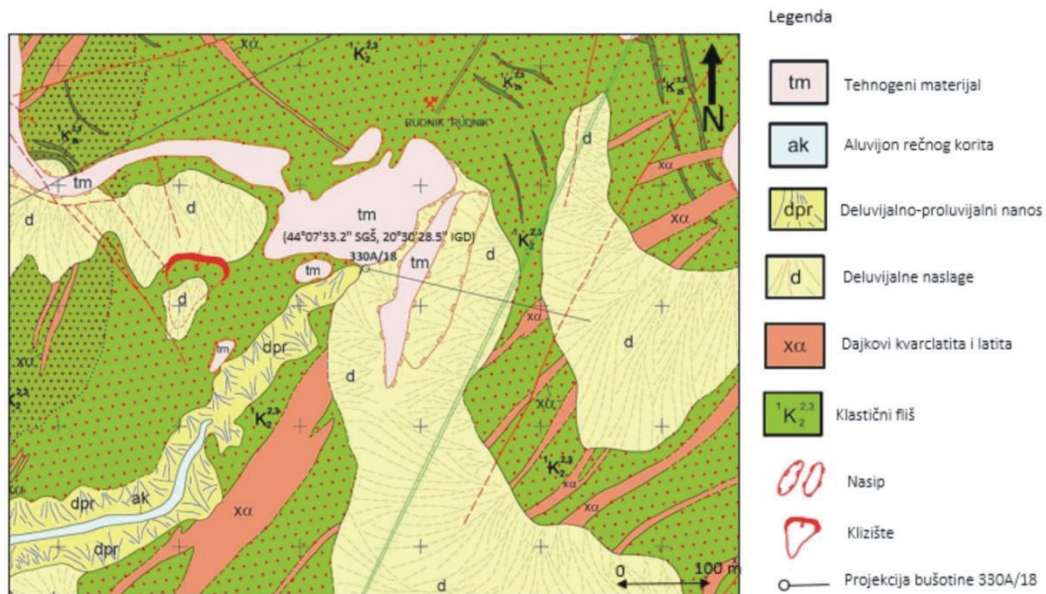
**Key words:** Rudnik, Brdjani, harzburgite, serpentinite, talc

## УВОД

Током 2018. године, истражним бушењем у експлоатационом пољу рудника "Рудник" констатоване су ултрабазичне стене. Картирањем бушотине 330А/18 (Сл. 1), из које су узети узорци за испитивања, издвојене су три литолошке јединице: грубокластичне слабо метаморфисане седиментне стене, контактено измењене стене (корнити и скарнови), и киселе и ултрабазичне магматске стене. Грубокластичне стене представљене су делимично метаморфисаним пешчарима и конгломератима у којима је очувана примарна структура протолита. Смена корнита и скарнова је најзаступљенија литолошка јединица, пресечена је апофизама и дајком кварцлатита. Испод ове јединице, на 429. метру су констатовани перидотити у оквиру којих је и завршена истражна бушотина на дубини од 560 метара.

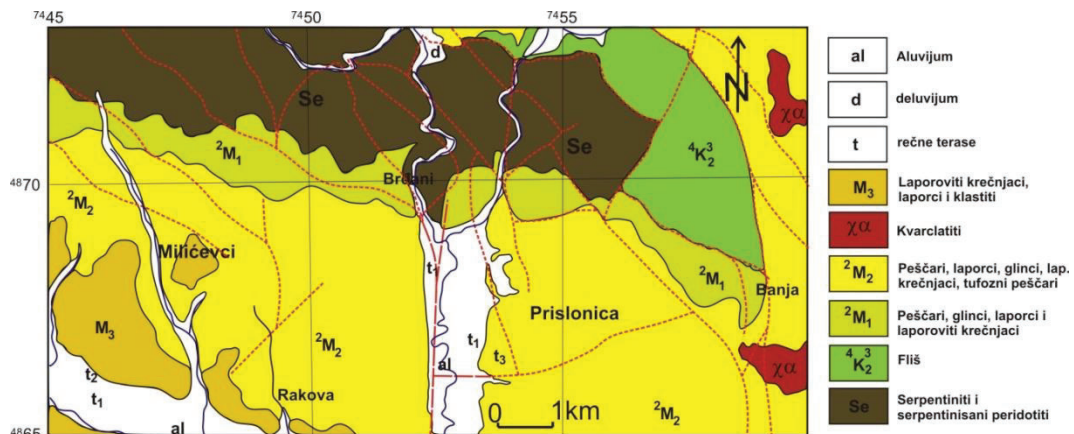
Перидотити су интензивно метаморфисани-талкизирани у целој бушотини. Интензитет талкизације расте са дубином, па се делимично свежи перидотити могу пронаћи једино на мањим дубинама. У циљу поређења састава и порекла (тектонити или стене океанске коре), са посебним акцентом на врсту алтерација у перидотитима, узети су и узорци серпентинисаних перидотита недалеко од места Брђани, на око 15 километара југозападно од Рудника (Сл. 2).

