

Kontaktни metamorfizam gornjokrednih sedimentnih stena Rudnika

Kostić N. Bojan



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Kontaktни metamorfizam gornjokrednih sedimentnih stena Rudnika | Kostić N. Bojan || 2021 ||

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0005070>

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Bojan N. Kostić

**KONTAKTNI METAMORFIZAM
GORNJOKREDNIH SEDIMENTNIH STENA
RUDNIKA**

doktorska disertacija

Beograd, 2021.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Bojan N. Kostić

**CONTACT METAMORPHISM OF UPPER
CRETACEOUS SEDIMENTARY ROCKS OF
RUDNIK**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2021

Komisija za ocenu i odbranu doktorske disertacije

Mentor:

dr Danica Srećković-Batoćanin, redovni profesor, uža naučna oblast: Petrologija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Članovi komisije:

1. dr Nebojša Vasić, redovni profesor, uža naučna oblast: Petrologija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet
2. dr Aleksandar Kremenović, redovni profesor, uža naučna oblast: Kristalografija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet
3. dr Ivana Carević, vanredni profesor, uža naučna oblast: Stratigrafija, Univerzitet u Beogradu, Geografski fakultet

Datum odbrane: _____

Zahvalnost

Zahvaljujem se mojoj mentorki profesorici dr Danici Srećković-Batoćanin na pruženoj podršci i pomoći tokom izrade doktorske disertacije. Posebno se zahvaljujem profesoru dr Nebojši Vasiću na pomoći pri terenskim istraživanjima, korisnim savetima i sugestijama koje su podigle kvalitet disertacije. Ne bih mogao da se ne zahvalim prerano preminulom dr Predragu Vuliću koji je tokom naših zajedničkih diskusija uspevao da smiri nemirne glasove u mojoj glavi.

Svim kolegama i profesorima sam izuzetno zahvalan, a naročito profesorici dr Suzani Erić, profesoru dr Dejanu Preleviću, profesorici dr Nadi Vasković i mast. geol. Nemanji Krstekaniću na ukazanoj pomoći prilikom izrade disertacije.

Zahvaljujem se dr Ireni Peytchevoj i dr Petju Filipovu iz Geološkog instituta Bugarske akademija nauka, koji su mi pomogli oko analiza laserskom ablacijom, kao i SEM laboratoriji Rudarsko-geološkog fakulteta.

Zahvalnost u ovom istraživanju dugujem kompaniji Rudnik i flotacija „Rudnik“ d.o.o. Rudnik koji su mi ustupili svoje uzorke i samim tim omogućili ovo istraživanje, posebno dipl. inž. geol. Aci Iliću i dr Rajku Kondžuloviću.

Na kraju bih se zahvalio mojoj porodici na neizmernoj pruženoj ljubavi i podršci bez koje bih teško svoju doktorsku disertaciju priveo kraju.

„Danas je ono sutra za koje si juče bio toliko zabrinut..“

Anthony Hopkins

Kontaktni metamorfizam gornjokrednih sedimentnih stena Rudnika

SAŽETAK

Kontaktni metamorfizam gornjokrednih sedimentnih stena na planini Rudnik ispitan je na uzorcima iz pet bušotina. Definisano je šest varijeteta krednih stena (protolita) koji čine dve litološke jedinice izgrađene od klastičnog, karbonatnog i klastično-karbonatnog materijala.

Vulkanskom aktivnosti na Rudniku formirana su vulkanska tela koja se utiskuju duž slojevitosti sedimentnih stena, a neka ih presecaju u vidu dajkova. Starost ovog vulkanskog događaja određena je na 23.9 miliona godina. Ovaj miocenski vulkanizam doveo je do kontaktno metamorfnih promena sedimentnih stena i obrazovanja skarnova i hornfelsa.

Skarnovi su klasifikovani kao epidotski, granat-vezuvijanski i granat-piroksenski, dok su hornfelsi bliže definisani po facijama na one iz albit-epidotske hornfels facije, hornblenda hornfels facije i piroksenske hornfels facije.

Merenjem temperatura fluidnih inkluzija, utvrđeno je da su u vreme formiranja granata temperature hidrotermalnih fluida bile veoma visoke $>560^{\circ}$ C. Poslednja hidrotermalna faza pronađena je u kvarcu sa temperaturom homogenizacije fluidnih inkluzija oko 228° C.

Granati u kontaktno metamorfnim stenama Rudnika su grosularsko-andraditskog sastava. Ispitivanjima granata na mikrosondi utvrđeno je da centar zrna ima grosularski, a obod andraditski sastav. Oštra granica između grosulara i andradita ukazuje na naglu promenu uslova kontaktnog metamorfizma tokom kristalizacije granata.

Termobarometrijskim modelovanjem dobijen je dijagram stabilnosti koji ukazuje na temperaturu od $430\pm 30^{\circ}$ C i pritisak do 800 bara. Tokom prve faze progradnog metamorfizma formirani su granati i pirokseni, a u drugoj retrogradnoj fazi formiraju se epidot i hlorit. Bitno je napomenuti da je tokom ispitivanja otkriven vezuvijan, čije prisustvo na Rudniku ranije nije zabeleženo.

Ključne reči: Rudnik, kontaktni metamorfizam, sedimentne stene, hornfels, skarn, granati, vezuvijan

Naučna oblast: Geo-nauke

Uža naučna oblast: Petrologija

UDK: 552.16:552.5(497.11)(043.3)

Contact metamorphism of upper cretaceous sedimentary rocks of Rudnik

ABSTRACT

Contact metamorphism of the Upper Cretaceous sedimentary rocks from Rudnik Mt was studied on core samples from five boreholes. Six varieties of Cretaceous rocks (protoliths) in two distinct lithological units were distinguished.

Numerous volcanic bodies that left behind volcanic event in Rudnik before 23.9 Ma are emplaced either along bedding planes in sedimentary rocks, or in a form of cutting dikes. Miocene volcanism resulted in contact metamorphism of sedimentary rocks and formation of skarn and hornfels.

Skarns are classified on epidote, garnet-vesuvianite and garnet-pyroxene skarns, while further division of hornfelses was based on facies. Thus, albite-epidote hornfels, hornblende hornfels and pyroxene hornfelses were distinguished.

Thermometric measurements of fluid inclusions reflected on high temperature of hydrothermal solutions, exceeding 560° C, during the garnet growth. The last hydrothermal phase was detected by homogenization temperature of fluid inclusions in quartz at 228° C.

Garnets in contact metamorphic rocks from Rudnik consider grossularite-andradite garnets. Microprobe studies revealed on grossularite in the core of garnet crystals, and their rims of andradite composition. Sharp boundary between these two garnet compositions reflects on rapid changes in conditions of contact metamorphism during garnet crystallization.

According to pressure-temperature diagram based on thermobarometric modeling the temperature of 430±30° C and pressure up to 800 bars were inferred. During the first stage, i.e. prograde metamorphism formed garnet and pyroxene, whereas in the second, retrograde phase epidote and chlorite derived.

It should be mentioned that mineral vesuvianite has not been recorded in Rudnik before doing these researches.

Key words: Rudnik, contact metamorphism, sedimentary rocks, hornfels, skarn, garnet, vesuvianite

Scientific field: Geo-sciences

Scientific subfield: Petrology

UDC: 552.16:552.5(497.11)(043.3)

SADRŽAJ

UVOD	1
GEOGRAFSKI POLOŽAJ	4
PREGLED RANIJIH ISTRAŽIVANJA	7
TEKTONSKA I GEOLOŠKA GRAĐA	9
Jura (J).....	10
Kreda (K).....	10
Neogen (N).....	11
Kvartar (Q).....	12
Vulkaniti	12
Metamorfne stene Rudnika.....	13
UZORCI I METODE ISPITIVANJA	15
TERENSKA ISPITIVANJA.....	16
LABORATORIJSKA ISPITIVANJA	16
OPTIČKA ISPITIVANJA	19
SKENIRAJUĆA ELEKTONSKA MIKROSKOPIJA SA EDS/WDS ANALIZAMA	20
RENDGENSKA ISPITIVANJA	20
HEMIJSKA ISPITIVANJA	21
ISPITIVANJA NA FLUIDNIM INKLUZIJAMA	21
LA-ICP-MS NA GRANATIMA I U-Pb RADIOMETRIJSKA ISPITIVANJA.....	22
OBRADA PODATAKA U SOFTVERU PERPLE_X.....	23
PETROLOŠKE JEDINICE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA	24
METAALVROLITI.....	24
METAPEŠČARI	25
METAKONGLOMERATI	27
KLASTIČNO-KARBONATNA JEDINICA.....	29
KARBONATNA JEDINICA.....	31
HEMIJSKI SASTAV MINERALA KONTAKTNO METAMORFNIH STENA RUDNIKA..	34
AMFIBOLI	35
HLORITI	38
EPIDOTI.....	42
GRANATI.....	42
VEZUVIJAN.....	52

PIROKSENI	52
K-FELDSPATI	54
AKSINIT I ZEOLITI	57
HROMITI.....	57
MINERALNE FAZE ODREĐENE RENDGENSKOM DIFRAKCIJOM PRAHA	61
HEMIJSKA ISPITIVANJA KONTAKTNO METAMORFNIH STENA RUDNIKA	67
SADRŽAJ KARBONATA ODREĐEN METODOM KOMPLEKSOMETRIJE.....	67
KOMPLETNA HEMIJSKA ANALIZA MAKRO, MIKRO I ELEMENATA RETKIH ZEMALJA.....	68
ISPITIVANJA FLUIDNIH INKLUZIJA	72
GEOHEMIJSKA ISPITIVANJA MINERALA METODOM LASERSKE ABLACIJE	75
APSOLUTNA STAROST CIRKONA IZ VULKANITA I HORNFELSA.....	75
STAROST METAMORFIZMA, MIKROELEMENTI I ELEMENTI RETKIH ZEMALJA U GRANATIMA	77
DISKUSIJA	83
VULKANSKA AKTIVNOST NA PROSTORU RUDNIKA.....	86
DETERMINACIJA PROTOLITA KONTAKTNO METAMORFNIH STENA RUDNIKA.....	88
DETERMINACIJA KONTAKTNO METAMORFNIH STENA RUDNIKA	90
Metaklastiti Rudnika	90
Skarnovi i hornfelsi Rudnika	91
PROMENA HEMIZMA MINERALA U ZAVISNOSTI OD DUBINE.....	94
Epidoti Rudnika	94
Granati Rudnika.....	95
Amfiboli Rudnika	97
USLOVI KONTAKTNOG METAMORFIZMA.....	98
TERMOBAROMETRIJSKO MODELOVANJE SKARNA SA RUDNIKA.....	101
MODEL PROSTIRANJA FACIJA DUŽ PROFILA ISPITIVANIH BUŠOTINA	104
ZAKLJUČAK	105
PREDLOŽENI MODEL KONTAKTNOG METAMORFIZMA U GEODINAMIČKOJ SREDINI	107
LITERATURA.....	109

UVOD

Raniji istraživači su kontaktno-metamorfne (metasomatske) stene davali različita imena, pa tako u starijoj i dostupnoj literaturi često nailazimo na razne termine. Neki od njih su: kontaktne stene, kontaktno-metasomatske stene, hidrotermalno-metamorfne stene, kontaktno-pneumatolitske stene, skarnoidi, kontaktoliti i drugi. Mnogi od ovih termina se ne mogu primeniti na sve tipove skarnova, vodeći često u zabludu. Naime, skarnovi mogu nastati na različite načine, a za njihovo obrazovanje potreban je veći broj udruženih faktora, poput prirode protolita, blizine magmatskog kontakta, dovoljnog termičkog kapaciteta magmatskog tela, delovanja hidrotermalnih fluida određenih osobina, razvijenog pukotinskog sistema, poroznog medijuma i metasomatskih procesa.

Kontaktno-metamorfno-metasomatske stene pronađene su u svetu u najrazličitijim geotektonskim arealima: u blizini intruziva magmatskih stena, na okeanskom dnu, kao i u dubljim delovima kontinentalne kore. Ono što povezuje i stenu definiše kao skarn u različitim geološkim sredinama jeste mineralogija, vezana za različite minerale Ca silikata asocirane najčešće sa granatima i piroksenima. Einaudi i dr. (1981) su u preglednom radu o skarnovskim ležištima ukazali na potrebu da se reč "skarn" i "skarnovsko ležište" koriste kao opisni termini, sve dok to ne potvrdi mineraloški sastav i genetska interpretacija.

Termin "skarn" preuzet je od rudara sa severa Evrope koji su tako nazivali stenu izgrađenu od Ca-silikata, odnosno minerala "jalovine", asociranih sa magnetitom i sulfidima Fe.

Do šire primene, ali i značenja ovog termina došlo je sa V.M. Goldschmidt-om (1911) koji u svojim beleškama skarn definiše kao silikatnu stenu obrazovanu na kontaktu karbonatnih i magmatskih stena. Sa ekonomske strane gledišta skarnovi su interesantni, jer često obrazuju ležišta polimetaličnih mineralnih sirovina u kojima se eksploatišu značajne količine Fe, Pb, Zn, Cu, Ag, Au...

Skarnovi se mogu podeliti na osnovu nekoliko kriterijuma. Najšira podela na endoskarnove i egzoskarnove definiše samim imenom prostorni položaj i prirodu magmatskog ili sedimentnog protolita. Kalcijski ili magnezijski skarnovi su termini koji bliže opisuju hemijski sastav protolitne stene i dominantne minerale koji ga izgrađuju. Mineralogija skarnova je posebno važna, jer je ona ključ u definisanju ekonomski važnih skarnovskih ležišta.

Jedna od prepoznatljivih osobina skarnova je njihova zonarnost ili oreol koji se često koristi u otkrivanju blizine kontakta sa intruzivom ili ukazuje na blizinu potencijalnog rudnog tela.

Kao što je već pomenuto, mineralogija skarnova je od izuzetne važnosti prilikom istraživanja skarnova. Savremene metode ispitivanja omogućavaju brzu i laku odredbu hemijskog sastava minerala. Pionir u opisu mineralogije skarnova i njihovim sistematskim varijacijama bio je Zharikov (1970). On je koristio mineralne asocijacije, varijacije u hemijskom sastavu i fazne dijagrame da bi opisao i predvideo karakteristične mineralne asocijacije skarnova u različitim PT uslovima.

U većini slučajeva od protolitne stene preko kontaktno-metamorfne stene, koja je formirana u ranijim fazama, do skarnova koji su obrazovani u kasnijim fazama i u koje je

uključen proces metasomatizma koji rezultira krupnozrnijim i orudnjenim delovima, postoji postepeni prelaz. Zbog visoke temperature i velike količine hidrotermalnih fluida brojni istraživači (Norton, 1982; Bowers i dr. 1990 i drugi) smatraju kontaktni metamorfizam kompleksnijim od jednostavnih modela izohemijske rekristalizacije pobuđene u regionalnom metamorfizmu. Kompleksni hidrotermalni fluidi proizvode niz procesa i reakcija od čisto metamorfnih do čisto metasomatskih. Prema Wallmach & Hatton (1989) rani i čist kontaktni metamorfizam nastaviće se procesom metasomatoze na relativno visokim temperaturama i biće praćen retrogradnim alteracijama dok temperatura bude opadala u sistemu.

Česta tema prilikom istraživanja ležišta, pa tako i skarnovskih, je prostorno-vremenska veza koja zahteva pažljivu interpretaciju. Ovo je izuzetno naglašeno zbog činjenice da se ispitivani fenomen može javiti samo na jednom mestu, pa čak i u jednom petrološkom preparatu nasumično uzetog uzorka u okviru skarnovskog ležišta.

Geotermobarometrijska studija obično uključuje par udruženih metoda kao što su: ispitivanje fluidnih inkluzija, analize minerala mikrosondom, kompletna hemijska analiza i analiza u softverima poput PerpleX-a i ThermoCalc-a. Ova ispitivanja su ključna s obzirom da otkrivaju dubinu i temperature na kojima su skarnovi formirani. Dubina na kojoj skarn nastaje direktno utiče na veličinu, geometriju i tip alteracija skarnova. Skarnovi formirani na većim dubinama su obično manjih dimenzija, u neposrednom kontaktu sa intruzivom. U plićim nivoima formiraju se skarnovi većih dimenzija zbog veće razlike u temperaturi intruziva i okolnih stena i zbog mikrofraktura nastalih tokom utiskivanja intruziva. Time je olakšana cirkulacija magmatskih fluida, kao i kasniji ulazak meteorskih voda duž pukotinskog sistema. Jedan od direktnih pokazatelja da je skarn formiran u plićim nivoima jesu retrogradne alteracije, koje su rezultat mešanja magmatskih i meteorskih fluida (Reverdatto, 1971).

Planina Rudnik je od srednjeg veka do danas bila interesantna u pogledu eksploatacije rude. U dosadašnjim istraživanjima na području Rudnika se uvek primarnost davala samom rudnom ležištu bez dubljeg upuštanja u problematiku geneze, odredbu protolita, kontaktni metamorfizam i vezu sa regionalnom geologijom u širem planu. Veliki broj istraživača bavio se problematikom magmatskih stena, mineralnim paragenezama i ekonomskim procenama ležišta Rudnik. Povezanost magmatskih procesa i kontaktnog metamorfizma sa orudnjenjem je neosporna, jer je polimetalna Pb-Zn mineralizacija karakteristična za skarnovska ležišta, kako se Rudnik i dan-danas karakteriše. Veza orudnjenja sa magmatskim stenama i tip protolita u kojem su se odlagali (obarali) korisni metali do sada su razmatrani u više radova i izveštaja rađenih za potrebe kompanije Rudnik (Pejatović 1991, Đoković i dr. 2011, Cvetković i dr. 2016), dok relativni prostorni položaj magmatskog tela i vreme dešavanja samih metamorfnih procesa koji su doveli do obrazovanja ležišta, do sada nisu poznati. Mineraloško-petrološka odredba kontaktno-metamorfnih stena koje su u neposrednom kontaktu sa orudnjenom zonom, omogućava bolji uvid u metamorfne procese i zone okolorudnih promena.

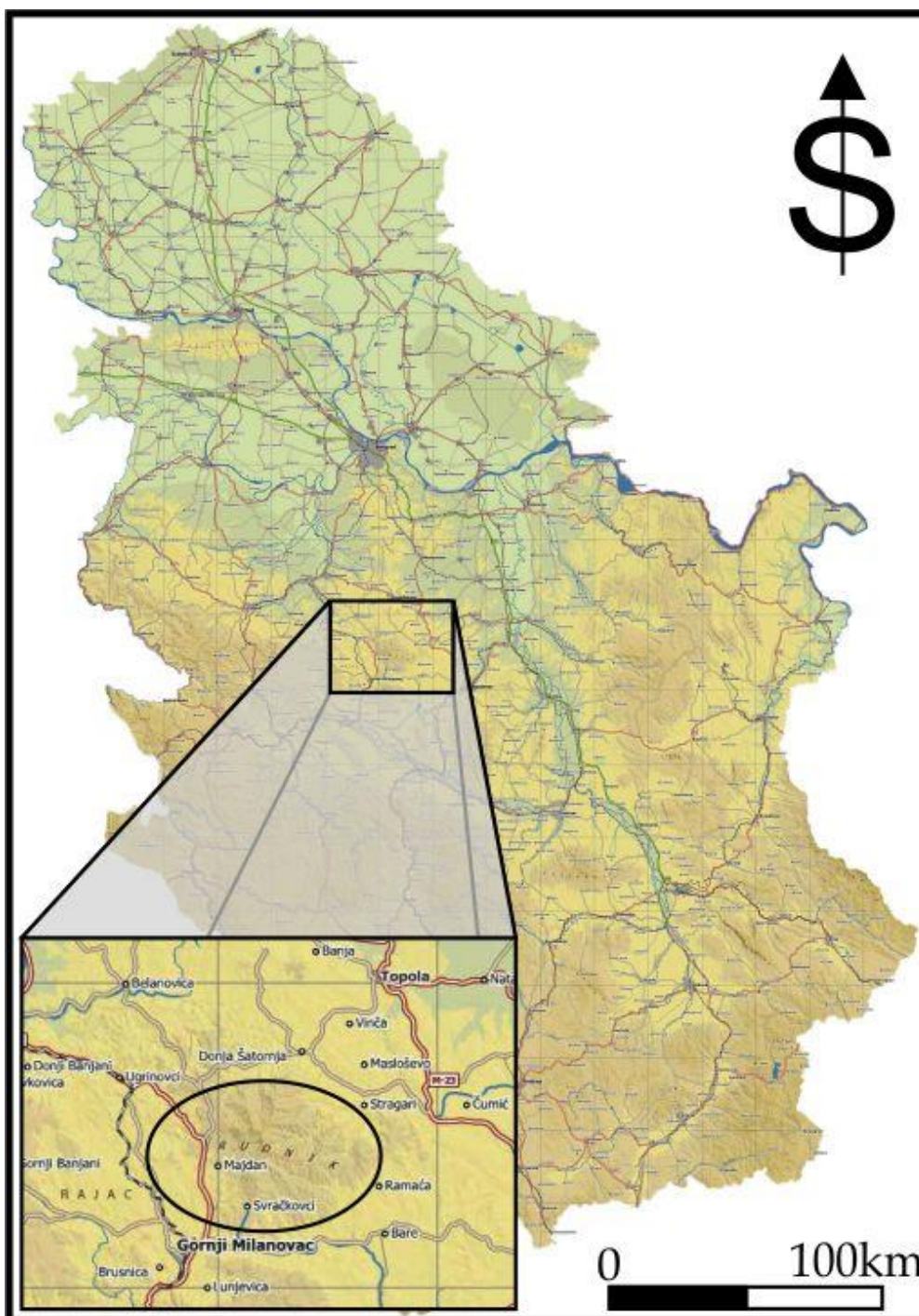
Predmet istraživanja ove doktorske disertacije su kontaktno-metamorfne stene, (skarnovi, hornfelsi i metaklastiti) nastali u metamorfnim procesima na račun različitih protolita iz turbiditskih sekvenci (grauvake, alevroliti, glinci, kao i krupnozrnije klastične stene). Svi uzorci su uzeti iz bušotina na južnoj strani planine Rudnik koje su postavljane pravcem istok-zapad i koje prolaze kroz sve turbiditske sekvence, a pojedine zalaze i u peridotite jurske starosti.

Terenski rad je obuhvatao detaljno kartiranje jezgara pet bušotina, kao i prikupljanje velikog broja uzoraka koji će biti korišćeni za različite metode ispitivanja. Dobijeni rezultati istraživanja su korelisani sa brojnim podacima iz literature u cilju tumačenja procesa metamorfizma i veze sa procesima mineralizacije, što je jedan od zadataka ove doktorske disertacije.

Osnovni cilj istraživanja bila je mineraloško-petrografska odredba kontaktno-metamorfnih stena koje se nalaze u neposrednom kontaktu sa orudnjenom zonom, prvenstveno korišćenjem materijala iz bušotina. U toku izrade doktorske disertacije izvršena su detaljna mineraloško-petrološka ispitivanja, urađene su kompletne hemijske analize, hemijske analize minerala mikrosondom, analize starosti vulkanita koji probijaju kredne sedimente U-Pb metodom, analize starosti metamorfizma, ispitivanja fluidnih inkluzija radi određivanja porekla i karaktera hidrotermalnih fluida. Rezultati ovog istraživačkog rada i doktorske disertacije mogu doprineti boljoj interpretaciji geneze kontaktno-metamorfnih stena Rudnika, a mogu se primeniti i na slična skarnovska ležišta na prostoru Srbije.