Брђани су смештени у клисури реке Деспотовице између два терцијарна седиментна басена: Горњемилановачког на северу и Чачанског на југу. Са обе стране реке Деспотовице се уочавају велике масе серпентинита и серпентинисаних перидотита, које су трансгресивно прекривене средњомиоценском седиментно-вулканогеном серијом. Испитиване стене део су перидотитских комплекса Маљена и Сувобора, који су изграђени претежно од харцбургита.



Слика 1. Пројекција бушотине 330А/18. Детаљ са геолошке карте лежишта Рудник (ЂОКОВИЋ *et al.*, 2014).

Figure 1. Projection of the borehole 330A/18. Detail from the geological map of the Rudnik deposit (ЂОКОВИЋ *et al.*, 2014).



Слика 2. Геолошка карта ширег подручја Брђјана. Детаљ са ОГК 1:100.000, лист "Чаџак"- К 34-5 (БРКОВИЋ *et al.*, 1970).

Figure 2. Geological map of the broader area of the locality Brđjani. Detail from the Basic Geological Map 1:100.000, sheet "Čačak"- K 34-5 (BRKOVIĆ *et al.*, 1970).

Подређени су лерзолити, верлити, дунити и фелдспат-перидотити (BRKOVIĆ *et al.*, 1978). Стене су у подручју Маљена серпентинисане у мањем или већем степену, а у области Сувобора највећим делом прелазе у серпентините (FILIPOVIĆ *et al.*, 1978).

У раду је извршена упоредна анализа узорака са Рудника и из Брђјана, дефинисан је минерални састав стена и утврђено порекло перидотита. Након разматрања потребних услова за процесе талкизације, односно серпентинизације изведени су прелиминарни закључци.

## МАТЕРИЈАЛ И МЕТОДЕ

За потребе овог рада примењена су теренска и лабораторијска испитивања. У току теренских испитивања узета су четири репрезентативна узорка из бушотине са Рудника у интервалу 480-498 m и два узорка са површине на локалитету Брђани.

Лабораторијска испитивања укључила су:

- одредбу минералног састава и склопа одабраних узорака оптичким испитивањима на поларизационом микроскопу Leica DMLSP, који је повезан са камером Leica DFC290 HD преко програма LAS V4.1;

- у циљу детаљнијих података о присутним минералним фазама примењене су SEM-EDS (*Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive Spectroscopy*) анализе у лабораторији за скенирајућу електронску микроскопију коришћењем електронског микроскопа типа JEOL JSM-6610LV који је повезан са енерго-дисперзионом спектрометром типа X – *Max Large Area Analytical Silicon Drift (Oxford)* у условима високог вакуума. Површине полираних препарата су претходно напарене проводничким слојем угљеника на напаривачу типа BALTEC – SCD – 005, и

- истраживања рендгенском дифракцијом на праху (XRPD) спроведена су помоћу аутоматског вишенаменског рендгенског дифрактометра Rigaku Smartlab у  $\theta$ - $\theta$  (узорак у хоризонталном положају) парафокусној Браг-Брентановој геометрији, користећи D/teX Ultra 250 стрип детектор у 1D стандардном моду са  $\text{CuK}_{\alpha 1,2}$  извором зрачења ( $U = 40 \text{ kV}$  и  $I = 30 \text{ mA}$ ). Узорак је припремљен у носачу узорка од монокристала силицијума да би се снизио шум. Рендгенски дифрактограм је прикупљен у угаоном опсегу  $5\text{-}75^\circ 2\theta$ , са кораком  $0,01^\circ$ , и брзином прикупљања података од  $5^\circ/\text{min}$ . Кристалне фазе су идентификоване помоћу наменског Rigaku PDXL 2.0 програмског пакета (са инсталираном ICCD PDF-2 2016 базом података).

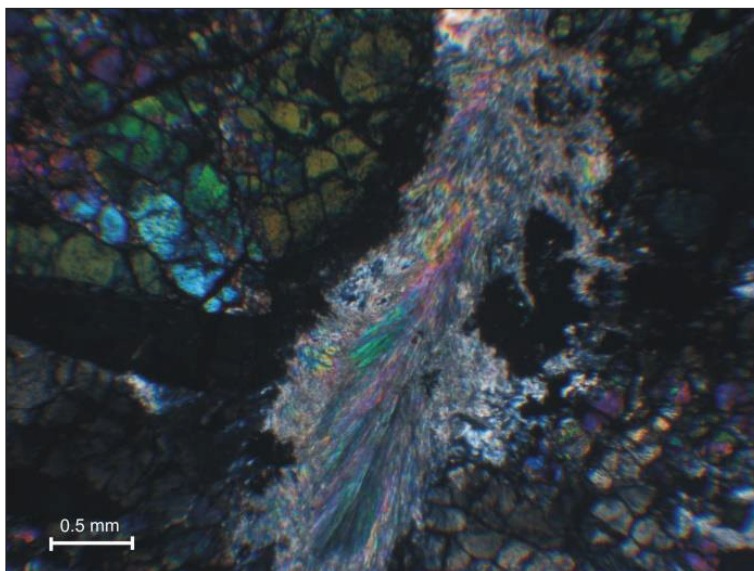
Сва лабораторијска испитивања обављена су на Департману за минералогiju, кристалографију, петрологију и геохемију Рударско-геолошког факултета, Универзитета у Београду.