GEOGRAFSKI POLOŽAJ

Prostor planine Rudnik udaljen je oko 80 kilometara južno od Beograda i ima pravac pružanja severozapad-jugoistok u dužini oko 25 kilometara počevši od sela Kikovi na severozapadu, do sela Nevade na jugoistoku. Širina mu je u granicama od 5-7 kilometara (slika 1).



Slika 1: Istraživani prostor na planini Rudnika obeležen je crnim poligonom na karti Srbije (izvor: <https://www.381info.com/autokarta-srbije>)

Predeli Rudnika su u svojoj ne tako davnoj prošlosti bili geološki aktivni. Miran predeo prekriven jezerima i morima voda je polako napuštala, a zatim su usledile vulkanske erupcije koje su na površinu Zemlje iznosile užarenu lavu. Vulkanski nek Ostrovica koji se nalazi na severozapadu Rudnika, predstavlja očvrslu deo dovodnog kanala iz vulkanskog grotla i prirodni spomenik tog burnog perioda (slika 2).

Hidrografska mreža pripada slivu Zapadne Morave na jugu i slivu Kolubare na severu. Od većih reka na severu je reka Ljig, sa istočne strane Jasenica, na zapadu rečica Kačer i na jugu reka Gruža.

Najviši vrhovi nalaze se na planini Rudnik, ističe se Veliki Šturac sa visinom 1132 metara. Planina je obrasla bukovom šumom i pašnjacima, ponegde i niskim rastinjem. Jedan deo zemljišta se koristi za zemljoradnju.



Slika 2: Vulkanski nek Ostrovica, pogled sa južne strane Rudnika

Istraživanim područjem prolazi magistralni put Topola - Gornji Milanovac, dok veliki broj asfaltnih puteva niže kategorije povezuje manja naselja. Na samoj planini Rudnik postoji razgranata mreža poljskih i šumskih puteva i staza koje uglavnom koriste zaposleni u rudniku Rudnik, rekreativni planinari i lovci. Stanovništvo okolnih sela, kao i mesta Rudnik u najvećoj meri je ekonomski zavisno od većih gradova (Gornji Milanovac i Topola), a primetno je i smanjenje broja stanovnika u manjim mestima na području Rudnika.

Osim živopisne prirode, neposrednu blizinu istraživanog područja karakteriše mnoštvo lokaliteta sa bogatom kulturno-istorijskom prošlošću. Tereni u centralnim delovima planine Rudnik poznati su po starim rudarskim radovima. Po obroncima Rudnika, srednjovekovni rudari otkopavali su rudu u malim jamama zvanim pinge, da bi od nje srpski vladari kovali novac.

PREGLED RANIJIH ISTRAŽIVANJA

Ranija istraživanja na području Rudnika su ili rađena parcijalno ili su pojedini istraživači isključivo bili posvećeni određenim problemima na ovom prostoru.

Najstarije podatke pronalazimo u radovima Žujovića (1893) koji na račun fosilnih ostataka determiniše krednu, turomsku i senonsku starost sedimentnih stena na ovom prostoru.

Mikinčić (1935, 1936) opisuje eruptivne stene u široj okolini Gornjeg Milanovca. Izdvaja serpentinite i dacite, a daje i kratak pregled sedimentnih stena gornje krede.

Tektonski odnos između sedimentnih stena gornje krede i ofiolitskih stena prvi beleži Simić (1935) i klasifikuje ga kao transgresivni. U daljim radovima isti autor (1940) u stenama gornje krede izdvaja bazalne konglomerate, glince i laporce, masivne krečnjake i pločaste krečnjake sa laporcima. Za ove poslednje navodi da postepeno prelaze u flišne pešcare, koje će Marković i Anđelković (1953) smatrati najmlađim delom senona.

Anđelković (1955) izdvaja facije laporaca, krečnjaka i sprudnih sedimentata. U istom radu bavi se i odnosima flišnih sedimentata sa ostalim krednim tvorevinama. Ističe da sedimenti senonske starosti od područja centralne Srbije prema zapadnoj Srbiji horizontalno i vertikalno prelaze u flišne sedimente. U svom kasnijem radu (1978) ovaj autor navodi i opisuje više lokaliteta u kojima bazalni konglomerati alb-cenomana transgresivno leže preko ultrabazičnih stena. Peskoviti krečnjaci koji se nalaze preko njih lateralno prelaze u laporovite krečnjake i laporce.

Popović (2008) smatra da geološku građu užeg područja planine Rudnik izgrađuje mali broj jedinica. Smatra da sedimenti flišnog porekla, koji su klastično-karbonatnog, klastičnog ili samo karbonatnog sastava, grade kompletnu seriju stena kredne starosti. Takođe napominje da su u manjem procentu zastupljene stene kvartarne starosti.

Veći broj autora se bavio pojavama vulkanskih stena na Rudniku, počev od Terzić (1963, 1967) i Jovanovića (1995, 1997) koji su istraživali tercijarne bazalte u okolini Rudnika i Ristića (1959) koji je opisao pojave kijanita na ovom prostoru. U novijoj literaturi ispitivanjima vulkanskih stena na Rudniku bavili su se Cvetković i dr. (2016). Autori razdvajaju dve vulkanske faze i izdvajaju varijetete vulkanskih stena, dok Prelević i dr. (2000) proučava pojavu lamprofira na ovom prostoru.

Vuković (1966) smatra da je konsolidacija matičnog plutona dovela do formiranja tektonskih breča i procesa pulsiranja, a da su temperature juvenilnih rastvora u tim procesima dostizale od 200-500°C.

Ispitivanjem gasno-tečnih fluidnih inkluzija bavio se u svom magistarskom radu Blečić (1974). On izdvaja četiri generacija fluidnih inkluzija sa temperaturama homogenizacije od 290 °C, 300 °C, 310 °C i 325 °C.

Mihajlović (1982) godine određuje temperature stvaranja pojedinih minerala i izdvaja tri faze čije su temperature: I=338-380°C, II=211-277 °C i III=124-178 °C. Zaključuje da je K-metasomatoza proces koji indicira polimetalično orudnjenje.

Pejatović (1991) godine u izveštaju za potrebe rudnika „Rudnik“ opisuje metamorfne stene iz grupe skarnova i kornita i naziva ih kontaktolitima. Izdvaja dve vrste kornita, nižeg

i višeg stepena metamorfizma. Korniti nižeg stepena metamorfizma izgrađeni su od kvarca, plagioklasa, sericita, apatita, cirkona i „metamorfisane glinovito-laporovite komponente“. Korniti višeg stepena metamorfizma su izgrađeni od epidota i minerala amfibol-piroksenske grupe, kvarca, a ređe sadrže tremolit, hlorit i sfen.

Milić (1988) je rekonstruisao na osnovu satelitskih snimaka prstenastu strukturu u području od Rudnika do Stragara na istoku sa prečnikom od 12,5 kilometara.

Prema Đoković i dr. (2011) sedimentne stene gornje krede pripadaju klastičnom flišu kojeg sačinjavaju deblje ili tanje sekvence sa izraženom grubom gradacijom predstavljene kvarcnim konglomeratima i peščarima u kojima se jasno može videti horizontalna laminacija. Prema mišljenju istih autora ovaj deo sekvence pripada neizdiferenciranim „mutnim tokovima“. Dalje slede peščari, alevriti, glinci, laporci i krečnjaci. Na osnovu njihovog ritmičnog ponavljanja autori su zaključili da se radi o flišnim sedimentima ili barem njihovim lateralnim delovima u sedimentacionom basenu.

Nikako ne treba izostaviti „olistostromsku jedinicu“, koju su navedeni autori izdvojili kao poseban član, a koja se nalazi iznad gornjeg dela donje krede i mikrokonglomerata, peščara, alevrolita i laporovitih sedimenata koji pripadaju gornjoj kredi. Ova jedinica je izgrađena od krupnih blokova uglavnom od laporaca, krečnjaka i peščara, koji su dospeli „uklizavanjem“ u završne nivoe klastičnog fliša. Kao najmlađu, najverovatnije senonske starosti, autori navode pelitsko-karbonatnu jedinicu. Autori ističu da su sve tri jedinice snažno ubrane u jednu prevrnutu sinformu u čijem dnu se nalazi peščarsko-karbonatna jedinica.

Po podacima Đoković i dr. (2011) „olistostromska jedinica“ je pretrpela velika ubiranja, pa je neretko i isprekidana, sa jedva vidljivim elementima karakterističnim za flišni depozicioni sistem. U njoj je pod dejstvom kontaktno-metasomatskih promena došlo do skarnizacije laporaca i laporovitih peščara. Autori napominju da ova jedinica, debljine oko 200 metara, u predelu Rudnika predstavlja granicu koja razdvaja donji deo gornje krede, koji je izgrađen od klastične komponente, od gornjeg dela koji je klastično-karbonatnog sastava.

Isti autori zaključuju da rudničkom rudonosnom kompleksu pripadaju metasomatski i hidrotermalno izmenjene sedimentne stene ljiškog fliša koje su u domenu Malog Šturca izdiferencirane na tri litološka paketa. Najniži je izgrađen od krupnih sekvenci gradiranih konglomerata, laminiranih peščara i laporaca, srednji je predstavljen olistostromom sa olistolitima od krečnjaka i laporaca, dok je gornji sačinjen od tankih sekvenci gradiranih peščara i laminiranih alevrolita, na koje naležu slojevi ili izdanci sivih krečnjaka.

Autori izdvajaju tri metamorfne zone, koje odgovaraju različitim facijama regionalnog metamorfizma. Najnižu zonu predstavljaju nemetamorfisani, slabo kristalasti sedimenti kredne starosti, srednju čine stene izmenjene u faciji zelenih škriljaca, a najvišu zonu čine metamorfiti epidot-aktinolitske facije.

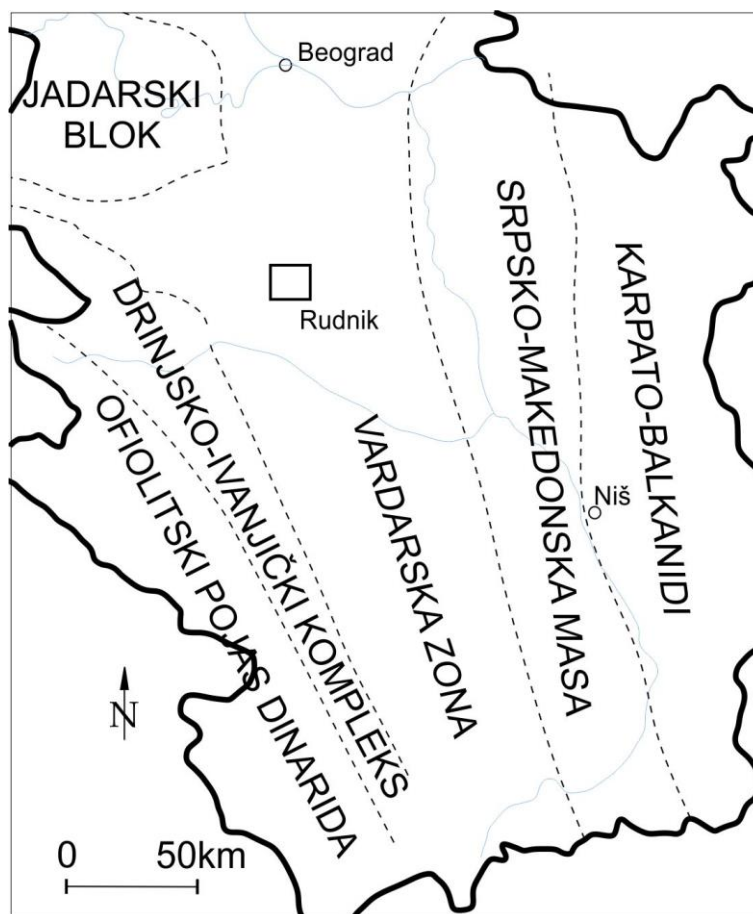
Gotovo svi autori koji su se bavili problemima metamorfizma, magmatizma i metalogenije na prostoru Rudnika smatraju da je procese metamorfizma i orudnjenja dalo do sada neotkriveno plutonsko telo granitoidnog sastava.

TEKTONSKA I GEOLOŠKA GRAĐA

Istraživano područje nalazi se na samom zapadnom obodu Sava zone, sastavnog dela Vardarske zone (slika 3), koja je u geološkom i naučno-istraživačkom pogledu, teren oko koga je još uvek otvorena debata. Na aktuelno pitanje „da li je na teritoriji Srbije sahranjen jedan, dva ili tri okeana?“ bavilo se više istraživača (Karamata, 2006; Robertson i dr. 2009 i dr.). Sava zona bi predstavljala “ožiljak” izgrađen od sedimenata kredne starosti na mestu gde se jedan od tih okeana zatvorio (Schmid i dr. 2008).

U delu terena Rudnika tvorevine krede su intenzivno ubrane i dislocirane regionalnim i lokalnim rasedima, a utvrđeni su linearni nabori i rasedi pravca pružanja SZ-JI (Brković i dr. 1978 i Filipović i dr. 1971). Najuočljivije su dve rasedne strukture. Prva se pruža od Crnuće do Rudnika (i dalje ka severozapadu) i čini tektonsku granicu između rudničkog i jarmenovačkog razvića krede. Druga rasedna struktura se pruža od Vračevšnice do Bosute i ima pravac pružanja SZ-JI. Nabori koji se javljaju u ovim jedinicama su od centimetarskih, pa do više kilometarskih dimenzija. Prema aksijalnoj površi imaju različite položaje od uspravnih, do poleglih i zagnjurenih.

Na delu ispitivanog područja Rudnika, moguće je izdvojiti dva strukturna sprata. Donji strukturni sprat čine peridotitske stene jurske starosti, dok gornji strukturni sprat obuhvata sedimentne stene kredne starosti.



Slika 3: Pozicija istraživanog područja prikazana je na karti glavnih geotektonskih jedinica Srbije (korigovano prema Karamata i Krstić, 1996 i Karamata, 2006)

Geološku građu šire okoline Rudnika čine različiti varijeteti magmatskih stena, litološki različite sedimentne i metamorfne stene. Najstarije stene su jurski serpentiniti i serpentinisani peridotiti.

Jura (J)

Stene jurske starosti imaju najveće rasprostranjenje. Predstavljene su u vidu serpentinita sa harcburgitskim afinitetom je u pojasu kod Stragara. Izgrađene su od mrežastog serpentina, hromita, magnetita, metaličnih minerala, bastita i azbesta. Od alteracija serpentiniti su pretrpeli procese limonitizacije, karbonitizacije i silifikacije. Promene su izraženije na kontaktu sa krednim sedimentima, gde su serpentiniti izbeljeniji i mrežaste strukture. Najintenzivnije hidrotermalne promene su zapažene na kontaktu serpentinita sa krečnjacima barem-apta, gde se nalaze i rude gvožđa.

Kreda (K)

Prema tumaču i OGK listova Gornji Milanovac i Kragujevac, stene kredne starosti Rudnika su svrstane u dve grupe: grupu rudničkog (K_1) i grupu jermenovačkog razvića (K_2), koje su u tektonskom kontaktu duž Jermenovačkog raseda (slika 4).

U okviru rudničkog razvića preovlađuju sedimenti starosti barem-apta (K_1^{4+5}) i alba (K_1^6). Barem-apt je litološki predstavljen peščarima, alevrolitima i glincima. Peščai su delom definisani kao grauwake. Ove klastične stene siromašne su fosilnim ostacima, dok u samostalnim, tankim slojevima su definisane *Nerinea gigantea*, *N. astrachanica* i *Orbitolina discoidea*.

Sedimenti alba su rasprostranjeniji od sedimenata barem-apta. Karakterišu se kao flišne stene sa izraženom slojevitošću, debljine oko 50 centimetara, i sa karakterističnom ritmičnošću. Predstavljani su mikrokonglomeratima, arenitima i alevrolitima. Najveća je debljina arenitskih sedimenata, oko 250 metara, dok se debljine mikrokonglomerata i alevrolita kreću od 30 do 50 metara. Fauna koja je u njima pronađena je predstavljena cefalopodima *Neohibolites minimus*, *Anahoplites sp.* Od marinske mikrofaune je utvrđena *Hedbergella infracretacea*.

U jermenovačkom razviću stratigrafski su definisane stene alb-cenomana, turona, i turon-senona. Karakterišu se visokim sadržajem kalcijum-karbonata. Alb-cenomanske stene imaju malo rasprostranjenje i po sastavu su najčešće areniti, mikrokonglomeratični areniti, alevroliti i laporoviti krečnjaci. Alevroliti su najviše zastupljeni, a javljaju se kao posebni slojevi i setovi. Na površinama slojeva često se mogu pronaći otisci tragova utiskivanja. Slojevi su obično gradirani, najčešće debljine oko 10 centimetara. Debljina kompletne serije je oko 150 metara. Mikrofauna pronađena u laporovitim mikritima je *Rotalipora apenninica*, *Planomalina buxtorfi*, foraminifere iz roda *Globigerina* i dr.

Laporoviti krečnjaci, alevroliti i laporci turonske starosti imaju malo rasprostranjenje. Konstatovani su na lokalitetima na kojima su zastupljeni i sedimenti alb-cenomana. Laminacija je izražena samo kod krečnjaka u vidu kose i talasaste laminacije, kao i

konvolutna laminacija i ostaci razorenih slojeva. Od faune pronađeni su ostaci koji pripadaju donjem i gornjem turonu bez njegovih najviših delova: *Globotruncana helvetica*, *Globotruncana renzi*, *Globotruncana marginata* i dr.

Stene turon-senonske starosti imaju najveće rasprostranjenje u jermenovačkom razviću. U okviru njih su izdvojena tri paketa sedimentne serije: fliš, brečoidni krečnjaci i rumenkasti alevroliti. U bazi flišnog paketa nalaze se alevrolitski krečnjaci. Iznad njih se smenjuju masivni areniti, mikrokonglomerati i alevriti. Debljina slojeva je različita, a slojevitost jasno izražena. U sitnozrnim stenama razvijena je kosa i talasasta laminacija. Površine slojeva su oštro izdiferencirane u grubozrnim sekvencama u kojima se javlja gradacija kao prosta ili ponovljena. Smatra se da debljina čitavog flišnog paketa ne prelazi 500 metara. U flišnom paketu je izdvojen „olistostromski nivo“ (Đoković i dr. 2011) koji sadrži uklopke peščara, masivnih krečnjaka, rožnaca, alevrolita i laporaca.

Paket od brečoidnih krečnjaka je približno 150 metara debljine i sastoji se uglavnom od odlomaka rožnaca, škriljaca, argilošista, krečnjaka i kvarcita. Karbonatni fragmenti izgrađeni su od mikrita, sparita, biomikrita i odlomaka rudista. Peskovitu komponentu čine zrna kvarca, liskuna, odlomci kvarcita, rožnaca i argilošista. Vezivo brečoidnih krečnjaka je sparitsko, dok se mikriti mogu pronaći kao tanki slojevi između banaka mikrudita.

U paketu rumenkastih alevrolita, najčešći su biomikritski krečnjaci, izgrađeni od mikritske materije sa laminama kalkarenita. Homogenog su sastava, bez ikakve izražene unutrašnje strukture. Horizontalna laminacija se uglavnom ističe promenom boje materijala. U pojedinim krečnjacima mestimično se može zapaziti i škriljavost. Debljina ovog paketa je do 250 metara.

Od mikrofaune koja je pronađena u turon-senonskim sedimentima javljaju se: *Globotruncana cornata*, *G. linneiana*, *G. augusticarinata*, *Globigerina inflata*, *Pithonella ovalis* i druge.

„Olistostromski paket“ je konstatovan u predelu Jermenovca i na padinama Ramačkih planina, gde se na profilima mogu posmatrati podina i povlata ovog horizonta. Na profilima u Jermenovačkoj reci „olistostromski horizont“ se postepeno razvija iz donjeg dela fliša. „Olistostromska jedinica“ počinje alevrolitima, a zatim prelazi u tanke trake jako deformisanih peščara. U donjem delu ima veoma malo uklopaka, dok su naviše sve češći i veći. Najčešći uklopci su blokovi peščara i masivnih krečnjaka barem-apta. Uklopci alevrolita, laporaca i rožnaca su podređeni. Osnovna masa „olistostromskog paketa“ je izgrađena od alevrolita i laporaca, dok je matriks karbonatni. Debljina ovog paketa je oko 70 metara.

Neogen (N)

Neogeni sedimenti su rasprostranjeni istočno i zapadno od Rudnika, ali na zapadnoj strani pokrivaju znatno veću površinu. Paleontološkim materijalom konstatovane su samo slatkovodne badenske tvorevine. Njih čine konglomerati, gline, tufovi, laporci i laporoviti krečnjaci, peščari i peskovite gline. Konglomerati obično imaju malu debljinu, valuci su od dijabaza, krečnjaka, peščara i kvarcita. Vezivo je malo zastupljeno i uglavnom je od mikrokonglomerata i peščara. Gline su takođe slabo zastupljene, uglavnom su sivo-crvenkaste boje sa retkim kvarcnim valucima. U njima su brojni ostaci ljušturica ostrakoda.

Tufovi sivo-bele boje su konstatovani uglavnom na mestima gde i gline. Pokazuju izraženu gradaciju, a ukupna debljina im dostiže do 35 metara. Izgrađeni su od vulkanskog stakla, alevrolita, peščara, zrna kvarca, plagioklasa, biotita i hornblende. Cement im je tufozno glinovitog karaktera. Laporci i laporoviti krečnjaci se javljaju u slojevima, obično malih debljina, od 1-8 centimetara. Površni slojevitosti su jasno izražene, ponekad pokazuju deformacije. U njima su pronađeni ostaci krljušti riba i ostaci ostrakoda. Bledožute su boje, a debljina im ne prelazi 200 metara. Peščari imaju najveće rasprostranjenje. Bočno se smenjuju sa svim članovima neogena. Uglavnom se javljaju kao masivni peščari, žute boje, bez znakova slojevitosti. Po sastavu su liskunski peščari sa proslojcima gline i većim gnezdima konglomerata. U peščarima su paleontološki ostaci retki. U ovoj jedinici je sačuvana paleoflora pronađena samo u laporovitim sedimentima i to: *Myrica lignitum*, *Quercus neriifolia*, *Bumelia minor*, *Pinus hepios*, *Acacia sotziana* i druge.

Kvartar (Q)

Kvartarni sedimenti imaju najveće rasprostranjenje uz veće vodene tokove koji pripadaju slivu Velike Morave. To su uglavnom rečne terase, deluvijum i aluvijum. Rečne terase su po pravilu razorene ili delimično sačuvane. Izgrađene su od šljunkova, peskova i alevrolita koji se u nekim delovima mešaju sa padinskim materijalom. Alevritske gline koje mogu pripadati tvorevinama iz facija povodnja i mrtvaja, su retke.

Deluvijum se po pravilu nalazi na blagim padinama i izgrađen je od fragmenata neogenih tvorevina, pa se ne razlikuje od podloge. Transport je bio veoma kratak, pa je najveće rasprostranjenje zabeleženo na padinskim stranama većih vodenih tokova.

Aluvijum pokriva najveću površinu u koritima većih vodenih tokova. Materijal koji sačinjava aluvijum u direktnoj je vezi sa litologijom koja pokriva erozivno područje tog sliva. Uglavnom je izgrađen od heterogenih šljunkova, peskova i peskovitih alevrolita.

Vulkaniti

Na području Rudnika preovlađuju vulkaniti kvarclatitskog sastava. Smatra se da su to mase očvrsele u subvulkanskom nivou, sa reliktima vulkanskog aparata (Cvetković i dr. 2016). Najčešće pojavljivanje vulkanita kvarclatitskog sastava na terenu je u vidu dajkova ili silova u krednim sedimentima. Izgrađeni su od fenokristala sanidina, plagioklasa (oligoklas-andezin), kvarca, biotita, hornblende i dosta akcesornih i metaličnih minerala. Struktura im je porfiriska, a tekstura masivna.

U široj okolini Rudnika poznate su i pojave leucit-bazalta, koje su proučavali Terzić i Milojković (1967). Značajnije pojave leucit-bazalta otkrivene su bušotinama, dok se na površini nalaze samo u vidu tanjih slivova. Izgrađeni su od leucita koji se nalazi u osnovnoj masi, olivina, monokliničnih i rombičnih piroksena, i ređe biotita. Struktura im je holokristalasto porfiriska.

Stene sa zrnastom strukturom su vrlo retke. Konstatovani su samo kvarcmonconiti i granodiorit porfiriti. Godine 1966. u internom izveštaju rudnika „Rudnik“ zabeleženo je da

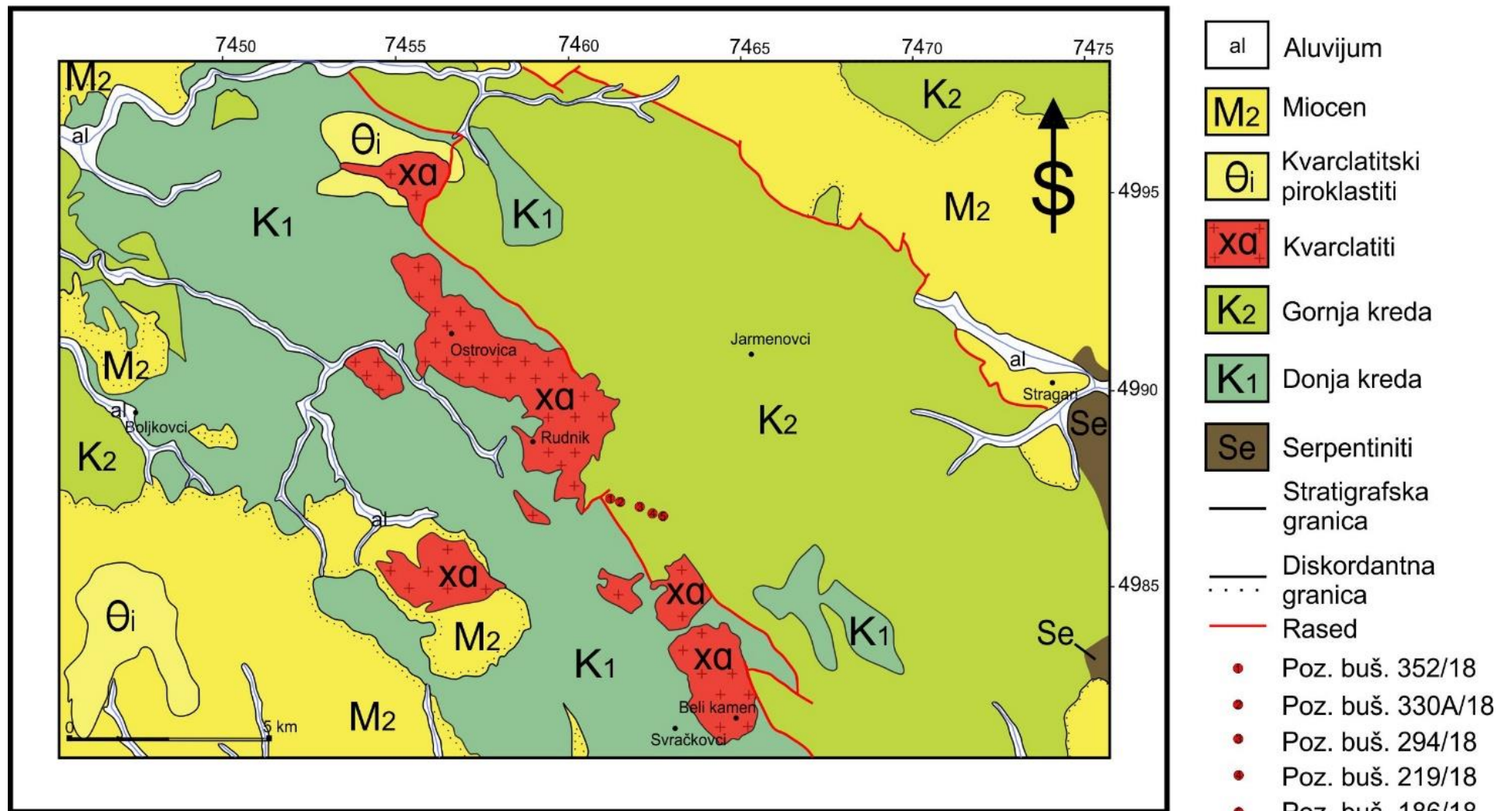
je na jugozapadnim padinama planine Rudnik pronađen jedan površinski izdanak kvarcmonconita utisnut u sedimente kredne starosti. Ovaj izdanak je opisan kao apikalni deo neotkrivenog plutonskog tela. Prisustvo stene sa zrnastom strukturom potkrepilo je ideje da se ispod planine Rudnik nalazi veće plutonsko telo koje je prouzrokovalo intenzivan kontakti metamorfizam krednih sedimenata.

Metamorfne stene Rudnika

Značajan prostor Rudnika zauzimaju termokontaktne metamorfne stene. Na površini su najrasprostranjeniji metamorfisani laporovito-glinoviti sedimenti silifikovani peščari i konglomerati, dok su pravi korniti i epidoziti ređi. Skarnovi i aksinitske žice su uglavnom otkriveni podzemnim radovima u rudnom ležištu olova i cinka „Rudnik“ Rudnik.

Kod peščara kontakti metamorfizam se ogleda uglavnom u rekristalizaciji glinovite materije, pojavi epidota i fibroznih agregata amfibola iz grupe aktinolita-tremolita. Metamorfne promene kod konglomerata su konstatovane na laporovitom cementu koji je prožet fibroznim agregatima amfibola, epidota i sericita. Korniti se javljaju kao produkti nešto višeg stepena metamorfizma. Izgrađeni su od klasta kvarca, plagioklasa, sericita, amfibola, apatita, cirkona, epidota, coisita i metamorfisane glinovito-laporovite komponente. Epidoziti se obično zapažaju u asocijaciji sa kvarcnim i epidotskim peščarima, a izvesni relikti ukazuju da su oni samo produkti višeg stepena metamorfizma kvarc-epidotskih peščara.

Kod karbonatnih stena na površini je metamorfni uticaj sveden samo na prekrystalizaciju, dok je u dubljim delovima došlo do obrazovanja skranova i oni predstavljaju produkte najvišeg stepena metamorfizma. Po sastavu su granatsko-piroksenski skarnovi, izgrađeni od granata i diopsid-hedenbergita.

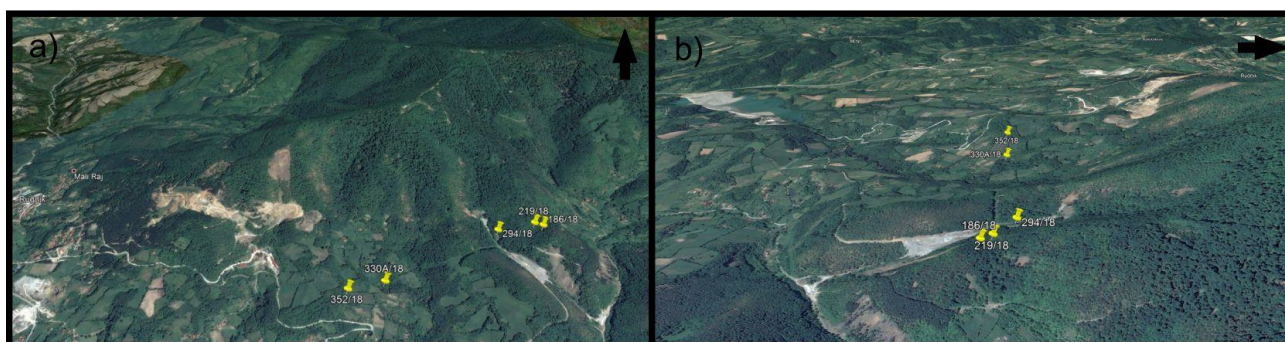


Slika 4: Pojednostavljena geološka karta šireg područja Rudnika sa pozicijama istražnih bušotina, prilagođeno po Brković i dr. 1978 i Filipović i dr. 1971.

UZORCI I METODE ISPITIVANJA

Na odabranim uzorcima kontaktno-metamorfnih stena obavljena su različita ispitivanja. Jedini deo ispitivanja koji je urađen na terenu je snimanje stubova bušotine i uzimanje odgovarajućih uzoraka, što je sve obavljeno u prostorijama kompanije RUDNIK, na Rudniku. Kabinetsko-laboratorijska ispitivanja obuhvatala su i pregled postojeće geološke dokumentacije i literature, pripremu svih uzetih uzoraka za različite analitičke metode.

Odabrane bušotine iz kojih su uzimani uzorci pozicionirane su tako da zauzimaju pravac istok-zapad na južnoj padini planine Rudnik. Njihova pozicija prikazana je na slici 5 koja je urađena pomoću Google Earth softwera. Oznake i tačne koordinate bušotina prikazane su u tabeli 1.



Slika 5: Pozicije bušotina; a) profil sa južne strane, b) pogled sa zapadne strane (izvor: Google Earth).

Tabela 1: Koordinate ispitivanih bušotina, njihova ukupna dužina i broj uzetih proba

Oznaka bušotine	X koordinata	Y koordinata	Nadmorska visina bušotine u metrima	Dubina bušotine u metrima	Broj uzetih uzoraka
186/18	7461989	4886573	732	238.0	39
219/18	7461975	4886621	724	317.7	44
294/18	7461825	4886751	722	252.0	78
330A/18	7461054	4886931	694	559.8	125
352/18	7460842	4886997	732	716.3	148

Zavisno od rezultata koji su potrebni za izučavanje kontaktno-metamorfnih stena birane su različite savremene metode koje se trenutno koriste u svetu. Kao i svako geološko izučavanje, i ovo je počelo terenskim istraživanjima.

TERENSKA ISPITIVANJA

Terenska ispitivanja obuhvatila su detaljan obilazak terena na planini Rudnik. Najveći deo terenskih ispitivanja se odnosio na kartiranje jezgara odabranih bušotina u prostorijama za kartiranje jezgara kompanije Rudnik. Pet odabarnih bušotina detaljno je kartirano, a nakon toga su odabrani uzorci koji će se dalje laboratorijski ispitivati. Oznake odabranih bušotina su 186/18, 219/18, 294/18, 330A/18, 352/18.

Radi boljeg sagledavanja karakteristika uzoraka (fizičkih, strukturnih i teksturnih) sve bušotine su fotografisane u makro i u mikro modu.

LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

Uzorci prikupljeni terenskim radom podvrgnuti su različitim laboratorijskim ispitivanjima. Veliki broj uzoraka zahtevao je posebnu pažnju kako bi se izbegla kontaminacija, kao i pogrešno obeležavanje uzoraka. Kao jedna od prvih i osnovnih metoda bila je petrografski pregled uzoraka i za to je trebalo napraviti oko 450 petrografskih preparata. Za njihovu izradu korišćena je Laboratorija za izradu preparata na Rudarsko-geološkom fakultetu, Univerzitet u Beogradu. Kompletna izrada preparata sa i bez pokrovnog stakla urađena je na uređajima marke Buehler AbrasiMet 250, Buehler Petro Thin i Buehler AutoMet 250 na kojima je izvršeno odsecanje, brušenje i finalno poliranje uzoraka (slika 6a).

Optička ispitivanja izvršena su u Laboratoriji za petrologiju magmatskih i metamornih stena na Rudarsko-geološkom fakultetu, Univerzitet u Beogradu, korišćenjem polarizacionog mikroskopa za propuštenu svetlost, marke Olimpus BX40 (slika 6b).



Slika 6: Mašina za poliranje i pripremu petrografskih uzoraka (a), Polarizacioni mikroskop za propuštenu svetlost (b).

Postupak sprašivanja uzoraka izvršen je u Laboratoriji za pripremu uzoraka na Rudarsko-geološkom fakultetu, Univerzitet u Beogradu. Uzorci su prvo usitnjeni u merzeru, a zatim fino sprašeni u ahatnim avanima i pripremljeni za dalje analize.

Kompletne hemijske analize makro i mikro elemenata, kao i elemenata retkih zemalja (RZ) izvršene su u akreditovanoj laboratoriji u Kanadi, Bureau Veritas Commodities Canada Ltd.

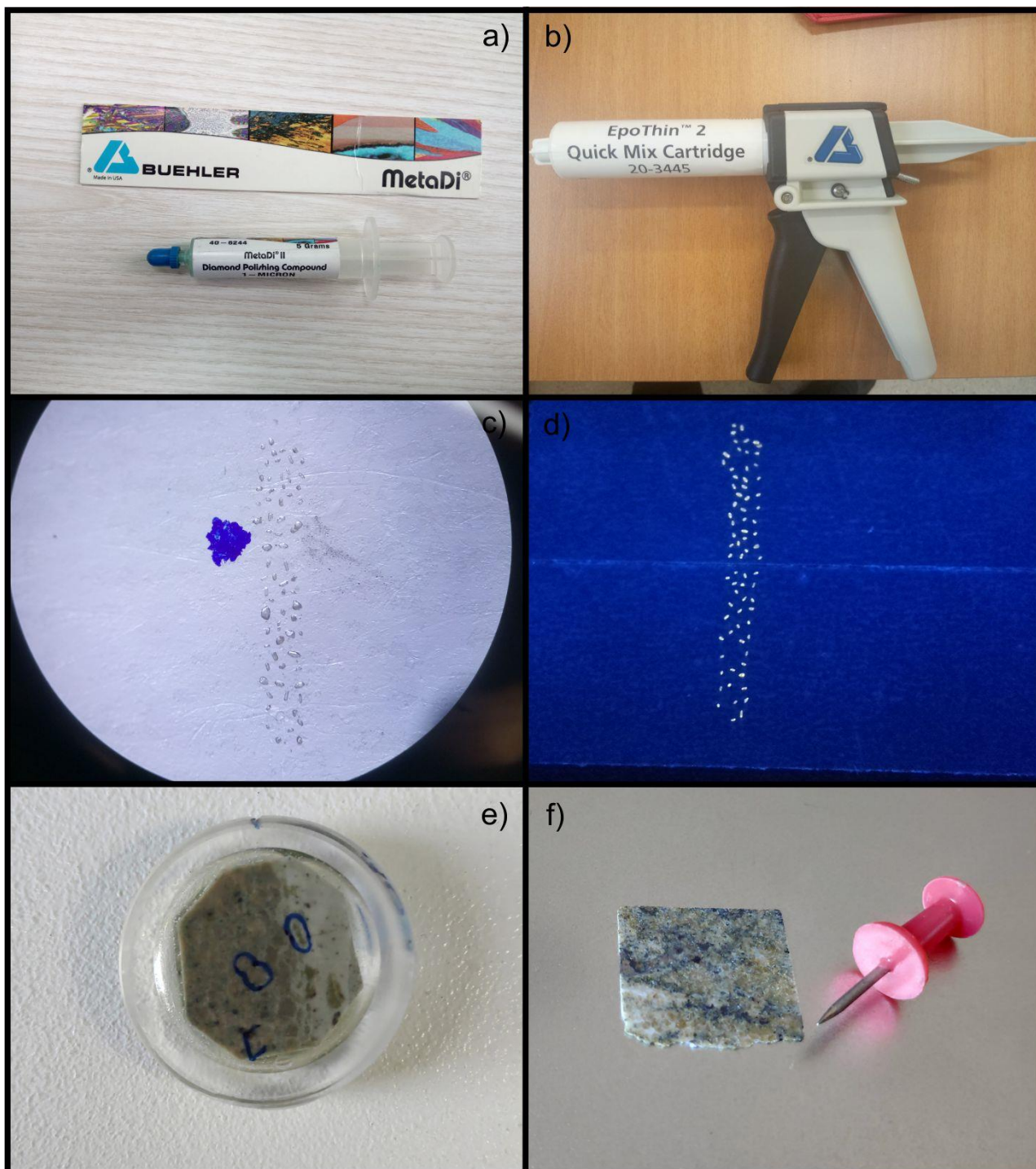
Određivanje kristalnih faza u sprašenim uzorcima urađeno je metodom rendgenske difrakcije praha u Laboratoriji za kristalografiju Rudarsko-geološkog fakulteta, Univerzitet u Beogradu.

Za potrebe utvrđivanja starosti vulkanita koji probijaju kredne sedimente izvršeno je izdvajanje cirkona, posebno razvijenom procedurom mineralne separacije (drobljenje uzoraka, prosejavanje na 0.250-0.125 mikrona, pranje uzorka, sušenje, separacija ručnim magnetom, elektromagnetna separacija i ručno izdvajanje cirkona uz pomoć UV lampe na 256 nm). Izdvajanje cirkona uz pomoć UV lampe višestruko ubrzava proces, a pritom se izbegava rukovanje opasnim hemikalijama koje se koriste prilikom standardne separacije (teške tečnosti). Izdvojeni cirkoni se kasnije postavljaju na nosač u koji se zatapaju dvokomponentnim epoksi lepkom i ispolirani dijamantskom pastom od 1 mikrona. Pojedinačne faze ovog postupka su prikazane na slici 7 (a, b, c i d).

Za određivanje starosti metamorfizma metodom laserske ablacije na granatima, komadići stene sa granatima su zaliveni u dvokomponentnu epoksi smolu i takođe ispolirani dijamantskom pastom od 1 mikrona (slika 7e).

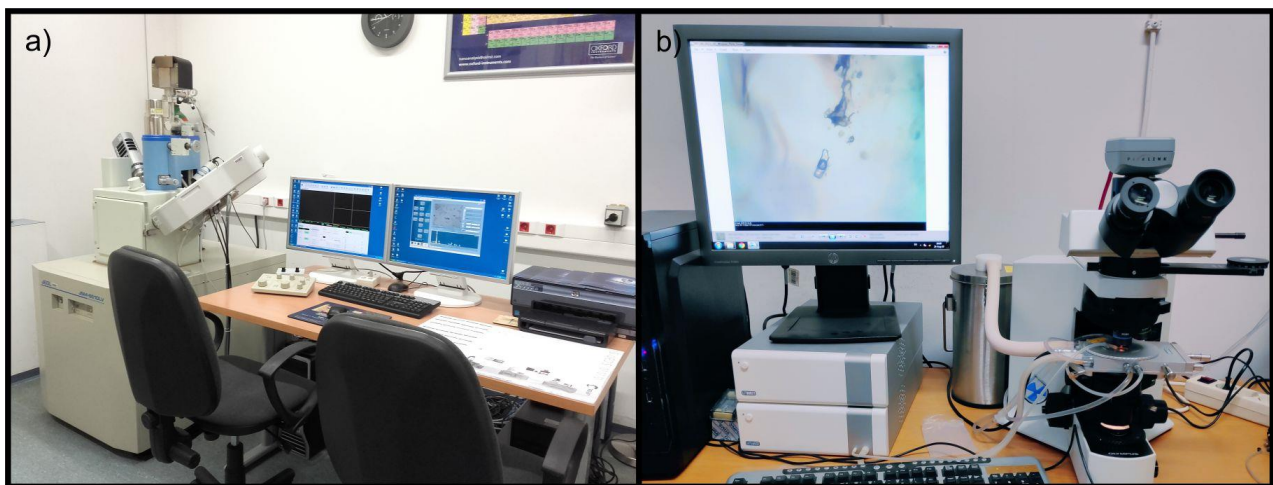
Na tako ispoliranim uzorcima cirkona i granata urađena je laserska ablacija povezana sa indukovanom kuplovanom plazmom i masenim spektrometrom (LA-ICPMS) na Geološkom Institutu Bugarske akademije nauka „Strashimir Dmitrov“ u Sofiji i u laboratoriji za lasersku ablaciju „Johannes Gutenberg“ na Univerzitetu u Majncu.

Za potrebe ispitivanja fluidnih inkluzija izrađeni su duplo polirani preparati za analiziranje fluidnih inkluzija. Ispitivanje uzoraka (slike 7f, 7b) izvršeno je na termalnom stočiću marke Linkam THMSG600, povezanim na polarizovani mikroskop za propuštenu svetlost marke Olympus BX51. Same karakteristike termalnog stočića su zamrzavanje do -196°C pomoću tečnog azota i grejanje do 600°C. Merenja su izvršena u laboratoriji za ispitivanje fluidnih inkluzija na Rudarsko-geološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu.



Slika 7: Priprema uzoraka za određivanje starosti vulkanizma, metamorfizma i karakteristika fluidnih inkluzija: (a) dijamantska pasta kojom je izvršeno finalno poliranje uzoraka; (b) "pištolj" sa dvokomponentnim epoksi lepkom za fiksiranje uzoraka; (c) mineralna separacija cirkona pod binokularnom lupom; (d) mineralna separacija cirkona pod binokularnom lupom i UV svetlom; (e) uzorak spreman za LA-ICPMS na granatima; (f) obostrano polirani preparat spreman za merenje fluidnih inkluzija na termalnom stočiću.

Skenirajuća elektronska mikroskopija sa (EDS/WDS) analizama, urađena je na odabranim uzorcima u Laboratoriji za SEM, na Rudarsko-geološkom fakultetu, Univerzitet u Beogradu. Na odabranim petrografskim preparatima koji su urađeni bez pokrovnog stakla izvršeno je fino poliranje dijamantskim pastama od 1 mikrona. Ovakva priprema isključuje mogućnost loših rezultata hemijskih analiza usled neravnina na površini uzorka. Analize su rađene na uređaju marke JEOL JSM 6610LV povezanim sa energo-disperzivnim spektrometrom X-Max Oxford 20mm² i talasno-disperzivnim spektrometrom Oxford Wave 500. Uzorci su pre analiziranja prekriveni elektroprovodnim slojem ugljenika od 15 nanometara na neparivaču marke BALTEC-SCD-005. Fotografije cirkona pre vršenja laserske ablacije, urađene su na detektoru za katodoluminiscenciju marke MiniCL povezane na skenirajući elektronski mikroskop (slika 8a).



Slika 8: Laboratorija za skenirajuću elektronsku mikroskopiju (a), Laboratorija za ispitivanje fluidnih inkluzija (b)

OPTIČKA ISPITIVANJA

Optička ispitivanja bila su temelj ostalim laboratorijskim ispitivanjima. Za oko 500 petrografskih uzoraka određivan je mineraloški sastav, struktura i tekstura, gde je to bilo moguće, kao i sekundarne promene i alteracije koje su zahvatile ispitivani uzorak. Svi uzorci su definisani optičkom metodom, što je u prvim fazama istraživanja od velike važnosti radi izbora kasnijih metoda i trijaže uzoraka. Optička ispitivanja su izvršena na polarizacionom mikroskopu za propuštenu svetlost, marke Olympus BX40, a mikrofotografije urađene na kameri Euromex CMEX-18 Pro. Softver korišćen za mikrofotografisanje i obradu mikrofotografija je EuroMex ImageFocusAlpha.