## РЕЗУЛТАТИ

Харцбургити Рудника су стене тамносиве, скоро црне боје, масивне текстуре. Структура је бластозрнаста са елементима лепидобластичне и порфинокластичне. Најзаступљенији минерали су оливин и секундарни талк. Подређено је присуство моноклиничног пироксена, секундарног магнезита, магнетита и реликата ромбичних пироксена. Талк у појединим узорцима гради и до 50% вол. стене. Влакнасте и лепезасте форме овог минерала граде траке, некад повијене, ширине до 8 mm, које се смеђују са тракама густо пакованих кристала оливина (Сл. 3). Талк је скоро идеалног састава:  $[\text{Mg}_{2,98}\text{Fe}_{0,03}\text{Si}_{3,98}\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$  (Deer *et al.*, 1971, 1972; Таб. 1). У појединим узорцима може се уочити и иницијална фаза трансформације ортопироксена у талк.

Оливин се појављује у изометричним, хипидиоморфним до алотриоморфним кристалима, неуједначених димензија, максимално око  $0,8 \times 1,5 \text{ mm}$ . Зрна оливина су испуцала, прожета танком мрежом серпентина и магнетита. У појединим узорцима се могу запазити ротирани зрна која показују таласасто

помрачење, као и псеудоближњење. Оливин одговара форстериту средњег састава  $En_{71,4}Wo_{26,3}Fs_{2,3}$  (Сл. 4).



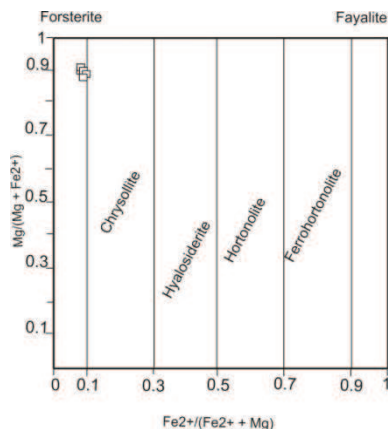
Слика 3. Лепезасто распоређен влакнасти талк између густо пакованих кристала оливина  
Figure 3. Fan-shaped distributed fibrous talc between the closely mingled olivine crystals

Табела 1. Хемијски састав талка и структурна формула на бази 11(O)  
Tabela 1. Composition of talc and structural formulae based at 11(O)

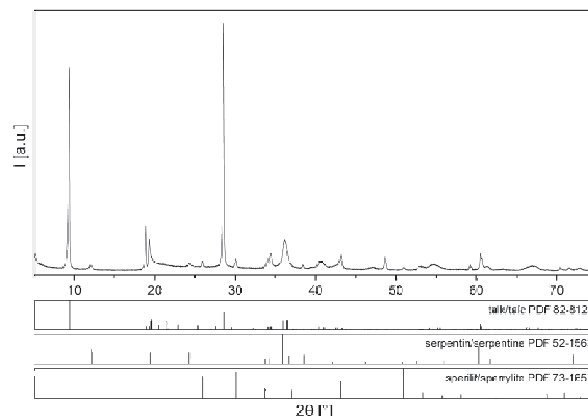
	1	2
SiO <sub>2</sub>	62.23	59.71
FeO	0.55	0.79
MgO	31.13	29.93
Σ	93.91	90.43
Si	3.995	3.986
Fe	0.030	0.044
Mg	2.980	2.983

Рендгенском дифракцијом праха је потврђена доминација талка (ICCD PDF картица бр. 82-8124) и знатно мање заступљене кристалне фазе из групе серпентинских минерала, највероватније хризотила (PDF 52-1563). Запажен је металични минерал тесералне симетрије који захтева даља испитивања у циљу тачне одредбе (Сл. 5).

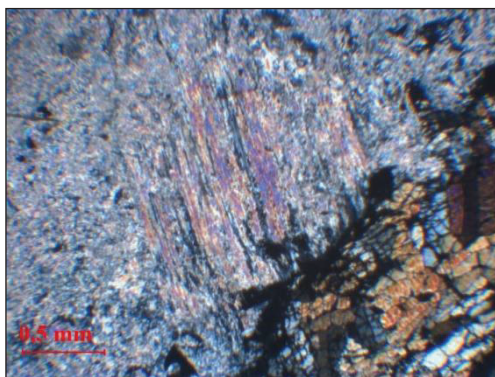
Реликти ортопироксена су веома ретки, као и очуване кристалографске контуре пироксена који су потпуно замењени талком (Сл. 6). Пироксени су „повијени“ што указује на тектоните. Кинк набори, односно деформације се најбоље уочавају у ортопироксенима у којима се у ниским садржајима (<5%) у форми ексолуционих ламела појављује моноклинични пироксен (Сл. 7) који одговара диопсид/аугиту. Акцесорни магнетит је присутан у хипидиоморфним, испуцалим зрнима димензија до 1 x 2 mm. Микропукотине у њима, такође су запуњене талком.