SKENIRAJUĆA ELEKTRONSKA MIKROSKOPIJA SA EDS/WDS ANALIZAMA

Već nekoliko decenija unazad u pogledu geoloških laboratorijskih ispitivanja, SEM metoda zauzima visoko kotirano mesto. Prednost metode je brza i prilično pouzdana hemijska analiza koja može biti izvršena kao tačkasta analiza, sa dimenzijama analizirane tačke oko 2 mikrona ili kao kompletna analiza površine. Za ove potrebe korišćen je energo-disperzivni spektrometar X-Max Oxford 20mm² (EDS). Prilikom analiziranja uzorka EDS detektorom, parametri samog uređaja bili su:

- Ubrzanje elektronskog snopa 20kV;
- Jačina struje elektronskog snopa 50pA;
- Dužina trajanja analize 60 sekundi;
- Širina elektronskog snopa na uzorku (spotsize) 2 mikrona.

Pojedini uzorci su bili temeljnije analizirani talasno-disperzivnim spektrometrom Oxford Wave 500 sa 5 sintetičkih kristala (LDE, PET, TAP, LiF, LiF200) i dva detektora (gas-flow proportional - za analizu lakih elemenata) i (Xenon detektor - za analizu teških elemenata). Fotografije prikazane u doktorskoj tezi urađene su detektorom za povratno-rasute elektrone (BSE). Prilikom analiziranja uzorka WDS detektorom, parametri samog uređaja bili su:

- Ubrzanje elektronskog snopa 30kV;
- Jačina struje elektronskog snopa 10nA;
- Vreme analize 20 sekundi za pozadinsko snimanje i 20 sekundi za snimanje na karakterističnom piksu;
- Širina elektronskog snopa na uzorku (spotsize) 3 mikrona.

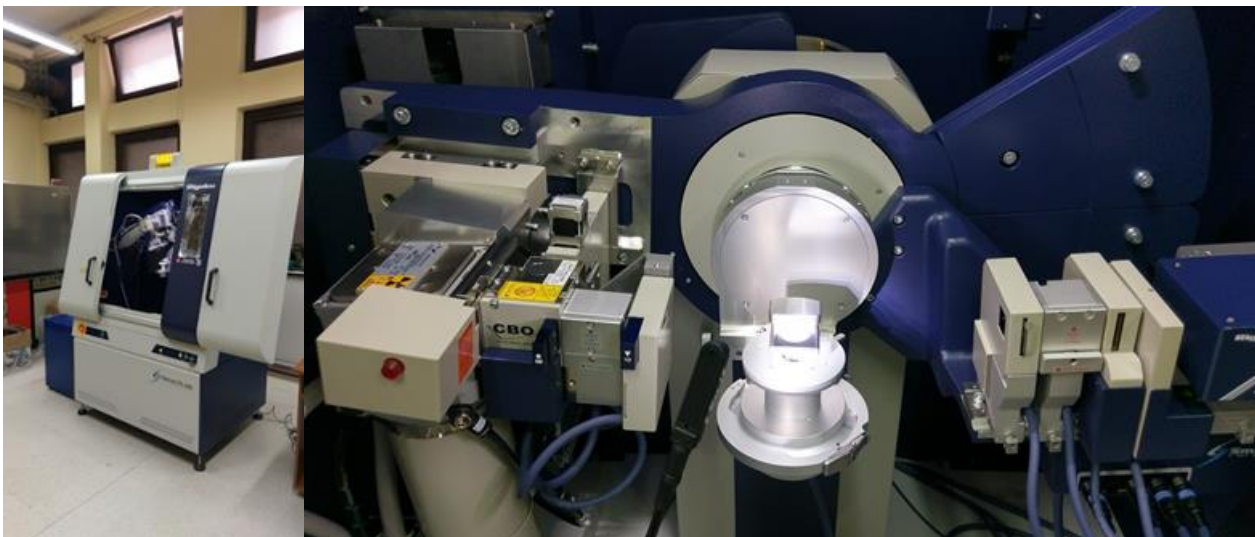
Prilikom izrade hemijskih analiza minerala korišćeni su spoljašni standardi i to: Si-albit; Al-albit; Na-albit; K-ortoklas; Mg-olivin; Fe-feri oksid, almandin; Ca-volastonit; Cr-hrom oksid; Ti-titanijum monoksid; V-vanadijum; Mn-spesartin.

RENDGENSKA ISPITIVANJA

Rendgenska ispitivanja korišćena su za određivanje kristalnih faza prisutnih u uzorcima. Korišćen je difraktometar za prah marke Rigaku SmartLab (slika 9) sa izvorom zračenja bakarne antikatode (talasna dužina 1.54178 Å) i 1D strip detektor D/teX Ultra 250. Parametri za generisano rendgenskog zračenja bili su:

- Napon od 40kV;
- Struja od 30 mA.

Uzorci su ispitivani u opsegu od 5-75° 2 θ . Podaci su prikupljeni na svakih 0.01°. Brzina kretanja detektora bila je 5°/min. Dobijeni podaci obrađeni su pomoći programskog paketa Rigaku PDXL 2.8.4.0 i poređeni sa PDF-2 2016 (Powder Diffraction File) standardima ICDD-a (ICDD – International Centre for diffraction Data). Ovim postupkom izvršena je identifikacija minerala prisutnih u sprašenim uzorcima.



Slika 9: Rendgenski difraktometar za prah Rigaku SmartLab (foto: P. Vulić)

HEMIJSKA ISPITIVANJA

Za potrebe doktorske disertacije urađena su različita hemijska ispitivanja. Za odredbu glavnih oksida, elemenata u tragovima i elemenata retkih zemalja, sprašeni uzorci poslani su specijalizovanoj laboratoriji u Vankuveru, Kanada. Osim finog sprašivanja u laboratoriji za pripremu uzoraka na Rudarsko-geološkom fakultetu, Univerzitet u Beogradu, nikakve dalje pripreme na uzorcima nisu vršene.

Sprašeni uzorci nakon prijema u eksternu laboratoriju u Vankuveru (Kanada), tretirani su različitim hemijskim postupcima radi što boljeg razlaganja. Merenja su rađena ICP metodom, a uzorci stopljeni i homogenizovani pomoću litijum-borata na temperaturi od 1050°C.

Za potrebe određivanja sadržaja kalcijuma i magnezijuma u karbonatima urađena je kompleksometrijska analiza na prethodno sprašenim uzorcima. Izdvajanje karbonatne faze izvršeno je razblaženom HCl, dok su vrednosti Cao i MgO određene titracijom, uz pomoć 1M kompleksona EDTA.

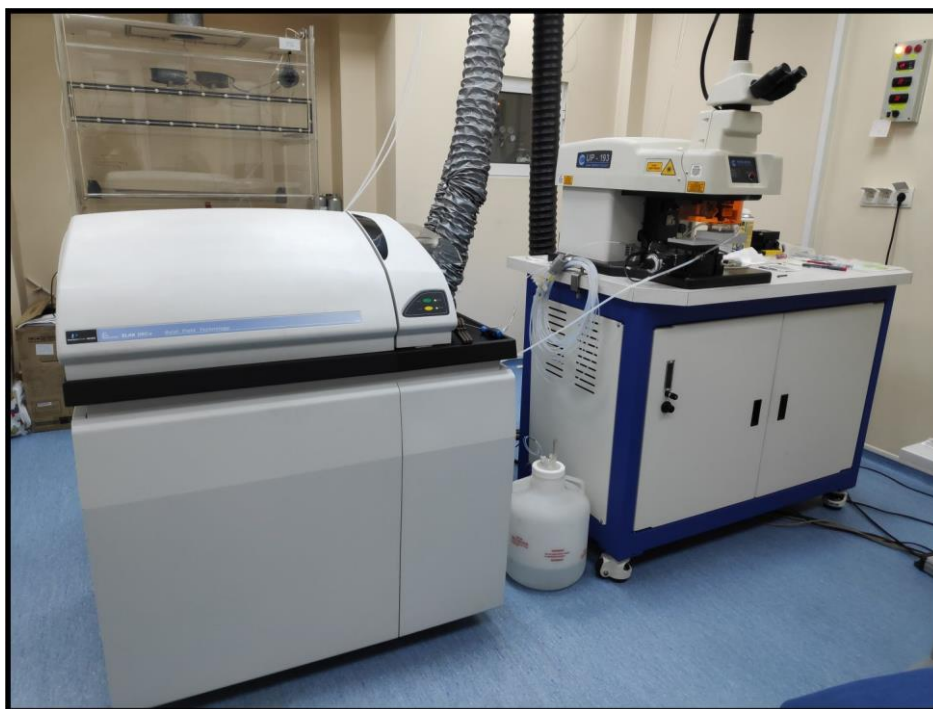
ISPITIVANJA NA FLUIDNIM INKLUZIJAMA

Za potrebe ispitivanja temperatura homogenizacije i temperatura topljenja leda u fluidnim inkluzijama urađeni su specijalni, dvostrano polirani preparati debljine 100-150 mikrona (videti sliku 8b). Merenja su urađena na mineralima kvarca, asociiranim sa rudnim mineralima koji prožimaju stene u vidu žica debljine do maksimalno 5 centimetara.

Takođe, vršena su merenja temperatura homogenizacije fluidnih inkluzija u zrnima granata. Rezultati merenja temperatura homogenizacije u kvarcu su korišćeni kako bi se stekao bolji uvid u temperature hidrotermalnih fluida koji su vezani za orudnjenje. Temperature homogenizacije fluidnih inkluzija u granatima bi dale temperature fluida koji su cirkulisali prilikom procesa metamorfizma.

LA-ICP-MS NA GRANATIMA I U-Pb RADIOMETRIJSKA ISPITIVANJA

Metoda laserske ablacije povezane sa kuplovanom-spregnutom plazmom i masenim spektrometrom korišćena je radi dobijanja sadržaja mikro elemenata i retkih zemalja u granatima. Merenja koncentracija U i Pb na mineralnoj separaciji cirkona korišćena su za određivanje apsolutne starosti vulkanita koji u vidu dajkova probijaju sedimentne stene, dok su merenja na granatima korišćena za određivanje starosti metamorfizma. Pripremljeni uzorci prethodno zaliveni u dvokomponentni epoksi lepak i ispolirani do visokog sjaja, poslani su na analizu LA-ICP-MS u laboratoriju na Geološkom Institutu Bugarske akademije nauka "Strashimir Dimitrov" u Sofiji (slika 10) i u laboratoriju za lasersku ablaciju „Johannes Gutenberg“ na Univerzitetu u Majncu (Nemačka).



Slika 10: Laboratorija opremljena laserskom ablacijom povezana sa indukovano kuplovanom plazmom i masenim spektrometrom

Obrađivanje savremenih geoloških problema nemoguće je bez metode LA-ICPMS. Uz pomoć ove metode *in city* mereni su izotopi uranijuma (U^{235} , U^{238}), torijuma (Th^{232}) i olova (Pb^{206} , Pb^{207} i Pb^{208}). Podešavanja instrumenta prilikom merenja bila su: prečnik kratera laserskog snopa (spot size) 50 mikrona, frekvencija lasera 10 Hz, gustina lasera $1.35J/cm^2$. Kao gas za ispiranje sistema korišćen je helijum+argon velike čistoće. Mereni signal je 45 sekundi za vreme trajanja ablacije i 20 sekundi pre i posle ablacije kako bi se dobio šum uređaja. Maseni spektrometar je tipa kvadripola marke PerkinElmer DRC.

Standardi korišćeni prilikom merenja su cirkoni oznaka GJ-1, 91500, Plesovice, dok za merenja na granatima NIST610, NIST612, Mali i Dash1. Za obradu dobijenih signala i korigovanje "downhole" efekta upotrebljen je Iolite 2.5 softver (Paton i dr. 2011).

OBRADA PODATAKA U SOFTVERU PERPLE_X

Perple_X v.6.7.9. (Connolly i dr. 2002) kao jedan od vodećih softvera za obradu i konstruisanje termodinamičkih dijagrama korišćen je za definisanje uslova pritiska i temperatura na kojima su se desile metamorfne promene. Termodinamički dijagrami sa poljima stabilnosti mineralnih faza zavisno od temperature i pritiska se konstruišu upotrebom rezultata hemijskih analiza koje su urađene u specijalizovanoj laboratoriji u Kanadi, analizom minerala na skenirajućem elektronskom mikroskopu i na osnovu sadržaja karbonatne komponente dobijene uz pomoć kompleksometrijske metode i mineralnih faza određenih rendgenskom difrakcijom praha.

PETROLOŠKE JEDINICE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

Sve petrološke jedinice na Rudniku možemo svrstati u tri grupe: klastičnu, klastično-karbonatnu i karbonatnu jedinicu. Bušotine 330A/18 i 352/18 prolaze kroz sve pomenute jedinice i završavaju u serpentinisanim i/ili talkiziranim peridotitima koji čine podlogu i koji su uglavnom harzburgitskog sastava. Bušotine 186/18 i 219/18 završavaju u karbonatnoj jedinici, dok bušotina 294/18 završava u vulkanskoj steni kvarclatitskog sastava.

Klastičnu jedinicu možemo dalje podeliti na metaalevrolite, metapešcare i metakonglomerate.

METAALEVROLITI

Metaalevroliti su veoma finozrne stene izgrađene od sitnih zrna kvarca, plagioklasa, K-feldspata, epidota, hlorita i glinovito-alevrolitskog materijala koji ima ulogu matriksa. Ova jedinica pokazuje veoma slab efekat metamorfnih promena. Od metamorfnih minerala sadrži sitan zemljasti epidot, koji je fino dispergovan u glinovitoj komponenti. U delovima u kojima je bilo više karbonatne komponente u vidu finih lamina, razvijeni su krupniji kristali epidota veličine do 0,5 milimetara. Hlorit koji je izmešan sa zemljastim epidotom izgrađuje matriks stene i stvara predisponirane pravce škriljavosti. U pojedinim uzorcima mogu se pronaći fosilizovani biljni ostaci, sada potpuno promenjeni. Makroskopski boja metaalevrolita varira od svetlosive do tamnosmeđe. U pojedinim svetlijim varijetetima može se zapaziti horizontalna laminacija, gde su lamine debljine do 1 milimetra i tamnijih nijansi (slika 11).

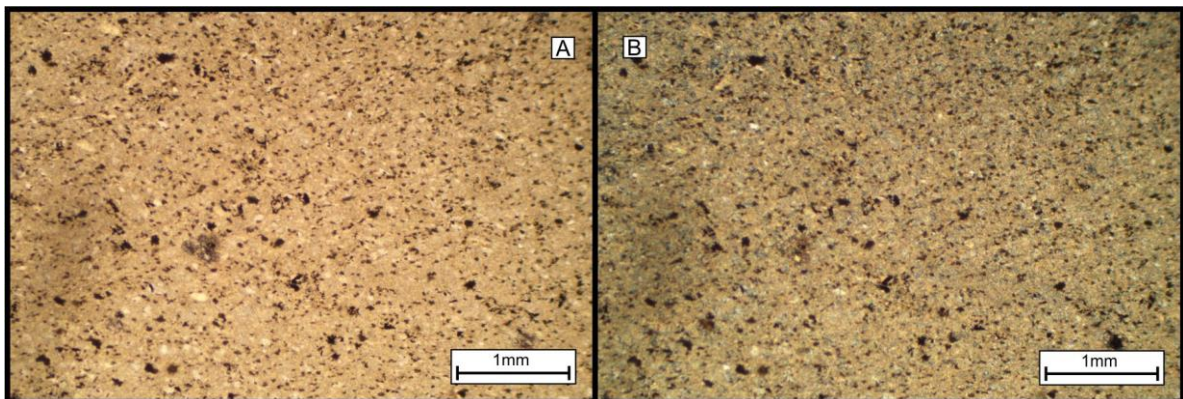
U metaalevrolitskoj jedinici nisu zapažene veće koncentracije metaličnih minerala, već samo fine impregnacije uglavnom pirita i podređeno arsenopirita, veličine zrna do 0,2 milimetara (slika 12).

Metapeščari i metaalevroliti u većini slučajeva nemaju oštru granicu. U celoj klastičnoj jedinici metaalevroliti se često međusobno mešaju i smenjuju sa peščarima i karbonatima. Smena i ponavljanje ovih jedinica nema gotovo nikakvu pravilnost. U nekim slučajevima se metaalevroliti veoma brzo smenjuju sa metapeščarima, a u nekim se smenjuju samo sa karbonatima.

Jedinica metaalevrolita u dubljim nivoima ispitivanih bušotina, od 250 do 350 metara podlegla je jakim metamorfnim promenama, pa ove stene prelaze u hornfelse.



Slika 11: Izgled jezgara bušotina nabušenih metaalevrolita sa očuvanom laminacijom.



Slika 12: Izgled metaalevrolita u polarizacionom mikroskopu; svi minerali su veoma sitni sa izuzetkom metalicnih koji su veličine do oko 0.2 milimetra.

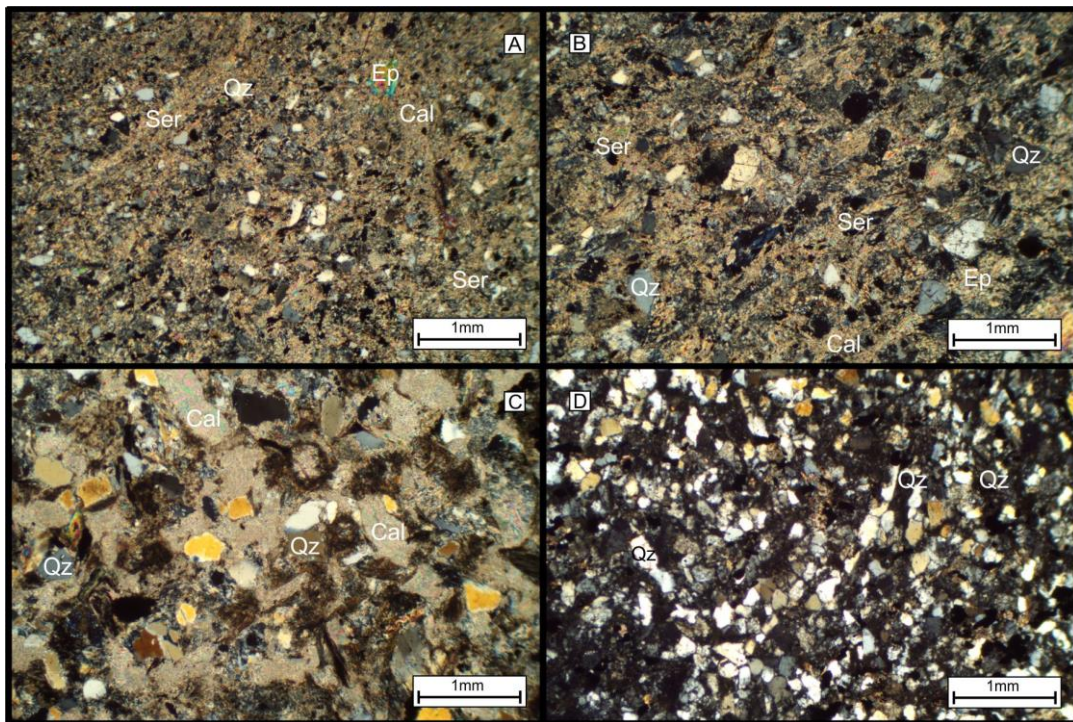
METAPEŠČARI

Metapešćari su izgrađeni od zrna kvarca, odlomaka karbonatnih stena, albita, hlorita, epidota, coisita, kalcita, aktinolita-tremolita, odlomaka serpentinita i hromita. Deluju uslojeno zbog aktinolita-tremolita i epidota koji se ponekad javljaju u vidu traka koje se smenjuju sa pešćarskom komponentom (slika 13). Hlorit zajedno sa sericitom, zemljastim epidotom, aktinolitom-tremolitom i kalcitom sačinjava matriks stene (slika 14). Kalcit je mikrokristalast. U pojedinim šupljinama i većim porama rekristalisao je u krupnija zrna, kad pokazuje karakteristične interferentne boje. Gotovo uvek je u direktnom kontaktu sa epidotom. Kvarc je uglavst i dobro sortiran. Samo pojedina zrna pokazuju zaobljene forme. U ovoj jedinici se često nalaze fragmenti kvarcita, odlomci krečnjaka po kojima se razvijaju

kristali epidota i odlomci rožnaca. U delu metapeščara koji je bogatiji karbonatnom komponentom, mogu se pronaći i fosilni ostaci korala i orbitolina, koji su prekrystalisali i u potpunosti su izgrađeni od kalcita. Metapeščari od metaličnih minerala sadrže magnetit i titanomagnetit, a od sulfidnih minerala pojavljuju se pirit, halkopirit i arsenopirit koji je podređen.



Slika 13: Smena peščara i laporaca u bušotini 294/18.



Slika 14: Jedinica metapeščara, kvarcni pešari sa različitim dimenzijama klasta, uglavnom dobro sortiranih i uglastih. Na slici A i B vezivo je kalcitsko-sericitsko-epidotskog tipa, na slici C vezivo je dominantno od kalcita, dok je na slici D vezivo kalcitsko-glinovitog tipa. (Ser-sericit, Cal-kalcit, Ep-epidot, Qz-kvarc), skraćenice po Kretz (1983).

METAKONGLOMERATI

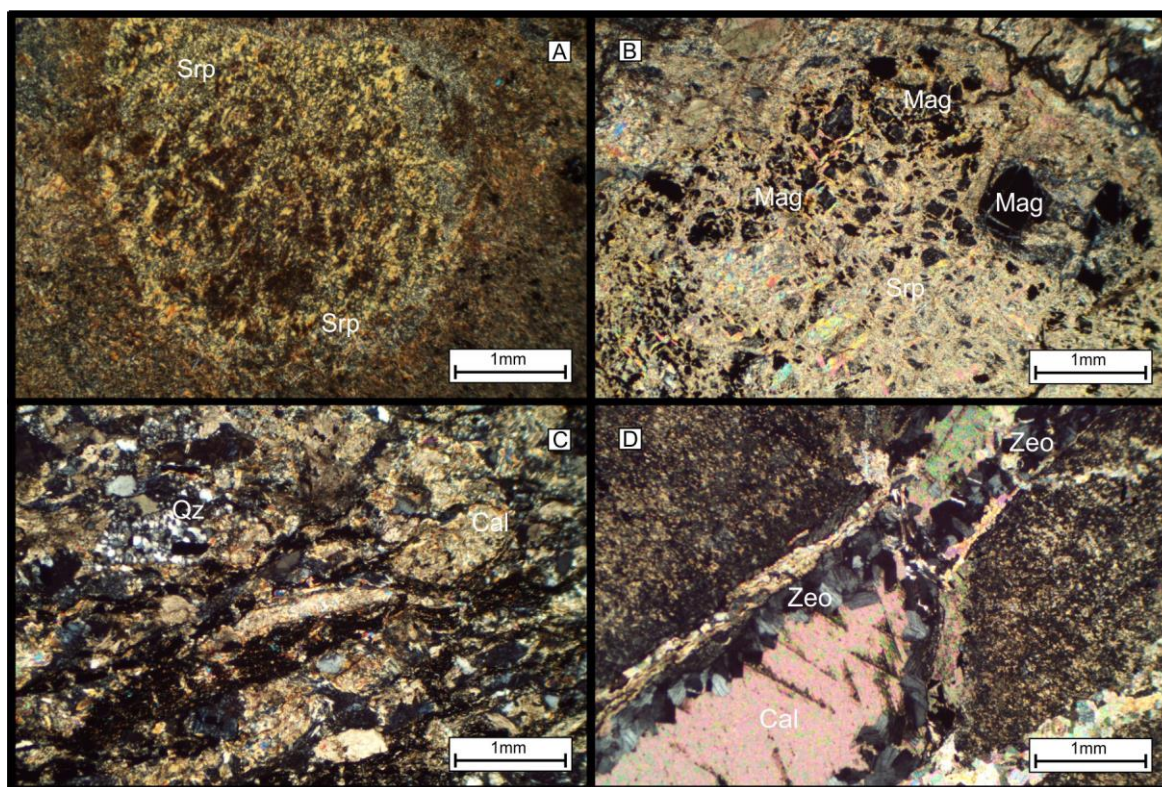
Jedinica metakonglomerata obuhvata i brečizirani materijal koji je razvijen samo u delovima kontakta između dve jedinice razdvojene pukotinsko-rasednim sistemom ili u zoni kontakta sedimenata i dajka kvarcilitatskog sastava. Zbog malog rasprostranjenja brečiziranih stena i veze sa kasnijim geološkim procesima, u daljem tekstu neće biti obrađivani kao posebna jedinica.

Jedinica metakonglomerata može se dalje podeliti u dve subgrupe: polimiktne i monomiktne metakonglomerate. Monomiktne metakonglomerate izgrađeni su ili od valutaka kvarcita ili od valutaka krečnjaka. Porni prostor ili cement kvarcnih metakonglomerata je glinovito-karbonatni materijal, koji je sada u potpunosti promenjen u sericitsko-hloritsko-kalcitski cement.

Kod karbonatnih metakonglomerata, valuci krečnjaka su kompletno prekrystalisali u kalcit. Karbonatni cement je delom prešao u zemljasti epidot, a ponegde su razvijeni i krupni kristali epidota. U njima mogu da se nađu metalni minerali u vidu retkih zrna pirita, mada znatno ređe nego u prethodnim jedinicama.



Slika 15: Polimiktne konglomerate sa valuticama kvarca, karbonata i serpentinita.



Slika 16: Polimiktni metakonglomerati; na slikama A i B su metakonglomerati koji su izgrađeni dominantno od valutica serpentinisanih peridotita (Srp), na slici B se vidi praškasti magnetit (Mag) zaostao nakon alteracije peridotitskog odlomka. Na slici C mogu se videti i odlomci kvarcита, kao i valutci sa karbonatnim sastavom. Na slici D, narastanje zeolitskih (Zeo) minerala po obodu pukotine zapunjene kalcitom (Cal), skraćenice po Kretz (1983).

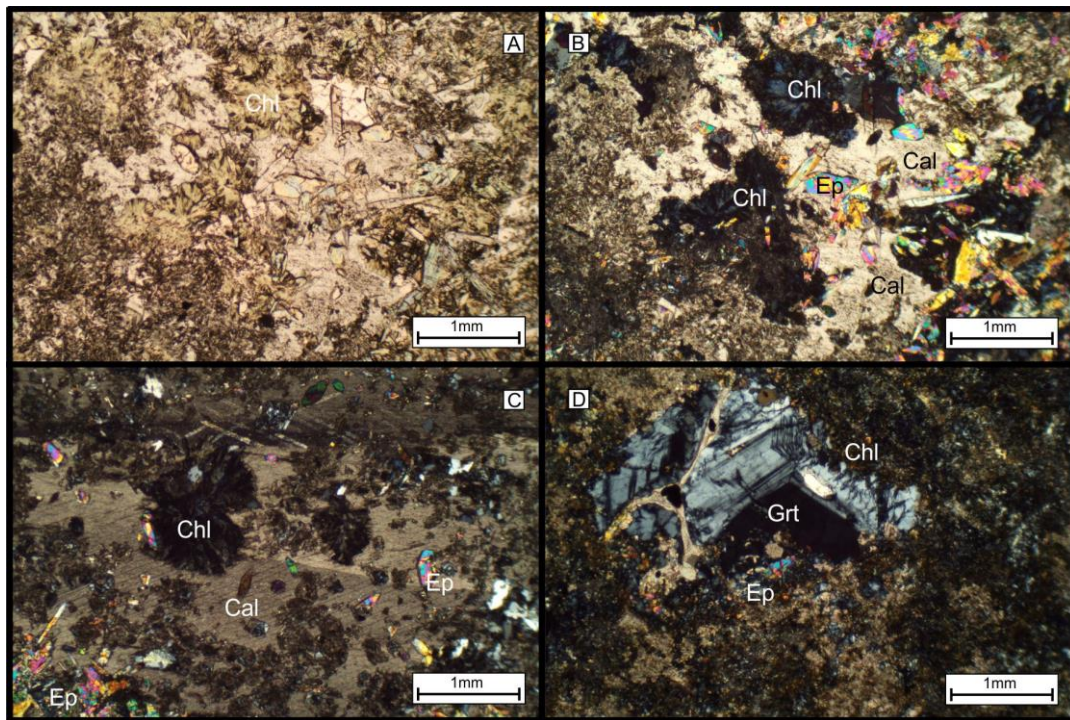
Polimiktne metakonglomerate sačinjavaju valuci kvarcита, karbonatnih stena, serpentinisanih peridotita, peščara, alevrolita i rožnaca (slika 15). U delovima koji sadrže veći procenat karbonata razvijeni su kristali epidota i coisita dimenzija do 3 milimetra. U raspadnutim serpentinitiskim valucima formirani su brojni krupni kristali aktinolit-tremolita, dok su pojedini valuci serpentinita u potpunosti zamenjeni ovim mineralima. Ukoliko se u valucima nalaze i zrna hromita, po ivicama im se razvijaju žuti epidoti-pistaciti. Na pojedinim zrnima hromita se u obodnim delovima razvija magnetit, mineral koji je gotovo uvek prisutan u kompletno promenjenim valucima serpentinita, gde se nalazi u vidu praškastog magnetita i gradi mrežaste forme (slike 16a i 16b). U polimiktnim metakonglomeratima često se pronalaze i valuci izgrađeni od alevrolitsko-glinovite komponente. Karbonatni valuci često imaju „venac“ izgrađen od albita, koji pokazuje bližnjeje. Polimiktni metakonglomerati koji se nalaze blizu pukotinsko-rasedne zone su brečizirani, a pukotinski sistem je zapunjen sekundarnim kalcitom i zeolitima iz grupe laumontita (slika 16d).

KLASTIČNO-KARBONATNA JEDINICA

Klastično-karbonatna jedinica čini prelaz između klastične i karbonatne jedinice (slika 17), pri čemu metapeščari iz gore pomenute klastične jedinice sadrže karbonate u vidu veziva ili cementa. Klastično-karbonatna jedinica se odlikuje većom zastupljenošću karbonatnog cementa i većim brojem karbonatnih odlomaka u metapeščarima i metakonglomeratima. Povećan sadržaj kalcijum karbonata u ovim stenama, kao rezultat metamorfnih promena, manifestuje se većim i bolje razvijenim kristalima epidota, coisita i kalcita (slike 18a, 18b, 18c). Pojava radijalnozrakastog hlorita koji u ukrštenim nikolima ponekad pokazuje izotropnost i pravilne šestougone forme je česta, posebno u delovima sa povećanim sadržajem karbonata.

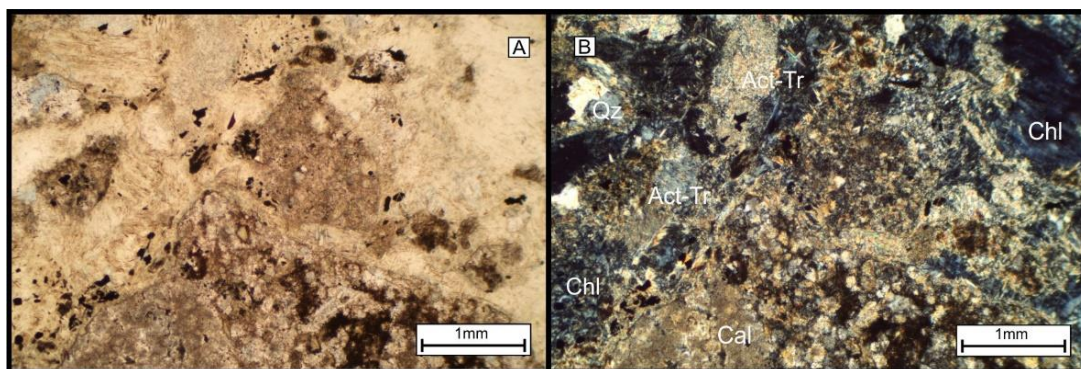


Slika 17: Peskoviti karbonati iz klastično karbonatne jedinice, metamorfisani u epidotske skarnove.



Slika 18: Na slikama A, B i C su radijalno zrakasti hloriti (Chl) udruženi sa epidotom (Ep) u klastično-karbonatnoj jedinici. Na slici D prikazan je granat (Grt) sa sektorskim pomračenjem okružen hloritom (Chl) i epidotom (Ep), skraćenice po Kretz (1983).

Klastično-karbonatni metaalevroliti pokazuju veću zastupljenost zemljastog epidota, dok od metalinih minerala sadrže pirit, halkopirit i arsenopirit. Najveći sadržaj metalinih minerala vezan je za metapeščare i metakonglomerate klastično-karbonatne jedinice. U njima se pored pomenutih metalinih minerala mogu pronaći još i pirotin, galenit i sfalerit koji su formirani u pornim ili intersticijskim prostorima između valutaka (slika 19). Takođe treba napomenuti da ovu jedinicu presecaju brojne orudnjene kvarcne žice debljine od 0,2 do 5 milimetara. U klastično-karbonatnoj jedinici nisu pronađeni fosilni ostaci. Ova jedinica pokazuje kontaktno metamorfne promene, ali se generalno ne može nazvati skarnom, već skarnoidom. Dva glavna metamorfna minerala su epidot i coisit, a pojava granata u ovoj jedinici uočena je samo na prelazu ka metapeščarima (slika 18d), gde je povišen sadržaj karbonata u dve bušotine sa oznakama 186/18 i 294/18.



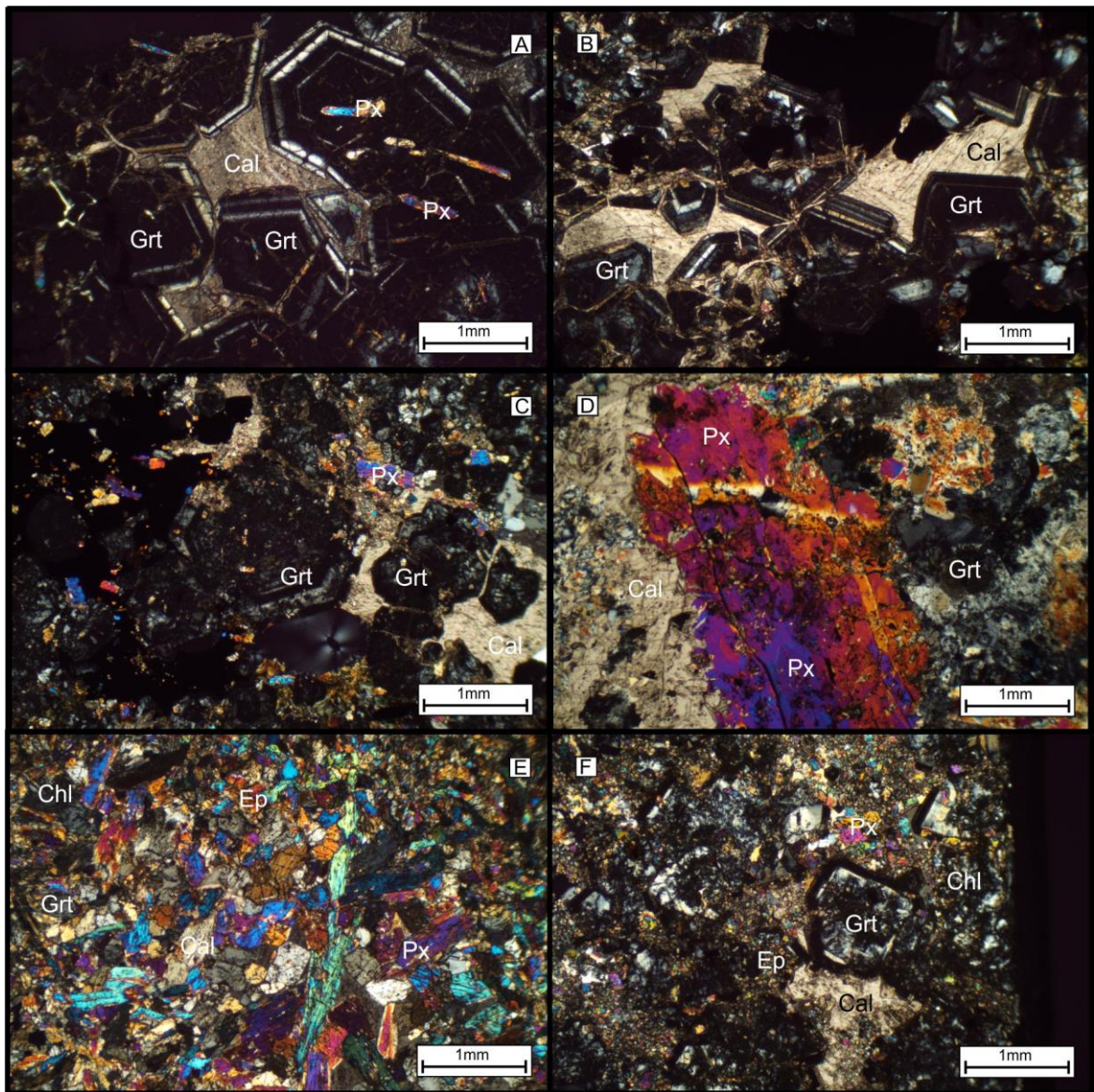
Slika 19: Klastično-karbonatna jedinica koja je izgrađena od mešavine karbonatno-alevrolitsko-peščarskih klasta i od klasta raspadnutih peridotitskih stena, sada potpuno izgrađena od aktinolit-tremolita (Act-Tr), spinela, hlorita (Chl), kvarca (Qz), magnetita i pirotina, skraćenice po Kretz (1983).

KARBONATNA JEDINICA

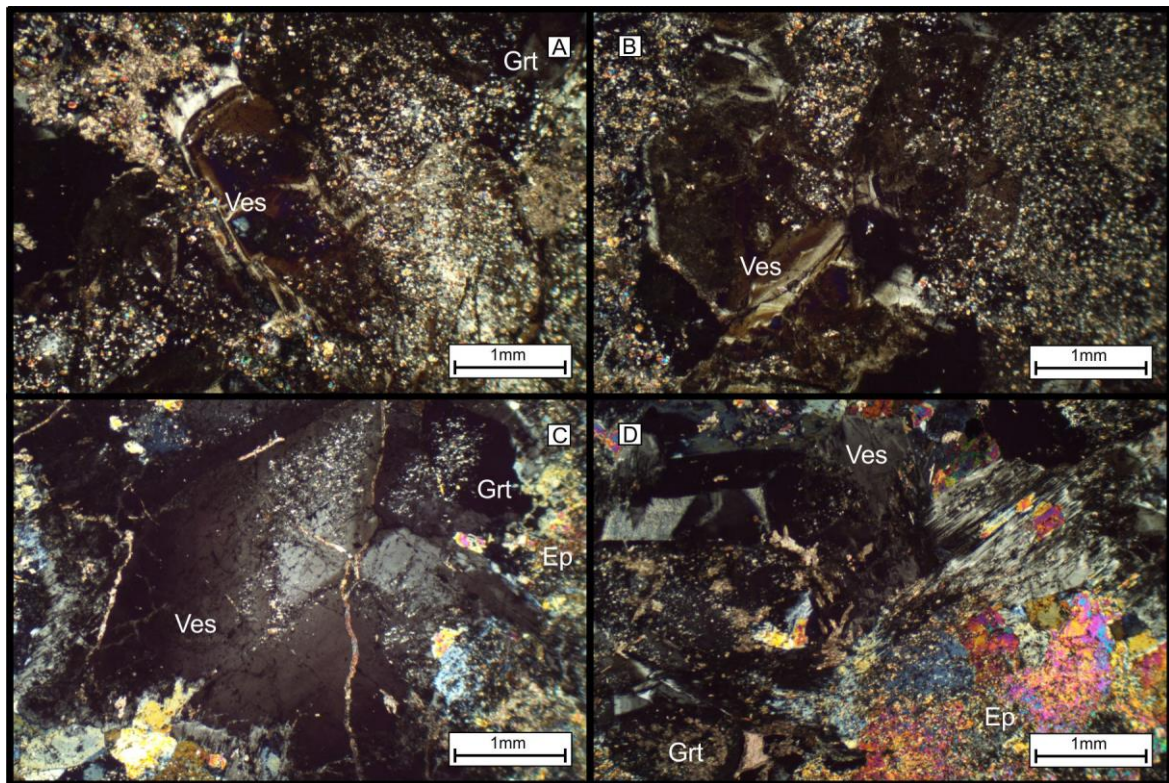
Karbonatna jedinica je nabušena samo u dve bušotine i to 330A/18 i 352/18. U pitanju su prekrystalisali krečnjaci sa visokim sadržajima kalcijum-karbonata, metamorfisani u mermere u dubljim nivoima bušotina (dubine preko 500 metara). U nivoima od 250 do 350 metara, karbonatna jedinica je podlegla jakim metamorfnim promenama i u potpunosti je skarnizirana (slika 20). Skarnovi u ovoj jedinici su izgrađeni od granata, piroksena i vezuvijana, podređeno su prisutni epidot i hlorit, sa malom zastupljenošću kvarca i kalcita. Zapažaju se brojni metalični minerali od kojih najveći procenat zauzimaju galenit, sfalerit i pirotin, dok su pirit, arsenopirit i pirotin manje zastupljeni. Pirokseni se javljaju u zrnima veličine do 1 milimetra, dok granati mogu biti i većih dimenzija, do 3 milimetra (slike 21d, 21e). Granati uglavnom ne pokazuju tipičnu granatsku izotropnost sa ukrštenim nikolima, već anizotropnost koja se ispoljava zonarnim ili sektorskim pomračenjem (slike 21a, 21b, 21c i 21f). Uglavnom su pravilnih šestougaoih formi i u direktnom kontaktu sa kalcitom i metaličnim mineralima. Zrna vezuvijana su uglavnom u pravilnim idiomorfnim prizmama, sa karakterističnim sivo-ljubičastim interferentnim bojama i visokim reljefom (slika 22). Dimenzije zrna retko prelaze 3 milimetra.



Slika 20: Skarnizirana karbonatna jedinica koja je u pojedinim delovima jako orudnjena, a u pojedinim je presecaju fine lamine tamno-sivih nijansi.

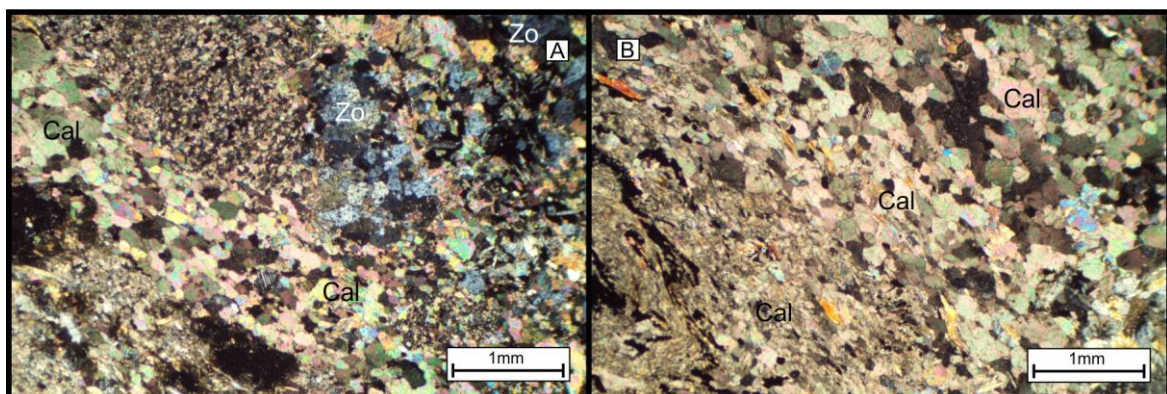


Slika 21: A, B i C skarnizirana zona u karbonatnoj jedinici dominantno izgrađena od idiomorfnih granata (Grt), piroksena (Px) i kalcita (Cal). D, kristal piroksena višestruko veći od kristala granata (Grt), E, asocijacija granata, piroksena, epidota, hlorita (Chl) i kalcita (Cal). F, anizotropni kristali granata u asocijaciji sa piroksenom, epidotom, hloritom i kalcitom (Kostić i dr. 2021), skraćenice po Kretz (1983).



Slika 22: A, B, C i D, vezuvijan (Ves) u zoni intenzivne skarnizacije u vidu krupnih kristala veličine do 5 milimetra, udružen sa piroksenom (Px), granatom (Grt) i epidotom (Ep), skraćenice po Kretz (1983).

U dubljim delovima bušotine karbonatna jedinica ne pokazuje intenzivne metamorfne promene u vidu skarnizacije, već se promene ogledaju u prekrystalizaciji kalcita, sa manjim pojavama coisita (slika 23). U najdubljim delovima bušotine, karbonatna jedinica od minerala sadrži i hromit pored coisita i često je ispresecana tankim kalcitskim žicama koje sadrže sitan epidot.



Slika 23: Prekrystalisali kalcit (Cal) sa coisitom (Zo) u mermerima iz dubljih delova karbonatne jedinice, skraćenice po Kretz (1983).

HEMIJSKI SASTAV MINERALA KONTAKTNO METAMORFNIH STENA RUDNIKA

Kako ne bi došlo do greške prilikom određivanja pojedinih mineralnih faza, upotrebom više različitih metoda potvrdili smo prisusvo 13 faza (slika 24).