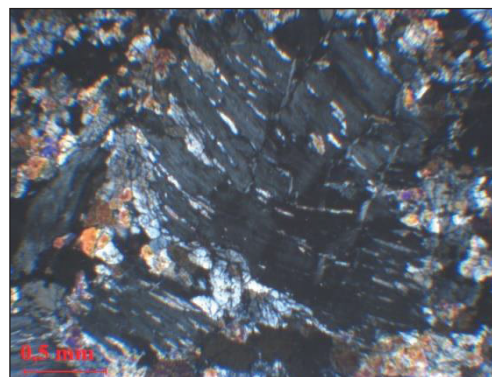
Слика 4. Састав оливина из испитиваних харцбургита Рудника  
Figure 4. Composition of olivine from the studied harzburgites from Rudnik Mts



Слика 5. Дифрактограм испитиваног узорка талкизираног харцбургита са Рудника  
Figure 5. Diffractogram of the analyzed sample of talcized harzburgite from Rudnik Mts

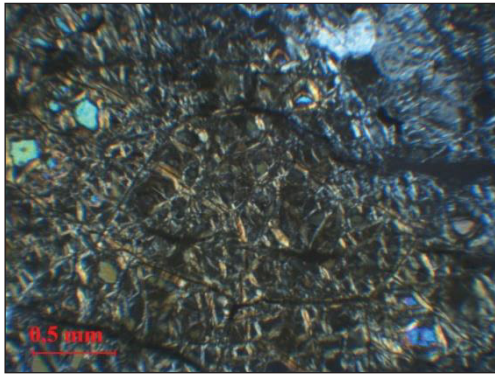


Слика 6. Ортопироксен замењен талком са сачуваном кристалном формом.  
Figure 6. Orthopyroxene replaced by talc with preserved crystal form.



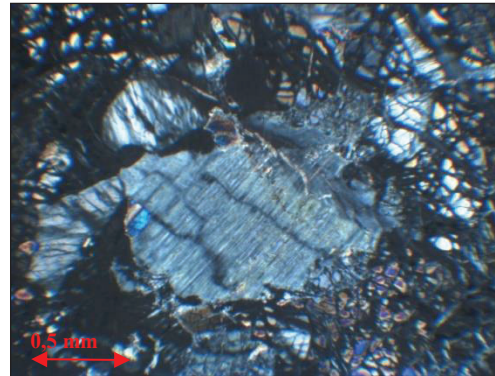
Слика 7. Повијене ексолуционе ламеле аугита по енстатиту.  
Figure 7. Banded exsolution lamellas from augite within the orthopyroxene.

Серпентинити Брђана имају масивну текстуру, док је структура зависно од интензитета серпентинизације бластозрнаста, лепидобластична или порфинокластична. Најзаступљенији минерал је секундарни, мрежаста серпентин, који гради и до 80% вол. стене (Сл. 8). Појављује се у форми листастих агрегата које пресецају танке жилице (ширине до 0,2 mm) влакнастог серпентина, различитих генерација. Серпентин је високомагнезијски. Прорачуном на бази 28 (O) добијен је средњи састав  $[(Mg_{10,66}Fe^{2+}_{1,04})_{11,70}(Fe^{3+}_{0,06}Al_{0,03}Si_{7,94})_{8,03}O_5(OH)_4]$ . Ромбични пироксен је други минерал по заступљености, са учешћем до око 30% вол. стене. Хипидиоморфна зрна овог минерала, некад димензија и изнад 4 mm (порфинокласти), показују карактеристике тектонита и низак степен трансформације у бастит (Сл. 9). Местимично их пресецају танке жице магнезита, ширине од 0,1 до 0,5 mm. Реликти оливина, у занемарљивом садржају, су величине испод 0,1 mm. Акцесорни спинел се појављује у субхедралним, испуцалим кристалима црвенкасто-смеђе боје, максималних димензија 1 x 1,2 mm.



Слика 8. Мрежасти серпентин у серпентиниту Брђана

Figure 8. Typical mesh-structure in the serpentinite sample from Brđjani



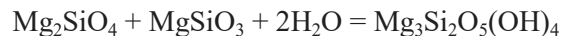
Слика 9. Порфирокласт енстатита у серпентиниту Брђана

Figure 9. Porphyroblast of enstatite in serpentinite from Brđjani

## ДИСКУСИЈА

Серпентинисани харцбургити Брђана су доминантно изграђени од високомагнезијског серпентина,  $[(\text{Mg}_{10,66}\text{Fe}^{2+}_{1,04})_{11,70}(\text{Fe}^{3+}_{0,06}\text{Al}_{0,03}\text{Si}_{7,94})_{8,03}\text{O}_5(\text{OH})_4]$  који местимично гради и око 80% вол. стене. Преовлађује мрежаста серпентин у односу на бастит, а реликти оливина, форстеритског састава и ромбичног пироксена, енстатита су ретки, као и акцесорни спинел. Низак садржај секундарног магнетита и магнезита (~ 5%) упућује на мали проценат фајалитске компоненте у оливину, као и на ниску моларну концентрацију  $\text{CO}_2$  (<0,2) у раствору (TROMMSDORF & EVANS, 1977).

Серпентинизација је аутоматаморфни или хидротермални процес који се одвија у опсегу од <math>100^\circ\text{C}</math> (образовање нискотемпературног лизардита) до око  $500^\circ\text{C}</math>, колико је потребно за антигорит (MARTIN & FYFE, 1970; MOODY, 1976). Најчешће се представља следећом реакцијом:$



Према експерименталним подацима форстерит је стабилан до око  $350\text{--}400^\circ\text{C}$  и замењује се серпентином већ на температурама  $250\text{--}300^\circ\text{C}$ , док промена ромбичних пироксена почиње на  $400^\circ\text{C}$  (EVANS *et al.*, 1976; O'HANLEY, 1996). Очувани кристали енстатита, уз ретке реликте оливина указују на ниже температуре водених раствора који су довели до серпентинизације. Раствори су истовремено били са ниским садржајем силиције, јер би се у супротном образовали талк и тремолит уместо серпентина.

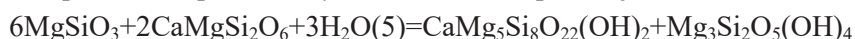
Харцбургити Рудника су већински изграђени од талка и оливина. Моноклинични пироксен, аугитског састава појављује се у форми ексолуционих ламела по ромбичном пироксену. Редак серпентин, вероватно настао на рачун оливина, је средњег састава  $[(\text{Mg}_{9,46}\text{Fe}^{2+}_{0,49})_{9,95}(\text{Cr}^{3+}_{0,31}\text{Al}_{1,81}\text{Si}_{6,06})_{8,18}\text{O}_5(\text{OH})_4]$ . У поређењу са серпентином у харцбургитима Брђана има ниже садржаје Mg и Si, а повишене вредности Al. Према дифракционим подацима највероватније одговара хризотилу. Талк је скоро идеалног састава:  $[\text{Mg}_{2,98}\text{Fe}_{0,03\text{--}0,04}\text{Si}_{3,98\text{--}3,99}\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$  (DEER *et al.*, 1971, 1972). Талк се најчешће и образује на рачун ромбичних пироксена, а не оливина. Процес замене почиње дуж пукотинских система и постепено захвата цео



кристал. Кристалише у широком опсегу температура, али образовање талка контролишу други фактори, првенствено активност силиције у флуиду (MÉVEL, 2003). Деловањем киселих флуида обогачених са SiO<sub>2</sub> и H<sup>+</sup> талк може настати већ на температурама од 300°C (TROMMSDORF & EVANS, 1977; VELDE, 1988)). За минералну асоцијацију, талк + форстерит (који је остао непромењен), су исти аутори утврдили да је стабилна до 490°C. Деловањем раствора нижих температура (испод 470°C) дошло би и до промене оливина, па би се уз талк образовао и серпентин по реакцији:



За образовање тремолита уместо талка, по реакцији:



потребни су флуиди са Ca и Fe, или силицијом богати флуиди чија температура је испод 470°C (VELDE, 1988; O'HANLEY, 1996).

Наведена асоцијација у харцбургитима Рудника потврђује да је талк настао деловањем киселих и загрејаних флуида искључиво на рачун ромбичних пироксена по реакцији:



## ЗАКЉУЧАК

Серпентинисани харцбургити Брђана и талкизирани харцбургити Рудника (узорци из истражне бушотине 330А/18) су лепидобластичне, бластозрнасте или порфиорокластичне структуре. Показују деформације карактеристичне за рефракторне харцбургите из омотача: повијање пироксена (кинк набори) и псеудоближњење оливина. Почетни састав стена са оба локалитета био је исти: оливин + енстатит. Деловање раствора различитог хемизма и температура довело је до сасвим другачијих трансформација. Харцбургити Брђана су интензивно серпентинисани деловањем водених, нискозагрејаних раствора, док су топли и силицијом богати флуиди у харцбургитима Рудника довели до интензивне талкизације. Остаје отворено питање, да ли су талкизирани харцбургити показатељи близине магматског тела за које такви јувенилни флуиди једино могу генетски бити везани?

*Захвалност. Рад је подржан средствима Министарства науке и технологије републике Србије, Пројекти 176019 и 176016.*

## THE ALTERATION STYLES IN PERIDOTITES CONTROLLED BY FLUID CHARACTER USING HARZBURGITES FROM RUDNIK AS THE EXAMPLE – SERPENTINIZATION OR TALCIZATION?