Metoda Mineral	Optička mikroskopija	Skenirajuća elektroska mikroskopija	Rendgenska difrakcija praha
Kvarc	██████████	██████████	██████████
Kalcit	██████████	██████████	██████████
Hlorit	██████████	██████████	██████████
Epidot	██████████	██████████	██████████
Akt-Tre	██████████	██████████	██████████
Feldspat	██████████	██████████	██████████
Granat	██████████	██████████	██████████
Piroksen	██████████	██████████	██████████
Vezuvijan	██████████	██████████	██████████
Talk	██████████	██████████	██████████
Sericit	██████████	██████████	██████████
Zeoliti	██████████	██████████	██████████
Min. glina	██████████	██████████	██████████

Minerali u metaklastitima

Metoda Mineral	Optička mikroskopija	Skenirajuća elektroska mikroskopija	Rendgenska difrakcija praha
Kvarc	██████████	██████████	██████████
Kalcit	██████████	██████████	██████████
Hlorit	██████████	██████████	██████████
Epidot	██████████	██████████	██████████
Akt-Tre	██████████	██████████	██████████
Feldspat	██████████	██████████	██████████
Granat	██████████	██████████	██████████
Piroksen	██████████	██████████	██████████
Vezuvijan	██████████	██████████	██████████
Talk	██████████	██████████	██████████
Sericit	██████████	██████████	██████████
Zeoliti	██████████	██████████	██████████
Min. glina	██████████	██████████	██████████

Minerali u skarnovima

Metoda Mineral	Optička mikroskopija	Skenirajuća elektroska mikroskopija	Rendgenska difrakcija praha
Kvarc	██████████	██████████	██████████
Kalcit	██████████	██████████	██████████
Hlorit	██████████	██████████	██████████
Epidot	██████████	██████████	██████████
Akt-Tre	██████████	██████████	██████████
Feldspat	██████████	██████████	██████████
Granat	██████████	██████████	██████████
Piroksen	██████████	██████████	██████████
Vezuvijan	██████████	██████████	██████████
Talk	██████████	██████████	██████████
Sericit	██████████	██████████	██████████
Zeoliti	██████████	██████████	██████████
Min. glina	██████████	██████████	██████████

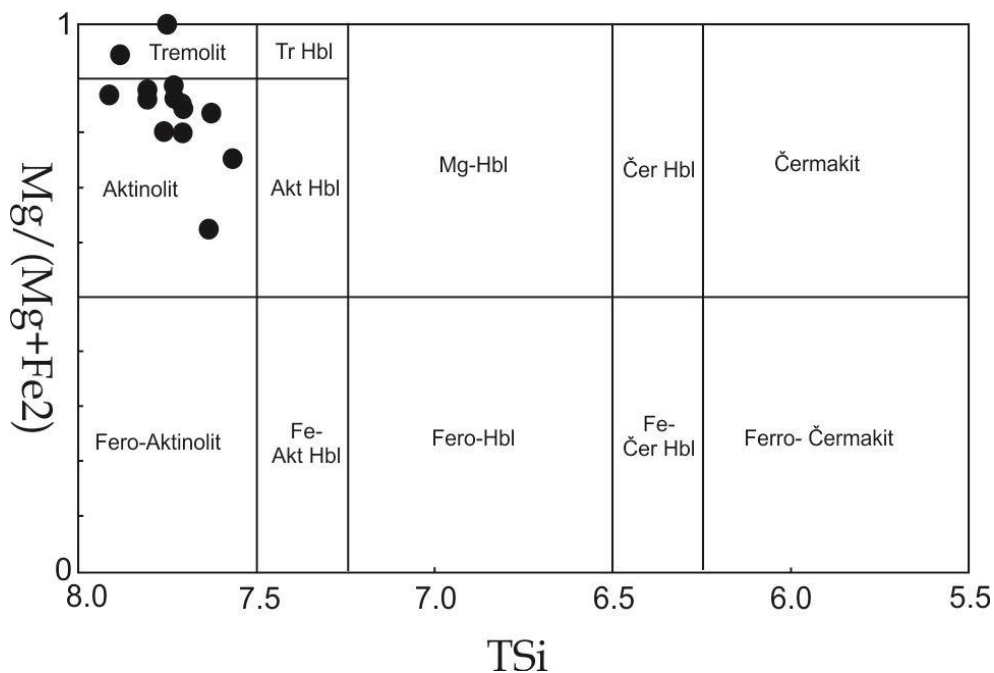
Minerali u hornfelsima

Slika 24: Mineralne faze potvrđene metodama optičke mikroskopije, SEM i XRPD

Radi bliže odredbe minerala koji izgrađuju stenu, odredbe PT uslova u kojima su stene nastale pomoću termodinamičkih softvera, karakterističnim mineralima iz jedinice metaklastita, hornfelsa, skarnova i peridotita određen je hemijski sastav. Za ova ispitivanja sistematski su izabrani uzorci po intenzitetu metamorfnih promena, karakterističnih mineralnih asocijacija i međusobnih odnosa. Pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa na koji su povezani energetska-disperzivni i talasno-disperzivni spektrometri izvršene su hemijske analize minerala.

AMFIBOLI

Svi ispitivani amfiboli pripadaju aktinolitima i tremolitima. Ispitivani amfiboli nalaze se samo u dve nabušene jedinice, u metaklastitima i hornfelsima. Merenja pokazuju da je hemizam amfibola u jedinici metaklastita prilično uniforman, gde vrednosti gvožđa, aluminijuma, magnezijuma i kalcijuma nemaju velikih varijacija. Amfiboli u hornfels jedinici pokazuju niže vrednosti magnezijuma i više vrednosti gvožđa. Na klasifikacionom dijagramu prema Leake (1978) se vidi da su svi ispitivani amfiboli iz jedinice metaklastita i hornfelsa u grupi aktinolit/tremolita (slika 25). Hemijski sastav amfibola prikazan je u tabeli 2.



Slika 25: Amfiboli u jedinici metaklastita i hornfelsa na klasifikacionom dijagramu (Leake, 1978)

Tabela 2: Hemijski sastav amfibola iz jedinice metaklastita i hornfelsa (nastavak na sledećoj strani)

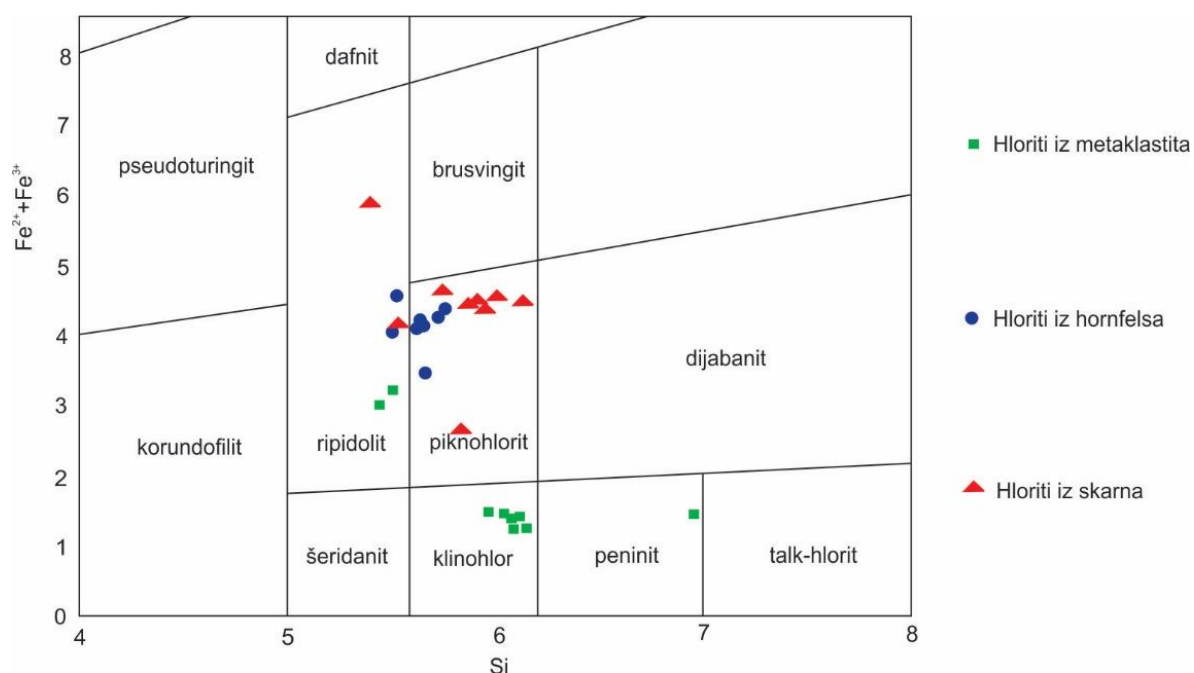
	219	219	226	226	226	226	458	458	465	465
	Tremolit	Aktinolit	Tremolit	Aktinolit	Aktinolit	Aktinolit	Aktinolit	Aktinolit	Aktinolit	Aktinolit
	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit
SiO ₂	56.48	54.95	54.71	55.13	54.89	54.29	56.77	55.21	56.26	56.17
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	0.57	2.75	1.84	1.60	1.77	1.72	0.37	3.45	1.00	1.58
FeO	2.48	6.46	5.56	5.94	6.32	7.52	5.75	7.92	5.41	6.09
MnO	-	-	-	-	0.31	-	-	-	0.23	-
MgO	22.77	19.76	20.19	20.64	20.43	21.38	21.38	17.95	21.82	20.79
CaO	13.76	13.43	12.98	13.74	13.83	13.01	13.15	12.84	13.28	13.46
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	0.42	-	-
Total	96.06	97.35	96.28	97.05	97.55	97.92	97.42	97.79	98.00	97.91
Strukturna formula na 23 O										
Si	7.886	7.706	7.748	7.753	7.711	7.627	7.915	7.759	7.806	7.809
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	0.094	0.455	0.307	0.265	0.293	0.285	0.061	0.571	0.164	0.259
Fe	0.290	0.758	0.659	0.699	0.742	0.883	0.670	0.931	0.628	0.708
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.037	0.000	0.000	0.000	0.027	0.000
Mg	4.739	4.131	4.263	4.327	4.278	4.478	4.444	3.761	4.513	4.309
Ca	2.058	2.083	2.121	2.070	2.082	2.098	2.089	2.113	2.124	2.108
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Nastavak tabele 2: Hemijski sastav amfibola iz jedinica metaklastita, hornfelsa i skarnova

	465	465	506A	552	560
	Aktinolit	Aktinolit	Aktinolit	Aktinolit	Aktinolit
	Metaklastit	Metaklastit	Hornfels	Hornfels	Hornfels
SiO ₂	55.25	54.98	52.69	52.88	52.40
TiO ₂	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	2.05	2.14	-	3.68	4.71
FeO	5.88	4.82	5.80	9.91	13.52
MnO	-	-	1.39	-	0.30
MgO	20.81	20.99	12.94	16.95	12.59
CaO	13.32	13.52	24.74	13.89	12.80
Na ₂ O	-	-	-	-	0.29
K ₂ O	-	-	-	-	0.60
Total	97.31	96.45	97.56	97.31	97.21
Strukturna formula na 23 O					
Si	7.733	7.732	7.709	7.568	7.636
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	0.338	0.355	0.000	0.621	0.809
Fe	0.688	0.567	0.710	1.186	1.648
Mn	0.000	0.000	0.172	0.000	0.037
Mg	4.342	4.400	2.822	3.616	2.735
Ca	2.037	2.047	1.958	1.960	1.978
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.082
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.112
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

HLORITI

Ispitivani hloriti iz metaklastita, hornfelsa i skarnova razlikuju se po sadržajima aluminijuma, gvožđa, silicijuma i magnezijuma. Promena sadržaja gvožđevite komponente praćena je i promenom litologije, pa tako veći procenat gvožđevite komponente sadrže hornfelsi i skarnovi u odnosu na metaklastite. Sadržaj aluminijuma u hloritima se povećava sa porastom dubine, a najveće vrednosti dostiže na prelazu iz metaklastita u hornfelse. Prema Hey-ovoj (1954) klasifikaciji (slika 26), hloriti iz jedinice metaklastita su klinohloriti, peniniti i ripidoliti, dok su piknohloriti i ripidoliti dominantni kod hornfelsa i skarnova. Hemijski sastav hlorita i klasifikacija prikazani su u tabeli 3.



Slika 26: Hloriti iz jedinice metaklastita i hornfelsa na klasifikacionom dijagramu (Hey, 1954)

Tabela 3: Hemijski sastav hlorita iz jedinica metaklastita, hornfelsa i skarnova (nastavak na sledećoj strani)

	219	219	219	219	226	226	250	250
	Hlorit	Hlorit	Hlorit	Hlorit	Hlorit	Hlorit	Hlorit	Hlorit
	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit
SiO ₂	30.89	30.70	30.41	31.16	34.72	31.10	26.83	26.44
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	15.77	14.47	15.44	15.08	12.21	13.83	21.24	21.35
FeO	10.35	10.17	10.73	9.76	9.51	9.91	17.75	16.70
MnO	-	-	-	-	-	0.35	0.71	0.64
MgO	27.22	26.99	27.45	25.36	22.02	20.87	20.23	20.69
CaO	0.18	0.23	-	0.32	1.75	-	-	-
Na ₂ O	-	-	-	-	-	0.31	-	-
K ₂ O	-	-	-	0.3	1.32	2.47	-	-
CrO ₂	3.34	3.86	3.15	4.60	4.18	4.30	-	-
Total	87.75	86.43	87.18	86.58	85.71	83.14	86.76	85.82
Strukturna formula na 36 O								
	klinohlor	klinohlor	klinohlor	klinohlor	peninit	dijabantit	ripidolit	ripidolit
Si	6.083	6.153	6.045	6.227	6.970	6.529	5.491	5.444
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	3.661	3.419	3.618	3.552	2.889	3.422	5.124	5.182
Cr	0.520	0.612	0.495	0.727	0.663	0.714	0.000	0.000
Fe	1.534	1.534	1.605	1.468	1.597	1.750	3.038	2.876
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.062	0.123	0.112
Mg	7.991	8.064	8.135	7.554	6.589	6.531	6.172	6.351
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.038	0.049	0.000	0.069	0.376	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.126	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.076	0.338	0.661	0.000	0.000

Nastavak tabele 3: Hemijski sastav hlorita iz jedinica metaklastita, hornfelsa i skarnova (nastavak na sledećoj strani)

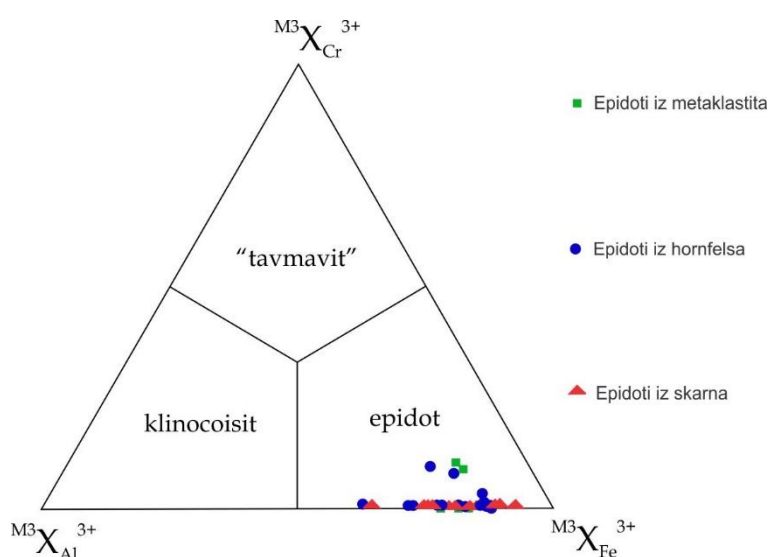
	283	287	287	287	287	287	298	298	311	311
	Hlorit	Hlorit	Hlorit	Hlorit	Hlorit	Hlorit	Hlorit	Hlorit	Hlorit	Hlorit
	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn
SiO ₂	26.22	27.08	25.97	26.06	26.85	28.36	26.40	24.26	26.68	29.84
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	18.70	17.75	19.30	16.83	19.69	20.64	20.58	19.42	18.91	18.61
FeO	23.43	22.74	22.37	24.43	22.61	22.62	22.15	31.33	23.39	23.38
MnO	0.88	0.87	0.72	0.71	0.83	0.76	1.11	1.26	0.95	1.14
MgO	17.21	17.37	16.25	18.91	16.29	18.15	16.97	10.33	15.09	15.25
CaO	0.23	-	-	-	0.32	-	-	-	-	-
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CrO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	86.67	85.81	84.61	86.94	86.59	90.53	87.21	86.60	85.02	88.22
Strukturna formula na 36 O										
	piknohlorit	piknohlorit	ripidolit	ripidolit	piknohlorit	piknohlorit	ripidolit	ripidolit	piknohlorit	piknohlorit
Si	5.657	5.780	5.444	5.566	5.663	5.679	5.519	5.412	5.754	6.151
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	4.756	4.465	4.769	4.237	4.895	4.872	5.071	5.106	4.818	4.522
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	3.804	4.059	3.922	4.364	3.988	3.788	3.872	5.845	4.228	4.031
Mn	0.161	0.157	0.128	0.128	0.148	0.129	0.197	0.238	0.174	0.199
Mg	5.535	5.526	5.909	6.021	5.122	5.418	5.288	3.435	4.862	4.686
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.053	0.000	0.000	0.000	0.072	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Nastavak tabele 3: Hemijski sastav hlorita iz jedinica metaklastita, hornfelsa i skarnova

	311	311	311	458	465	484	533	560	539
	Hlorit	Hlorit	Hlorit	Hlorit	Hlorit	Hlorit	Hlorit	Hlorit	Hlorit
	Skarn	Skarn	Skarn	Metaklastit	Metaklastit	Skarn	Skarn	Hornfels	Hornfels
SiO ₂	26.93	27.25	27.52	30.20	30.78	28.88	27.97	28.14	27.77
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	18.79	20.08	19.63	16.86	16.04	20.61	18.53	21.11	19.44
FeO	25.95	25.25	25.20	11.10	9.60	17.51	25.46	21.75	26.12
MnO	0.95	0.82	1.12	-	-	0.86	0.93	0.79	1.53
MgO	15.21	15.99	15.46	25.87	27.34	20.33	16.11	18.72	14.43
CaO	-	-	-	-	-	0.43	0.27	-	0.34
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CrO ₂	-	-	-	4.98	3.16	-	-	-	-
Total	87.84	89.39	88.93	89.01	86.92	88.62	89.27	90.50	89.63
Strukturna formula na 36 O									
	piknohlorit	piknohlorit	piknohlorit	klinohlor	klinohlor	piknohlorit	piknohlorit	piknohlorit	piknohlorit
Si	5.796	5.714	5.806	6.084	5.912	5.823	5.890	5.687	5.858
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	4.767	4.963	4.882	3.737	3.890	4.898	4.600	5.029	4.834
Cr	0.000	0.000	0.000	0.494	0.771	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	4.203	3.984	4.002	1.428	1.636	2.657	4.035	3.308	4.146
Mn	0.173	0.146	0.200	0.000	0.000	0.147	0.166	0.135	0.273
Mg	4.880	4.998	4.862	8.056	7.549	6.110	5.058	5.640	4.538
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.093	0.061	0.000	0.077
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

EPIDOTI

Epidot je mineral koji je sa hloritom prisutan u gotovo svim jedinicama i delovima ispitivanih bušotina. Sva ispitivana zrna su homogenog sastava, iako pojedina zrna epidota u jedinici skarnova pokazuju optičku zonarnost. Hemijski sastav epidota prikazan je u tabeli 4. Ukupan broj katjona preračunat je na 25 kiseonika. Sadržaj Fe^{3+} u metaklastitima se kreće od 6.80% do 11.56%, u hornfelsima 5.18% do 13.25%, a u skarnovima 5.19% do 12.25% težinskih procenata oksida. Sa povećanjem gvožđa smanjuje se sadržaj aluminijuma, pa ovo ukazuje da ispitivani epidoti pripadaju seriji čvrstih rastvora. U jedinicama metaklastita i hornfelsa pojedina zrna imaju u svom hemijskom sastavu od 0.26 do 4.77 % hroma. Ova zrna u optičkom mikroskopu pokazuju žutu boju. Hemijske analize epidota nanešene su na trokomponentni dijagram koji prikazuje sastav epidotske grupe (slika 27).



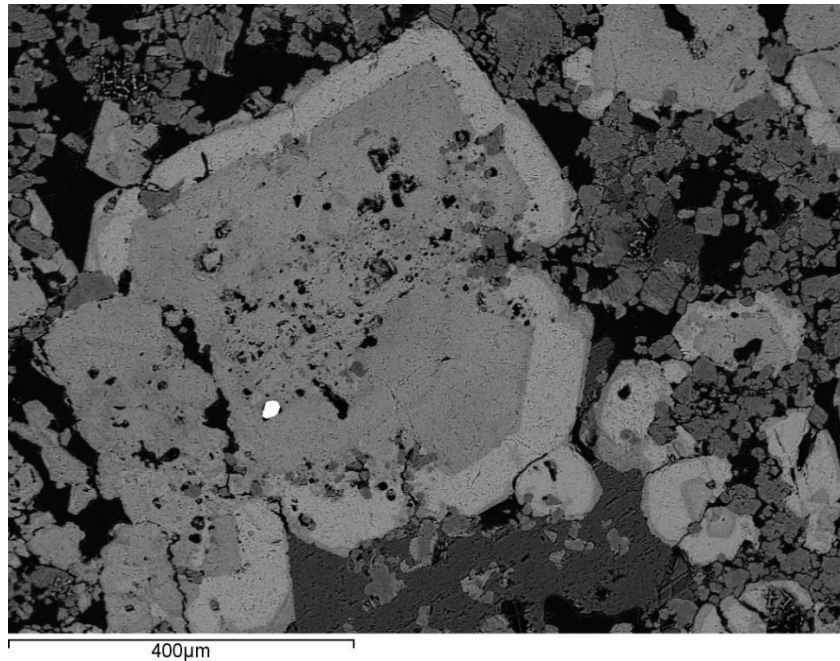
Slika 27: Trokomponentni dijagram epidotske grupe, $\text{Ca}_2\text{M}^{3+}\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$ klasifikacija izvršena po supstituciji M^{3+} katjona sa Al u oktaedarskoj koordinaciji sa $\text{M}^{3+}=\text{Al}^{3+}, \text{Cr}^{3+}$ i Fe^{3+} , što odgovara klinocoisitu, „tavmavitu“ i epidotu, kao krajnjim članovima (Armbruster i dr. 2006, Franz i dr. 2004)

GRANATI

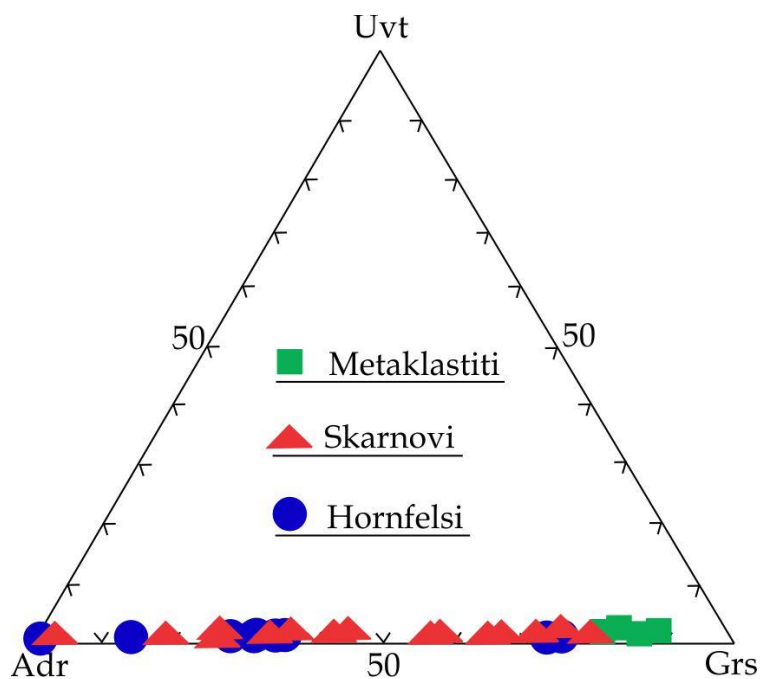
Granati su najzastupljeniji u skarnovima, a podređeni su ili odsutni u hornfelsima i metaklastitima. Pripadaju grupi kalcijjskih granata od grosulara do andradita. Optička anizotropnost manifestuje se i u vidu hemijske zonarnosti sa porastom sadržaja gvožđa i opadanjem aluminijuma od centra ka obodu zrna. Sadržaj gvožđa se kreće od 4.01 do 31.85%, dok je sadržaj aluminijuma u rasponu od 0.47 do 21.57%. Anizotropna zrna koja pokazuju zonarnost su analizirana i na BSE slikama imaju sastav u centru $\text{Grs}_{36.4}$ i $\text{Adr}_{61.8}$, dok na obodu granata preovlađuje andraditska komponenta Adr_{100} (slika 28, Kostić i dr. 2021). Sastav granata je prikazan trokomponentnim dijagramom (slika 29). Sadržaj

titanijuma je najviši u skarnovima i kreće se od 0.27 do 1.34%, dok je sadržaj titanijuma u granatima iz metaklastita i hornfelsa ispod granice detekcije SEM-EDS metode.

Granati iz skarnova imaju nizak sadržaj mangana, do 0.55%, dok viši sadržaj mangana pokazuju samo granati iz hornfelsa. Detaljan hemijski sastav granata prikazan je u tabeli 5. Za preračun granata korišćena je formula po Locock-u (2007) na 12 kiseonika.