### INTRODUCTION

Ultrabasic rocks in the exploited field of the mine Rudnik were accessed by exploration boreholes in 2018. Samples for further studies were taken from the borehole 330A/18 (Fig. 1) where three lithological units were distinguished: coarse-grained

weakly metamorphosed sedimentary rocks, contact-metamorphic rocks (hornfels and skarn), and acid and ultrabasic igneous rocks.

Low-grade metamorphosed coarse-grained rocks include sandstones and conglomerates of preserved primary protolith textures. The alternation of skarn and hornfels represents the most abundant lithology. It is cut by apophyses and a quartzlatite dike. Below this unit, at depth of 429 m appear ultrabasic rocks. The borehole terminated in these rocks at 560 m. Ultrabasic rocks are intensively metamorphosed-talcized displaying the downward increase in metamorphic degree. Thus, the partly preserved rocks may be found only in shallower levels.

In aim to determine their composition and origin (mantle or ocean crust), and particularly the type of alteration, the samples from serpentinized peridotites near the Brdjani locality were taken, too (Fig. 2).

Brdjani is placed approximately 15 km southwestern from Rudnik, between two Tertiary sedimentary basins: Gornji Milanovac at north, and Čačak basin at south. Huge masses of serpentinites and serpentinized peridotites occur on both sides of the river Despotovica, being transgressively overlying by Middle Miocene sedimentary-volcanogenic series. The studied rocks are parts of the Maljen and Suvobor massifs, which are dominantly built by harzburgites. Lherzolite, verlite and dunite are subordinated, whereas feldspar-peridotites are extremely limited. All rocks are more or less serpentinized in the Maljen massif and almost completely transformed into serpentinites in the Mts. Suvobor.

Mineral composition and the source of samples from Brdjani and Rudnik were determined, along with their comparison. The required conditions and factors for intensive talcization or serpentinization were discussed and postulated.

## MATERIALS AND METHODS

This paper discusses results from both the field and the laboratory investigations. During field work representative samples were taken. Four samples were taken from the drilled borehole from Rudnik (interval 480-498 m) and two samples were taken from the surface in the locality Brđani.

The laboratory examinations included:

- Determination of mineral composition and fabric in selected samples by the optical investigations under the Leica DMLSP petrographic microscope, which is connected with the digital camera Leica DC 300 over the program LAS V4.1;

- The chemical compositions of mineral phases were identified using a JEOL JSM-6610LV Scanning Electron Microscope that is connected to an X-Max Energy Dispersive Spectrometer. The samples were covered with carbon using a BALTEC-SCD-005 Sputter coating device. The results were recorded under high vacuum conditions with an accelerating voltage of 20 kV and a beam current of 0.5-1.8 nA, and

- The X-ray powder diffraction (XRPD) investigation was conducted on automated multipurpose Rigaku Smartlab X-ray Diffractometer in  $\theta$ - $\theta$  (the sample in horizontal position) parafocusing Bragg-Brentano geometry using D/teX Ultra 250 strip detector in 1D standard mode with  $\text{CuK}_{\alpha 1,2}$  radiation source ( $U = 40$  kV and  $I = 30$  mA). The low background silicon sample holder was used. The XRPD pattern was collected in  $5-75^\circ 2\theta$ , with step of  $0.01^\circ$ , and data collection speed of  $5^\circ/\text{min}$ . The crystal phases were identified in dedicated Rigaku PDXL 2.0 software (with implemented ICDD PDF-2 2016 database).

All investigations were performed at the Department of Mineralogy, Crystallography, Petrology and Geochemistry at the Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade.

## RESULTS

Harzburgites from the Rudnik Mts. display dark grey, i.e. almost black color and massive structure. Texture is blastogranular with elements of lepidoblastic and porphyroclastic. The most abundant minerals are talc and olivine. Relics of orthopyroxene, clinopyroxene and secondary magnesite and magnetite, as well as the opaque accessories are subordinated. Talc is occasionally making up to 50 vol. % of rocks. Fibrous and fan-shaped talc are distributed in bands up to 8 mm thick, which alternate with bands of closely mingled olivine crystals (Fig. 3). Talc is almost of ideal composition (DEER *et al.*, 1971, 1972; Tab. 1). In some samples could be recognized the initial phase of orthopyroxene replacement by talc.

Olivine appears in isometric, subhedral to anhedral crystals of different size, maximally about 0.8 x 1.5 mm. Olivine crystals are cracked, penetrated by thin serpentine and magnetite mesh. Rotated grains displaying undulatory extinction, as well as pseudo twins are also recognized. Olivine is forsterite of average composition:  $\text{En}_{71.4}\text{Wo}_{26.3}\text{Fs}_{2.3}$  (Fig. 4).

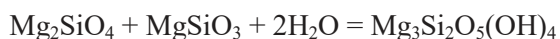
The XRPD analyses confirmed the domination of talc (ICCD PDF card no. 82-8124) and the presence of significantly less abundant crystal phase from serpentine group of minerals (probably chrysotile, PDF 52-1563). Cubic opaque mineral was also observed. Further investigations are necessary for precise determination of mineral specie (Fig. 5).

Relic orthopyroxene grains are very scarce, along with completely replaced pyroxene of preserved crystal forms (Fig. 6). Bent pyroxene suggests on tectonites. Kink banding is best recognized in orthopyroxene with exsolution lamellas of clinopyroxene, diopside/augite (Fig. 7). The latter is low abundant (<5%). Accessory opaque minerals occur in subhedral grains up to 1 x 2 mm in size. Precise determination of identified opaque mineral of cubic symmetry requires further investigations.

Serpentinites from Brdjani display massive structure. Their texture depends from the intensity of serpentinization and varies from blastogranular, to lepidoblastic or porphyroclastic. The most abundant mineral is secondary mesh serpentine, frequently about 80 vol. % abundant (Fig. 8). Serpentine occurs in lathy aggregates, which are cut by thin veinlets (up to 0.2 mm thick) of fibrous serpentine of different generations. Serpentine is magnesium-rich variety of average composition  $[(\text{Mg}_{10.66}\text{Fe}^{2+}_{1.04})_{11.70}(\text{Fe}^{3+}_{0.06}\text{Al}_{0.03}\text{Si}_{7.94})_{8.03}\text{O}_5(\text{OH})_4]$ . Orthopyroxene is the second mineral in abundance making up to 30 vol. % of rocks. Subhedral grains of it, sporadically exceeding 4 mm (porphyroclast) display bending characteristic for tectonites and weak transformation into bastite (Fig. 9). Thin veinlets of magnesite, from 0.1 to 0.5 mm thick over orthopyroxene are occasional. Relic olivine crystals, in negligible amounts, are beneath 0.1 mm in size. Accessory spinel appears in subhedral, cracked grains of reddish-brown color, up to 1 x 1.2 mm in size.

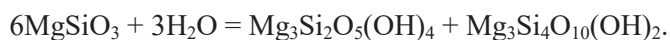
## DISCUSSION

Serpentinized harzburgites from Brdjani are dominantly built by magnesium-rich serpentine of average composition:  $[(\text{Mg}_{10.66}\text{Fe}^{2+}_{1.04})_{11.70}(\text{Fe}^{3+}_{0.06}\text{Al}_{0.03}\text{Si}_{7.94})_{8.03}\text{O}_5(\text{OH})_4]$ . Serpentine occasionally makes about 80 vol. % of rock. Mesh serpentine, derived after olivine is prevailing over bastite. Relics from olivine (forsterite) and relics from orthopyroxene (enstatite) are as well as the accessory spinel very rare. According to literature data the mesh-structured serpentine commonly considers to low-temperature lizardite (FAUST & FAHEY, 1962; MOODY, 1976). Low contents of secondary magnetite and magnesite (~ 5%) suggests on small percentage of fayalite component in primary olivine and on low  $\text{CO}_2$  mole fraction (<0.2) of the fluid (TROMMSDORF & EVANS, 1977). Serpentinization process is autometamorphic or hydrothermally process that takes part within the range from <100°C (formation of low-temperature lizardite) to about 500°C, when antigorite forms (MARTIN & FYFE, 1970; MOODY, 1976). It is commonly presented by the following reaction:

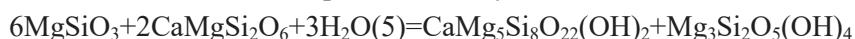


According to experimental data is forsterite stable up to 350–400°C and begins to convert into serpentine yet at 250–300°C, whereas the replacement of orthopyroxene takes place at 400°C (EVANS *et al.*, 1976; O'HANLEY, 1996). A preserved enstatite, along with rare remains of olivine, indicates on low-temperature aqueous solutions that led to serpentinization. Solutions had to be also silica-poor, otherwise talc and tremolite would form instead serpentine.

Harzburgites from Rudnik are dominantly built by talc and olivine. Clinopyroxene, of augite/diopside composition, occurs in a form of exsolution lamellas after orthopyroxene. Rare serpentine, probably derived on account olivine has average composition:  $[(\text{Mg}_{9.46}\text{Fe}^{2+}_{0.49})_{9.95}(\text{Cr}^{3+}_{0.31}\text{Al}_{1.81}\text{Si}_{6.06})_{8.18}\text{O}_5(\text{OH})_4]$ . In comparison with serpentine from Brdjani have lower contents of Mg and Si, and higher alumina. Talc is almost of ideal composition:  $[\text{Mg}_{2.98}\text{Fe}_{0.03-0.04}\text{Si}_{3.98-3.99}\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$  (DEER *et al.*, 1971, 1972). It commonly forms after pyroxene, in respect to olivine. Talc is replacing pyroxene over fissure systems in the beginning and encounters the whole crystal afterwards. Although talc crystallizes in a wide range of temperature, it is helpful in constraints as its formation is controlled by other factors, particularly silica activity in the fluid phase (MÉVEL, 2003). Acid fluids enriched by  $\text{SiO}_2$  and  $\text{H}^+$  led to talc formation yet on temperatures of about 300°C (TROMMSDORF & EVANS, 1977; VELDE, 1988). The same authors determined that the mineral assemblage: talc + forsterite (which remained unaltered) is stable at least at 490 °C. The action of lower-temperature fluids (below 470 °C) would cause the alteration of olivine, too. Thus the serpentine would form along with the talc following reaction:



The formation of tremolite at the expense of talc by reaction:



requires fluids either enriched by Ca and Fe, or silica-rich fluids whose temperature is below 470°C (VELDE, 1988; O'HANLEY, 1996).