Slika 28: BSE snimak zrna granata sa andraditskim (gvožđevitim) obodom (svetlija zona), Kostić i dr. (2021)



Slika 29: Trokomponentni dijagram prikazuje sastav granata. Uvt-uvarovit, Adr-andradit, Grs-grosular, kao krajnji članovi

Tabela 4: Hemijski sastav epidota iz jedinica metaklastita, hornfelsa i skarnova (nastavak na sledećoj strani)

	250	250	250	256	256	287	287	287	287	287
	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot
	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit	Skarn	Skarn	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels
SiO ₂	36.83	36.38	35.98	36.47	37.44	36.42	37.37	36.43	35.53	36.88
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.97
Al ₂ O ₃	26.74	24.85	26.57	25.57	27.24	25.60	28.49	25.51	13.31	27.86
Fe ₂ O ₃	9.44	11.56	9.12	10.61	8.88	10.63	7.28	11.26	12.79	8.02
MnO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.46
MgO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CaO	23.16	24.00	23.43	23.27	23.89	22.74	24.11	23.11	33.71	23.62
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CrO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	96.16	96.79	95.10	95.92	97.45	95.40	97.25	96.32	96.77	97.81
Strukturna formula na 25 O										
Si	4.819	4.815	4.745	4.805	4.821	4.841	4.778	4.819	5.248	4.702
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.108	0.093
Al	4.124	3.877	4.130	3.971	4.134	4.011	4.293	3.977	2.317	4.186
Fe	0.930	1.151	1.006	1.051	0.860	1.063	0.700	1.121	1.422	0.855
Mn	0.000	0.000	0.000	0.097	0.000	0.000	0.000	0.000	0.058	0.050
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	3.247	3.404	3.310	3.285	3.296	3.239	3.303	3.275	5.334	3.226
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Nastavak tabele 4: Hemijski sastav epidota iz jedinica metaklastita, hornfelsa i skarnova (nastavak na sledećoj strani)

	283	283	283	283	283	283	283	283	283	283
	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot
	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels
SiO ₂	35.87	36.56	36.84	36.79	36.15	36.66	36.33	37.12	36.30	36.79
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	25.45	26.73	27.94	26.91	24.14	15.70	16.17	27.96	25.86	27.41
Fe ₂ O ₃	11.51	9.52	8.66	9.11	12.91	6.49	5.18	7.74	9.29	8.41
MnO	-	-	0.35	-	-	0.38	0.94	-	0.26	-
MgO	-	-	-	-	-	0.52	-	-	-	-
CaO	23.99	23.62	23.78	23.39	23.19	34.49	34.10	23.77	23.72	23.81
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CrO ₂	-	-	-	-	-	4.21	4.29	0.26	0.75	0.21
Total	96.81	96.43	97.58	96.19	96.39	98.46	97.02	96.84	96.18	96.64
Strukturna formula na 25 O										
Si	5.206	5.242	5.192	5.261	5.520	5.638	5.891	5.952	5.770	5.940
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	4.401	4.517	4.641	4.536	4.345	2.846	3.090	5.284	4.845	5.216
Fe	1.256	1.142	1.021	1.090	1.649	0.835	0.702	1.038	1.117	1.136
Mn	0.000	0.000	0.042	0.000	0.000	0.050	0.129	0.000	0.035	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.119	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	3.730	3.599	3.591	3.584	3.794	5.683	5.925	4.083	4.040	4.119
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.512	0.550	0.033	0.000	0.027

Nastavak tabele 4: Hemijski sastav epidota iz jedinica metaklastita, hornfelsa i skarnova (nastavak na sledećoj strani)

	292	293	293	293	311	484	484	506	506	506
	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot
	Hornfels	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Hornfels	Hornfels	Hornfels
SiO ₂	36.14	36.82	36.84	37.08	37.55	37.27	38.00	37.21	38.34	38.55
TiO ₂	-	-	-	-	1.04	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	23.69	27.22	25.25	25.09	14.59	30.24	28.64	28.58	29.21	26.35
Fe ₂ O ₃	13.25	9.51	12.17	12.25	10.86	5.19	6.88	7.32	6.53	7.81
MnO	-	-	-	-	-	0.55	-	0.87	0.54	-
MgO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.85
CaO	23.15	23.52	23.49	23.95	33.87	23.71	24.56	23.07	23.28	24.48
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CrO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	96.23	97.08	97.75	98.37	97.90	96.96	98.07	97.05	97.89	98.04
Strukturna formula na 25 O										
Si	6.067	6.212	6.516	6.243	6.604	6.614	6.969	7.194	7.514	6.600
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.138	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	4.687	5.412	5.264	4.979	3.024	6.325	6.191	6.512	6.747	5.317
Fe	1.673	1.208	1.620	1.725	1.597	0.693	0.949	1.064	0.962	1.118
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.083	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.217
Ca	4.164	4.251	4.452	4.320	6.382	4.508	4.826	4.779	4.889	4.490
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Nastavak tabele 4: Hemijski sastav epidota iz jedinica metaklastita, hornfelsa i skarnova

	525	525	525	525	458	458	533	534	534
	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot	Epidot
	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Metaklastit	Metaklastit	Skarn	Skarn	Skarn
SiO ₂	37.56	37.85	37.51	37.74	37.27	37.20	36.62	36.60	36.70
TiO ₂	-	-	-	-	-	0.31	-	-	-
Al ₂ O ₃	26.18	29.22	25.30	26.24	25.36	25.03	25.42	23.98	26.59
Fe ₂ O ₃	10.30	6.75	11.41	10.26	7.69	6.80	10.56	11.87	8.47
MnO	-	-	-	0.26	-	-	-	-	-
MgO	-	-	-	-	0.53	-	-	-	-
CaO	24.12	24.23	24.11	23.72	23.31	24.11	24.05	23.39	24.02
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CrO ₂	-	-	-	-	4.43	4.77	-	-	-
Total	98.17	98.04	98.32	98.22	98.59	98.22	96.66	95.84	95.78
Strukturna formula na 25 O									
Si	6.507	6.429	6.529	6.528	6.417	6.426	7.956	8.319	8.422
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.040	0.000	0.000	0.000
Al	5.345	5.849	5.190	5.350	5.146	5.096	6.509	6.424	7.192
Fe	1.492	0.959	1.661	1.484	1.107	0.982	1.726	2.030	1.462
Mn	0.000	0.000	0.000	0.038	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.136	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	4.477	4.409	4.496	4.396	4.300	4.463	5.598	5.696	5.906
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.603	0.652	0.000	0.000	0.000

Tabela 5: Hemijski sastav granata iz jedinica metaklastita, hornfelsa i skarnova (nastavak na sledećoj strani)

	267	267	267	267	269	269	270	270	270	270
	Granat	Granat	Granat	Granat	Granat	Granat	Granat	Granat	Granat	Granat
	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn
SiO ₂	37.80	37.26	36.07	35.41	36.94	37.60	36.17	35.88	35.66	36.27
TiO ₂	1.34	1.28	0.49	0.27	0.47	-	-	-	0.51	-
Al ₂ O ₃	18.80	18.37	11.35	8.66	19.63	19.79	6.94	7.28	5.48	8.97
Fe ₂ O ₃	4.90	5.89	15.41	19.44	5.22	5.92	22.10	21.99	23.85	19.96
MnO	0.82	0.99	0.56	0.91	-	-	-	-	-	-
MgO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CaO	35.83	35.35	35.28	34.38	37.02	37.17	34.13	34.75	34.39	35.37
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CrO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	99.49	99.14	99.23	99.07	99.28	100.48	99.34	99.90	99.89	100.57
Strukturna formula na 12 O										
Si	2.904	2.880	2.856	2.842	2.829	2.846	2.911	2.868	2.873	2.861
Al	0.096	0.120	0.144	0.158	0.171	0.154	0.089	0.132	0.127	0.139
Al	1.606	1.553	0.915	0.661	1.601	1.611	0.569	0.554	0.393	0.695
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	0.315	0.381	1.020	1.305	0.334	0.375	1.488	1.470	1.607	1.317
Ti	0.077	0.074	0.029	0.016	0.027	0.000	0.000	0.000	0.031	0.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.053	0.065	0.038	0.062	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	2.948	2.927	2.998	2.956	3.038	3.014	2.943	2.976	2.969	2.989
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Nastavak tabele 5: Hemijski sastav granata iz jedinica metaklastita, hornfelsa i skarnova (nastavak na sledećoj strani)

	276	276	276	276	293	293	293	293	293	293
	Granat	Granat	Granat	Granat	Granat	Granat	Granat	Granat	Granat	Granat
	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn
SiO ₂	35.67	36.57	36.64	38.21	34.62	36.47	35.94	36.57	35.86	34.36
TiO ₂	1.05	0.27	-	-	1.28	-	-	0.84	-	-
Al ₂ O ₃	7.50	9.49	6.98	17.09	5.04	7.82	8.95	9.41	7.83	-
Fe ₂ O ₃	20.48	18.95	22.33	8.63	23.47	21.28	20.15	18.73	22.05	31.85
MnO	0.44	0.31	-	-	-	-	-	0.38	-	0.24
MgO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CaO	34.47	35.04	34.65	36.57	35.17	34.96	34.58	34.09	34.40	33.02
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CrO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	99.61	100.63	100.60	100.50	99.58	100.53	99.62	100.02	100.14	99.47
Strukturna formula na 12 O										
Si	2.861	2.879	2.912	2.918	2.802	2.890	2.864	2.902	2.858	2.846
Al	0.139	0.121	0.088	0.082	0.198	0.110	0.136	0.098	0.142	0.000
Al	0.570	0.760	0.566	1.456	0.283	0.621	0.705	0.782	0.593	0.000
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	1.374	1.248	1.484	0.551	1.589	1.410	1.343	1.243	1.470	2.206
Ti	0.063	0.016	0.000	0.000	0.078	0.000	0.000	0.050	0.000	0.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.030	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.026	0.000	0.017
Na	2.963	2.956	2.950	2.992	3.050	2.969	2.952	2.899	2.937	2.931
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Nastavak tabele 5: Hemijski sastav granata iz jedinica metaklastita, hornfelsa i skarnova (nastavak na sledećoj strani)

	296	296	296	298	298	311	317	317	317	475
	Granat	Granat	Granat	Granat	Granat	Granat	Granat	Granat	Granat	Granat
	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Metaklastit
SiO ₂	36.67	36.72	33.79	37.24	38.43	37.85	37.39	37.02	37.82	38.53
TiO ₂	-	-	-	0.42	-	0.59	0.43	-	0.22	-
Al ₂ O ₃	10.86	14.29	-	13.54	15.71	18.02	17.44	16.34	18.05	20.61
Fe ₂ O ₃	17.60	12.50	31.49	12.83	10.98	7.54	8.06	9.84	7.89	4.01
MnO	-	0.49	-	0.39	0.35	0.52	0.55	0.49	0.52	-
MgO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CaO	34.94	35.02	33.71	34.31	34.95	35.34	36.09	35.96	35.82	36.62
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CrO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	100.07	99.02	98.99	98.73	100.42	99.86	99.96	99.65	100.32	99.77
Strukturna formula na 12 O										
Si	2.887	2.881	2.809	2.940	2.960	2.908	2.872	2.863	2.890	2.924
Al	0.113	0.119	0.000	0.060	0.040	0.092	0.128	0.137	0.110	0.076
Al	0.894	1.203	0.000	1.200	1.386	1.539	1.451	1.352	1.516	1.768
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	1.159	0.820	2.189	0.847	0.707	0.484	0.518	0.636	0.504	0.255
Ti	0.000	0.000	0.000	0.025	0.000	0.034	0.025	0.000	0.013	0.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.000	0.033	0.000	0.026	0.023	0.034	0.036	0.032	0.034	0.000
Na	2.947	2.944	3.002	2.902	2.884	2.909	2.970	2.979	2.933	2.978
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Nastavak tabele 5: Hemijski sastav granata iz jedinica metaklastita, hornfelsa i skarnova

	475	475	475	506A	506A	145	145
	Granat	Granat	Granat	Granat	Granat	Granat c	Granat r
	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit	Hornfels	Hornfels	Skarn	Skarn
SiO ₂	38.61	38.41	38.20	38.54	38.28	36.85	36.70
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	19.41	19.13	21.57	20.08	19.09	0.47	10.08
Fe ₂ O ₃	5.47	5.94	3.42	4.22	5.34	29.19 FeO	16.91 FeO
MnO	0.18	-	0.40	1.11	1.20	-	0.52
MgO	-	-	-	-	-	-	-
CaO	36.40	36.59	36.53	36.23	35.90	34.07	33.98
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-
CrO ₂	-	-	-	-	-	-	0.01
Total	100.07	100.07	100.12	100.18	99.81	100.58	98.20
Strukturna formula na 12 O							
Si	2.936	2.923	2.884	2.923	2.924	2.998	2.948
Al	0.064	0.077	0.116	0.077	0.076	0.002	0.052
Al	1.675	1.639	1.803	1.717	1.643	0.043	0.903
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Fe	0.348	0.378	0.216	0.268	0.341	1.986	1.136
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.012	0.000	0.026	0.071	0.078	0.000	0.035
Na	2.965	2.983	2.955	2.944	2.938	2.970	2.925
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

VEZUVIJAN

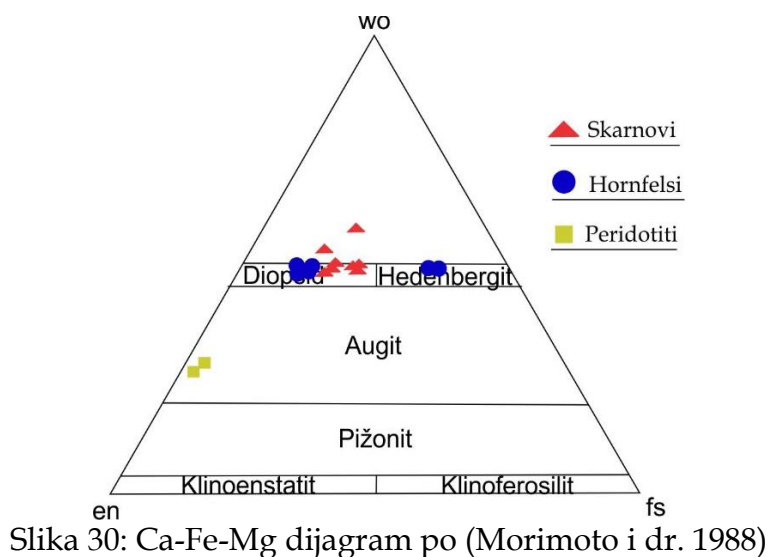
Vezuvijan je konstatovan na prelazu iz hornfelsa u skarnove, kao i u skarnovima gde je u asocijaciji sa granatom i piroksenom. Vezuvijani iz dubljih delova u svom hemijskom sastavu sadrže fluor i hlor, dok u plićim sadrže mangan. Rezultati hemijskih analiza vezuvijana prikazani su u tabeli 6.

Tabela 6: Hemijski sastav vezuvijana iz jedinica hornfelsa i skarnova

	283	283	298	298	298
	Vezuvijan	Vezuvijan	Vezuvijan	Vezuvijan	Vezuvijan
	Hornfels	Hornfels	Skarn	Skarn	Skarn
SiO ₂	36.47	37.04	36.43	36.15	35.79
TiO ₂	0.28	2.31	0.74	0.36	0.25
Al ₂ O ₃	18.21	16.48	15.11	14.93	15.64
Fe ₂ O ₃	5.58	4.33	3.75	4.48	4.40
MnO	-	0.36	-	-	-
MgO	1.21	2.05	5.31	4.05	3.45
CaO	35.97	35.80	34.50	36.35	35.83
Na ₂ O	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-
CrO ₂	-	-	-	-	-
F	-	-	-	0.81	1.88
Cl	-	-	0.22	0.17	0.32
Total	97.72	98.36	95.84	97.30	97.56

PIROKSENI

Pirokseni su utvrđeni u skarnovima, hornfelsima i peridotitima koji se nalaze u podlozi, a rezultati hemijskih analiza prikazani su u tabeli 7. Pirokseni iz skarnova po klasifikacionom Ca-Mg-Fe dijagramu (Morimoto i dr. 1988) odgovaraju diopsidu, dok su pirokseni iz hornfelsa hedenbergiti (slika 30). Analizirani pirokseni iz peridotita padaju u polje augita.



Slika 30: Ca-Fe-Mg dijagram po (Morimoto i dr. 1988)

Tabela 7: Hemijski sastav piroksena iz jedinica hornfelsa, skarnova i peridotita (nastavak na sledećoj strani)

	269	270	270	293	293	293	293	425	425	506A
	Piroksen	Piroksen	Piroksen	Piroksen	Piroksen	Piroksen	Piroksen	Piroksen	Piroksen	Piroksen
	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Peridotit	Peridotit	Hornfels
SiO ₂	52.00	49.64	50.56	51.35	51.47	51.65	51.20	58.78	58.55	50.58
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	0.46	0.36	-
FeO	9.27	12.07	11.51	9.19	11.38	10.30	13.05	1.66	2.35	19.43
MnO	-	1.64	1.69	1.67	1.03	0.85	1.09	-	-	1.66
MgO	12.85	9.89	10.18	11.51	10.89	11.84	10.08	25.37	24.37	3.97
CaO	24.73	24.57	24.24	24.35	24.36	24.92	24.01	13.29	14.18	23.62
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CrO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	99.89	99.14	98.26	99.09	99.13	99.56	99.43	99.56	99.81	99.26
Strukturna formula na 6 O										
Si	1.982	1.962	1.980	1.987	1.984	1.974	1.982	2.053	2.052	2.023
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.019	0.015	0.000
Fe	0.296	0.399	0.376	0.297	0.367	0.329	0.422	0.048	0.069	0.650
Mn	0.000	0.055	0.056	0.055	0.034	0.028	0.036	0.000	0.000	0.056
Mg	0.730	0.583	0.593	0.664	0.626	0.675	0.582	1.321	1.273	0.237
Ca	1.010	1.040	1.015	1.010	1.006	1.020	0.996	0.497	0.532	1.012
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Nastavak tabele 7: Hemijski sastav piroksena iz jedinica hornfelsa, skarnova i peridotita

	506A	520	520	520	550	592	592
	Piroksen	Piroksen	Piroksen	Piroksen	Piroksen	Piroksen	Piroksen
	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Skarn	Peridotit	Peridotit
SiO ₂	52.07	53.24	52.68	52.83	51.90	58.78	58.55
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	-	-	0.35	0.51	-	0.46	0.36
FeO	7.48	7.50	6.57	6.50	10.11	1.50	2.12
MnO	2.09	0.31	0.32	0.54	0.59	-	-
MgO	12.54	13.39	13.77	13.46	11.98	25.37	24.37
CaO	25.23	25.24	25.61	24.82	25.12	13.29	14.18
Na ₂ O	-	-	-	1.2	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-
CrO ₂	-	-	-	-	-	-	-
Total	99.41	99.68	99.30	99.86	99.70	99.40	99.58
Strukturna formula na 6 O							
Si	1.979	1.996	1.979	1.978	1.977	2.054	2.054
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	0.000	0.000	0.015	0.023	0.000	0.019	0.015
Fe	0.238	0.235	0.206	0.203	0.322	0.044	0.062
Mn	0.067	0.010	0.010	0.017	0.019	0.000	0.000
Mg	0.710	0.748	0.771	0.751	0.680	1.322	1.274
Ca	1.027	1.014	1.031	0.995	1.025	0.498	0.533
Na	0.000	0.000	0.000	0.087	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

K-FELDSPATI

K-feldspati su konstantovani u hornfelsima, dok su podređeni u skarnovima. Javljaju se u asocijaciji sa kvarcom, plagioklasom, epidotom, cirkonom i metalničnim mineralima. Pojavljuju se u izrazito sitnim zrnima, pa ih je optički teško razdvojiti od kvarca. Rezultati hemijskih analiza feldspata prikazani su u tabeli 8.

Tabela 8: Hemijski sastav k-feldspata iz jedinica hornfelsa i skarnova (nastavak na sledećoj strani)

	291	292	292	311	311	311	311	311	490	493
	K-Feldspat	K-Feldspat	K-Feldspat	K-Feldspat	K-Feldspat	K-Feldspat	K-Feldspat	K-Feldspat	K-Feldspat	K-Feldspat
	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Skarn	Hornfels	Hornfels
SiO ₂	62.46	64.64	61.19	63.42	63.43	64.41	63.95	63.91	65.22	64.84
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	20.97	19.19	19.61	19.53	19.59	19.67	19.50	19.22	19.20	19.15
Fe ₂ O ₃	0.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MnO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MgO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CaO	2.78	-	-	-	-	-	-	-	2.10	-
Na ₂ O	1.02	0.72	0.74	0.63	0.66	0.84	0.82	0.81	0.95	0.52
K ₂ O	11.26	15.71	15.80	15.82	15.53	15.28	15.38	14.95	12.74	15.47
CrO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ba	-	-	0.81	-	-	-	-	-	-	-
Total	98.90	100.26	98.14	99.40	99.20	100.20	99.64	98.89	100.21	99.98
Strukturna formula na 8 O										
Si	3.370	2.973	2.911	2.949	2.950	2.959	2.958	2.970	2.970	2.983
Al	1.139	1.040	1.100	1.070	1.074	1.065	1.063	1.053	1.030	1.038
Fe₃	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.137	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.102	0.000
Na	0.091	0.064	0.068	0.057	0.060	0.075	0.074	0.073	0.084	0.046
K	0.662	0.922	0.959	0.938	0.921	0.895	0.907	0.886	0.740	0.908
Ba	0.000	0.000	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Nastavak tabele 8: Hemijski sastav k-feldspata iz jedinica hornfelsa i skarnova

	501	501	501	501	501	520	520	520	550	560
	Plagioklas	K-Feldspat	K-Feldspat	K-Feldspat	K-Feldspat	K-Feldspat	K-Feldspat	K-Feldspat	K-Feldspat	K-Feldspat
	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Skarn	Hornfels
SiO ₂	67.03	65.21	65.10	65.78	65.92	62.84	62.53	61.83	64.21	65.64
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	22.06	19.81	19.82	19.41	19.49	19.95	20.79	19.36	19.12	19.30
Fe ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MnO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MgO	-	-	-	-	-	-	-	0.94	-	-
CaO	1.85	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Na ₂ O	9.47	-	0.79	0.53	0.65	0.68	1.00	0.72	0.62	0.46
K ₂ O	-	15.52	15.16	15.85	15.72	14.81	13.71	14.75	15.70	15.39
CrO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ba	-	0.92	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	100.40	101.45	100.87	101.57	101.79	98.28	98.03	97.87	99.65	100.79
Strukturna formula na 8 O										
Si	2.911	2.969	2.965	2.982	2.980	2.939	2.916	2.913	2.94	2.989
Al	1.129	1.063	1.064	1.037	1.038	1.100	1.143	1.075	1.09	1.036
Fe³	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.00	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.066	0.02	0.000
Ca	0.086	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000
Na	0.797	0.000	0.070	0.047	0.057	0.062	0.090	0.066	0.07	0.041
K	0.000	0.901	0.881	0.917	0.907	0.884	0.816	0.887	0.87	0.894
Ba	0.000	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000

AKSINIT I ZEOLITI

Aksinit i zeoliti se uglavnom pojavljuju u žilicama i žicama ne debljim od 5 centimetara. Analize aksinita pokazuju da on ima promenljiv sadržaj silicijuma, aluminijuma, gvožđa i mangana, dok mu je sadržaj kalcijuma stabilan. Zeoliti su prisutni samo u hornfels jedinici gde sa sekundarnim kalcitom zapunjavaju prsline i pukotine. Hemijske analize zeolita ukazuju da je reč o zeolitu iz grupe laumontita. Analize zeolita i aksinita prikazane su u tabeli 9.