The observed assemblage in harzburgites from Rudnik reflects on talc formation exclusively on account orthopyroxene under the action of acid and hot fluids throughout reaction:  $3\text{MgSiO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2 = \text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ .

## CONCLUSION

Serpentinized harzburgites from Brdjani and talcized harzburgites from the Rudnik Mt. (core samples from the borehole 330A/18) are of lepidoblastic, blastogranular or porphyroclastic texture. They display deformations characteristic for residual mantle harzburgites: bent pyroxene (kink bands) and pseudo twins of olivine. Primary rocks from both localities were of same mineral composition: olivine + enstatite. The action of solutions of different chemistry and temperature resulted in their quite different transformations. Harzburgites from Brdjani are intensively serpentinized by low-temperature aqueous solutions, whereas hot and silica-rich fluids led to intensive talcization of harzburgites on the mountain Rudnik. The question, could talcized harzburgites suggest to vicinity of igneous bodies as the only possible carriers of such solutions, remained opened.

**Acknowledgements.** *This research has been supported by the Serbian Ministry of Science, Project Nos. 176019 and 176016.*

## ЛИТЕРАТУРА - REFERENCES

- BRKOVIĆ, T., MALEŠEVIĆ, M., KLISIĆ, M., UROŠEVIĆ, M., TRIFUNOVIĆ, S., RADOVANOVIĆ, Z., BOŽANIĆ, M. (1970): *Osnovna geološka karta 1:100.000, list Čačak K 34-5*. Zavod za geološka i geofizička ispitivanja, Beograd
- BRKOVIĆ, T., MALEŠEVIĆ, M., UROŠEVIĆ, M., TRIFUNOVIĆ, S., RADOVANOVIĆ, Z., PAVLOVIĆ, Z., RAKIĆ, M. (1978): *Tumač za list Čačak*. Zavod za geološka i geofizička ispitivanja, Beograd
- DEER, W. A., HOWIE, R. A., ZUSSMAN, J. (1971): *Rock-Forming Minerals*, vol. 3. Longman William Clowes & Sons Ltd., London, Beccles and Colchester, 270 pp.
- DEER, W. A., HOWIE, R. A., ZUSSMAN, J. (1972): *Rock-Forming Minerals*, vol. 5. Longman Lowe and Brydone Ltd., London, 371 pp.
- DJOKOVIĆ, I. (2010-14): *Strukturno-geološka istraživanja sa izradom karte 1:2000 ležišta Rudnik*. Fond stručnih dokumanata rudnika „Rudnik”, Rudnik.
- EVANS, W. B., JOHANNES, W., OTTERDOOM, H., TROMMSDORFF, V. (1976): *Stability of chrysotile and antigorite in the serpentine multisystem*. Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt., pp. 79-93.
- FAUST, T. G. & FAHEY, J. J. (1962): *The Serpentine-Group Minerals - Studies of the natural phases in the system MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O and the systems containing the congeners of magnesium*. Geological Survey professional paper, 384-A, pp. 99. United States Government Printing office, Washington.
- FILIPOVIĆ, I., MARKOVIĆ, B., PAVLOVIĆ, Z., RODIN, V., MARKOVIĆ, O. (1978): *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000. Tumač za list Gornji Milanovac L34-137*. Savezni geološki zavod, Beograd.
- MARTIN, B., FYFE, S. W. (1970): *Some experimental and theoretical observations on the kinetics of hydration reactions with particular reference to serpentinization*. Chem. Geol., 6, pp. 185-195.
- MÉVEL, C. (2003): *Serpentinization of abyssal peridotites at mid-ocean ridges*. Geoscience 335, 825–852. Elsevier Geomaterials (Petrology) doi:10.1016/j.crte.2003.08.006
- MOODY, B. J. (1976): *Serpentinization: a review*. Lithos, 9, pp. 125-138.
- O'HANLEY, S. D. (1996): *Serpentinities*. Oxford University Press, New York, 277 pp.
- TROMMSDORFF, V. & EVANS, W. B. (1977): *Antigorite-Ophicarbonates: phase relations in a portion of the system CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>*. Contrib. Mineral. Petrol. 60, 39-56.
- VELDE, B. (1988): *Experimental pseudomorphism of diopside by talc and serpentine in (Ni, Mg)Cl<sub>2</sub> aqueous solutions*. Geochim. Cosmochim. Acta, 52, 415–424.