Tabela 9: Hemijski sastav aksinita i zeolita iz hornfels jedinice

	308	308	308	493	493	493
	Aksinit	Aksinit	Aksinit	Laumontit	Laumontit	Laumontit
	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Hornfels
SiO ₂	35.12	41.26	39.68	56.10	57.33	60.21
TiO ₂	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	14.97	18.04	17.40	16.43	16.45	15.39
Fe ₂ O ₃	9.10	7.80	9.79	-	-	-
MnO	2.40	4.06	3.38	-	-	-
MgO	0.83	0.65	-	0.60	0.73	1.22
CaO	19.16	19.38	19.41	5.56	5.52	5.38
Na ₂ O	-	-	-	0.37	0.37	0.21
K ₂ O	-	-	-	0.59	0.56	0.34
CrO ₂	-	-	-	-	-	-
Total	81.58	91.19	89.66	79.72	80.97	82.74

HROMITI

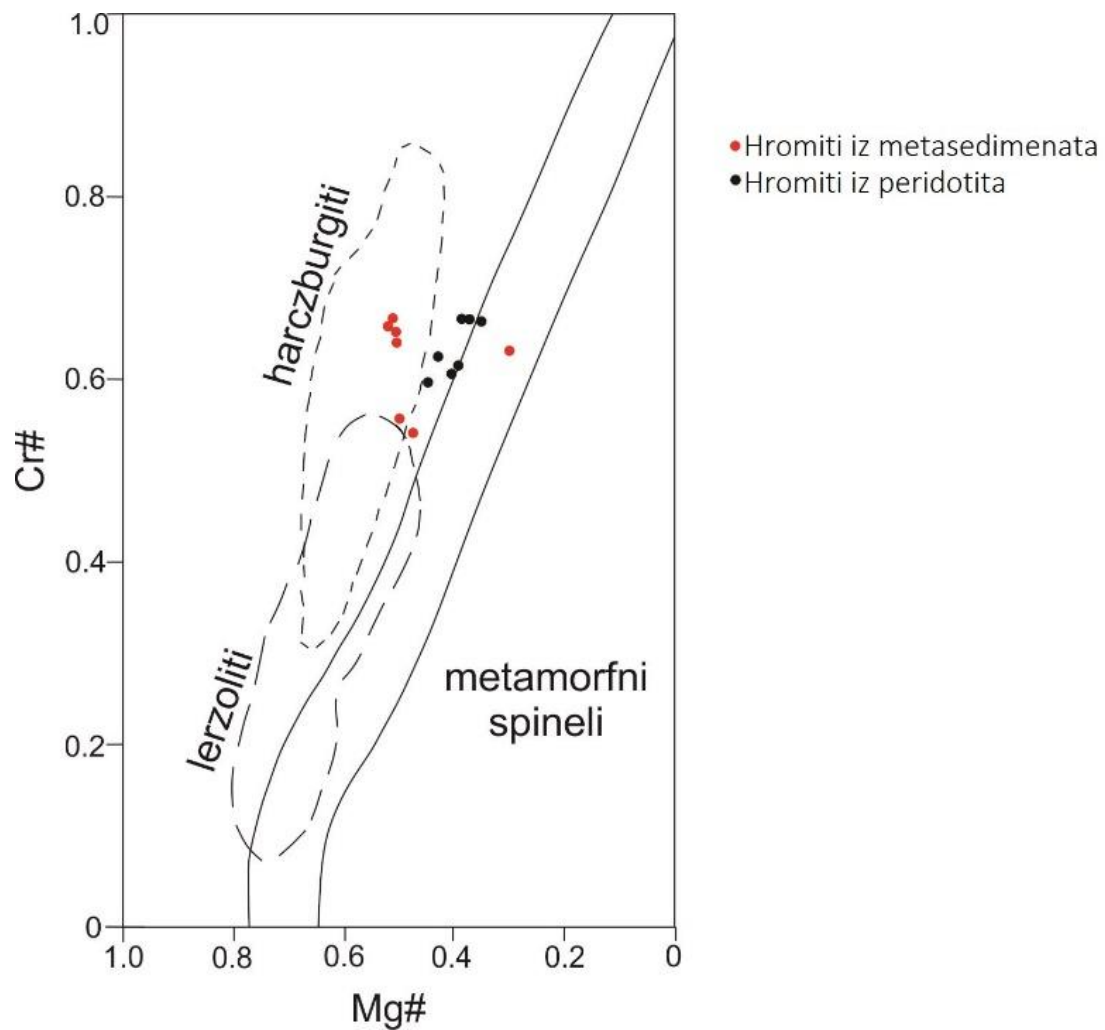
Analizirani spineli sa hromom prisutni su u tri jedinice, metaklastitima, hornfelsima, kao i u peridotitima. Hemizam spinela iz metaklastita i hornfelsa se ne razlikuje bitno. Postoje blage varijacije u sadržaju hroma i silicijuma. Hromiti analizirani iz peridotita pokazuju značajnije razlike u sadržaju hroma, magnezijuma, gvožđa i aluminijuma. Hemijski sastav analiziranih spinela dat je u tabeli 10. Odnos hromnog broja $Cr\# = (100Cr / (Cr + Al))$ prema magnezijumskom broju $Mg\# = (100Mg / (Mg + Fe^{2+}))$ prikazan je na diskriminacionom dijagramu na slici 31.

Tabela 10: Hemijski sastav spinela iz jedinica metaklastita, hornfelsa i peridotita (nastavak na sledećoj strani)

	219	219	219	219	283	283	425	425	425
	Hromit	Hromit	Hromit	Hromit	Hromit	Hromit	Hromit	Hromit	Hromit
	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit	Hornfels	Hornfels	Peridotit	Peridotit	Peridotit
SiO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	0.17	-	-
Al ₂ O ₃	24.10	24.07	25.86	24.94	23.17	23.68	26.99	27.07	27.44
FeO	14.85	14.97	15.27	15.34	14.94	15.36	19.19	19.41	19.06
MnO	-	-	-	-	-	-	-	0.59	0.43
MgO	14.22	14.32	14.15	14.58	14.14	14.32	12.67	11.85	11.98
CaO	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CrO ₂	47.34	47.68	45.05	46.00	47.04	46.99	41.36	41.39	41.78
ZnO	-	-	-	-	-	-	-	-	0.47
Total	100.51	101.04	100.33	100.86	99.29	100.35	100.38	100.56	100.95
Strukturna formula na 3 katjona									
Si	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	0.857	1.135	1.524	1.758	1.949	2.249	5.704	6.274	6.845
Cr	1.129	1.509	1.782	2.175	2.655	2.995	0.833	0.917	1.000
Fe³⁺	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.639	0.854	1.055	1.300	1.505	1.721	2.525	2.777	3.030
Fe²⁺	0.361	0.501	0.639	0.767	0.892	1.035	0.938	1.032	1.126
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Nastavak tabele 10: Hemijski sastav spinela iz jedinica metaklastita, hornfelsa i peridotita

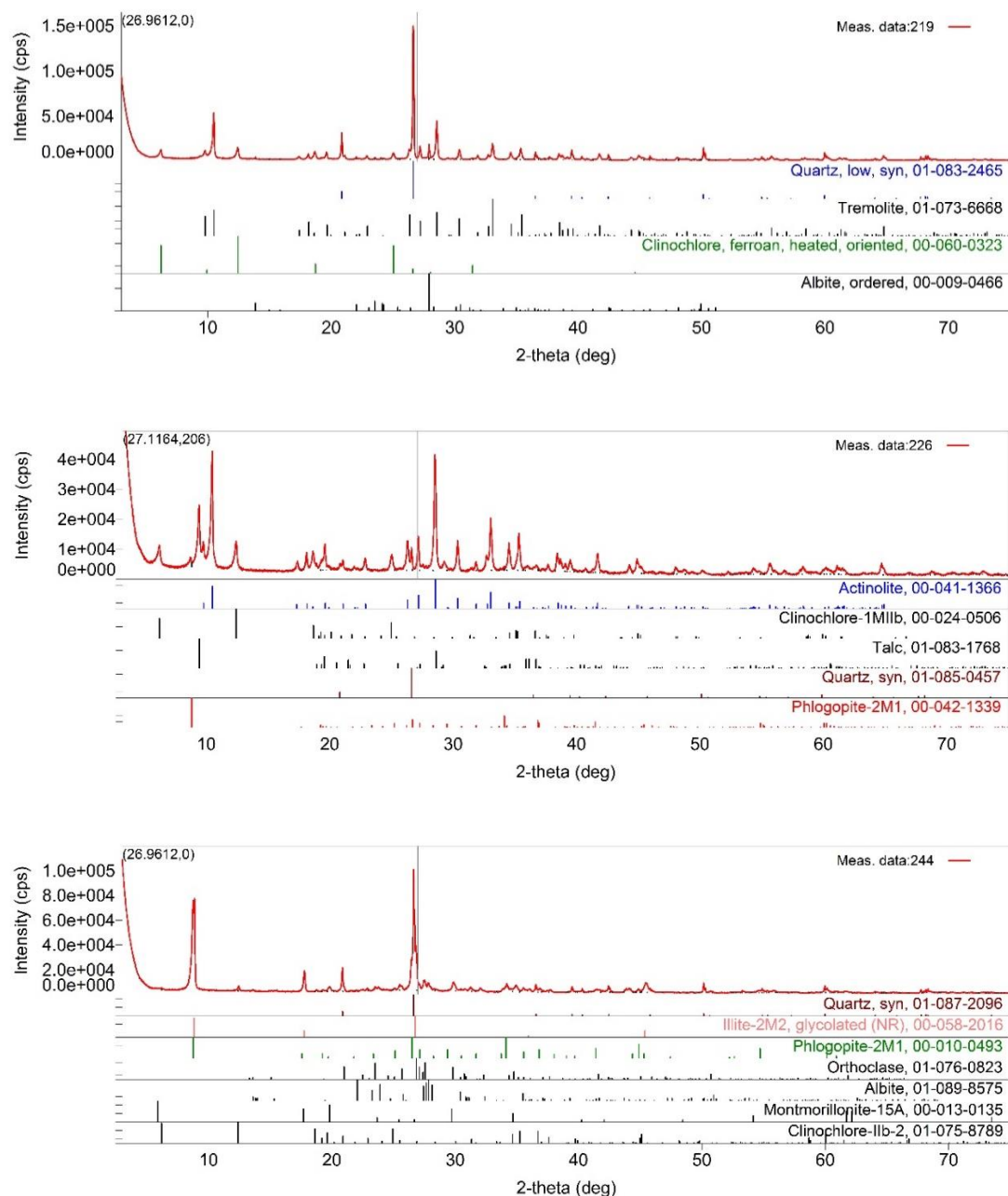
	425	425	458	592	592	592
	Hromit	Hromit	Hromit	Hromit	Hromit	Hromit
	Peridotit	Peridotit	Metaklastit	Peridotit	Peridotit	Peridotit
SiO ₂	-	-	0.54	-	-	-
TiO ₂	-	0.27	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	23.62	2.53	33.69	28.19	25.90	26.45
FeO	20.25	48.33	14.07	17.08	17.09	17.88
MnO	-	1.39	-	-	-	-
MgO	11.39	1.79	14.04	13.19	12.20	12.51
CaO	-	-	-	-	-	-
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-
CrO ₂	45.52	44.92	35.89	41.55	42.68	43.71
ZnO	-	1.39	-	-	-	-
V ₂ O	-	-	-	-	-	0.37
Total	100.78	99.62	98.23	100.01	97.87	100.55
Strukturna formula na 3 katjona						
Si	0.000	0.000	0.085	0.000	0.000	0.000
Al	3.987	0.532	6.270	5.647	5.679	5.963
Cr	5.155	6.336	4.481	5.583	6.278	6.610
Fe³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ti	0.000	0.036	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	2.432	0.476	3.305	3.342	3.384	3.567
Fe²⁺	2.426	7.210	1.858	2.428	2.659	2.860
Mn	0.000	0.210	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



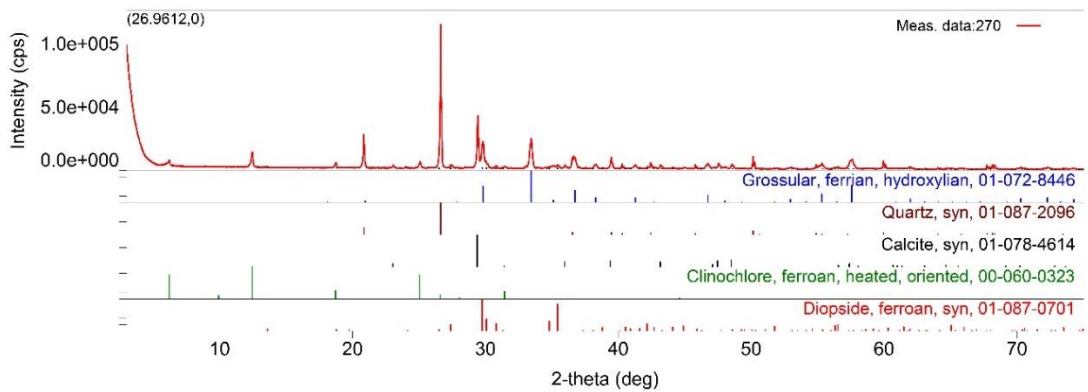
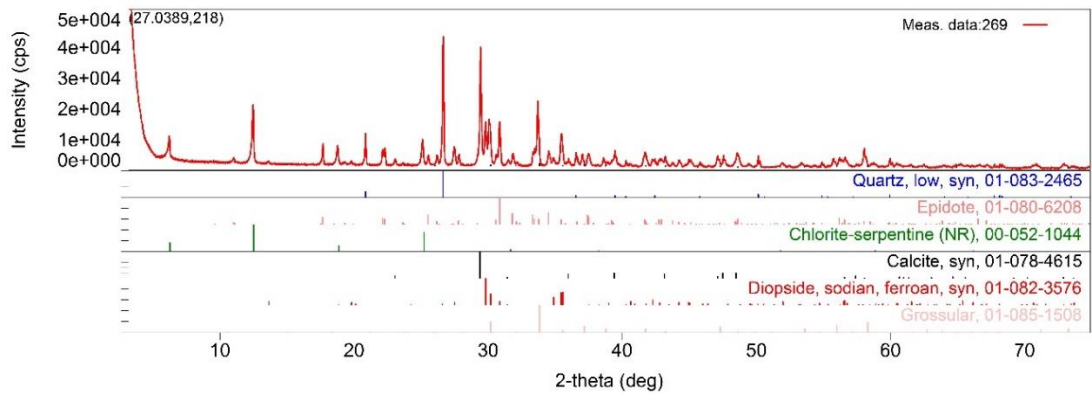
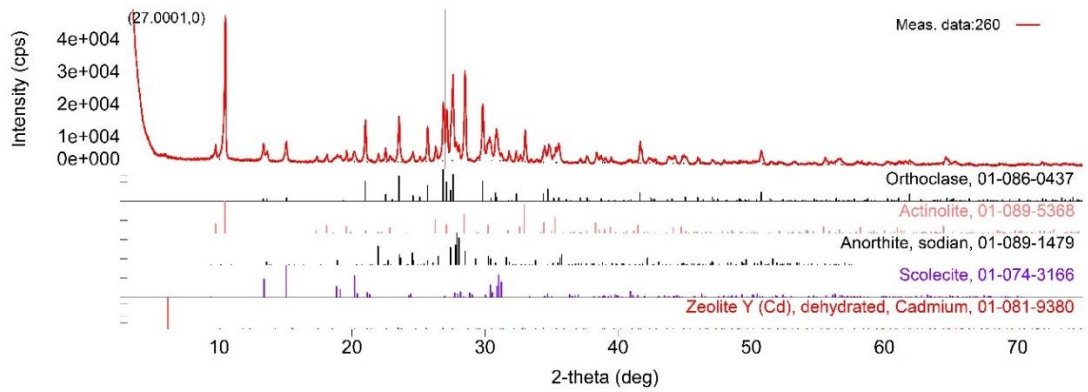
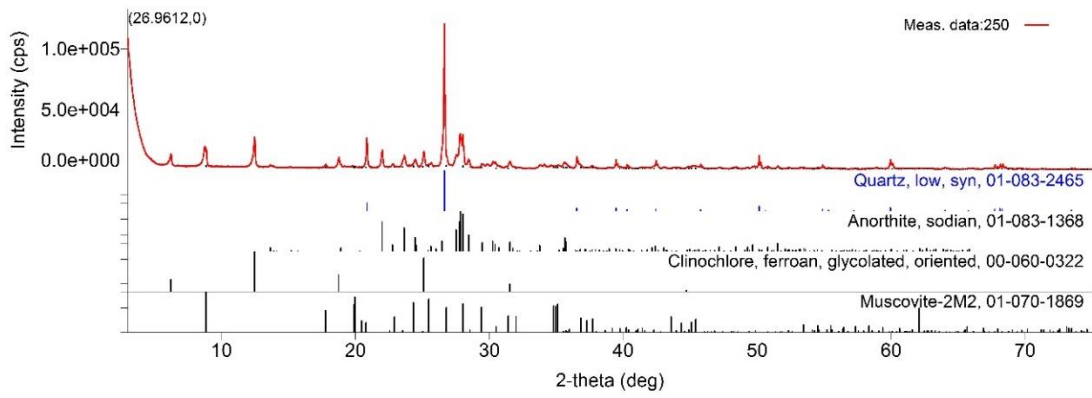
Slika 31: Diskriminacioni dijagram Cr spinela iz peridotita i metasedimenata (polja harzburgita i lherzolita preuzeta iz Parkinson i dr. 1998 i Ishii i dr. 1992)

MINERALNE FAZE ODREĐENE RENDGENSKOM DIFRAKCIJOM PRAHA

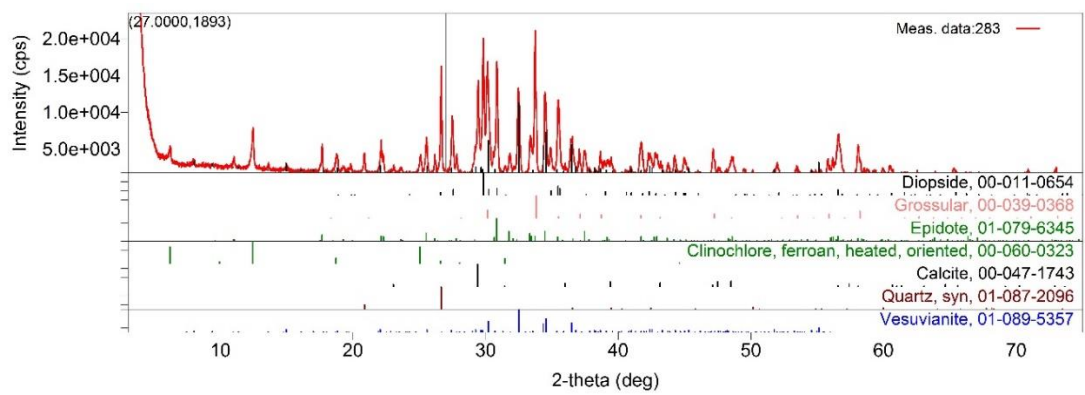
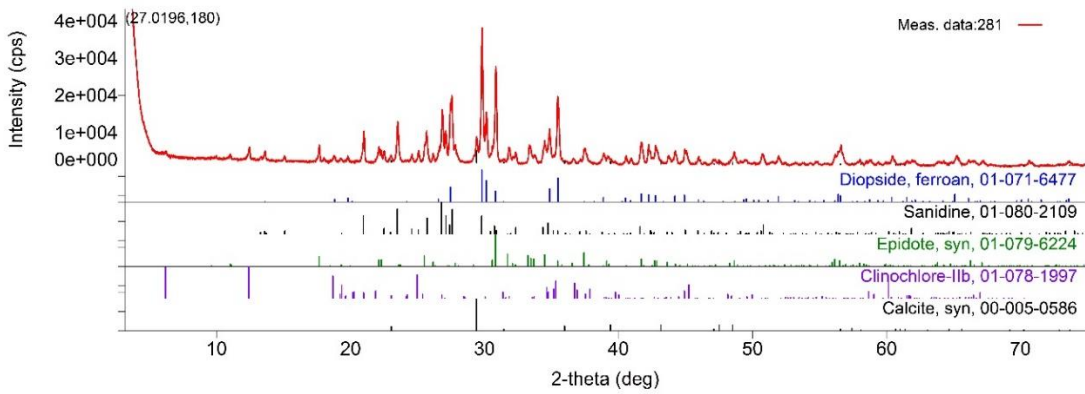
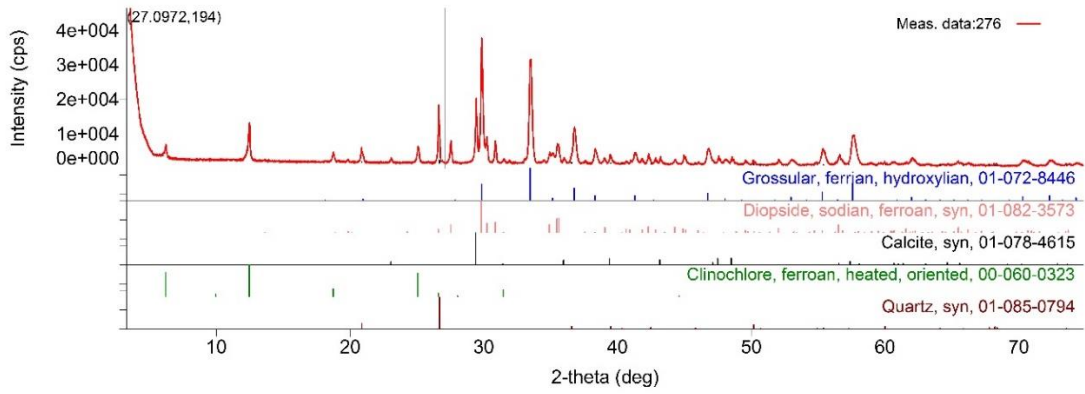
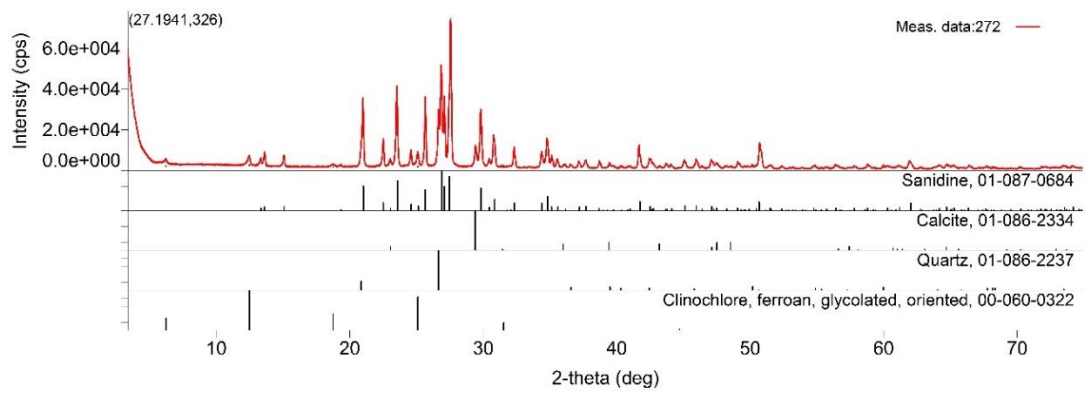
Identifikacija faza izvršena je na 21 uzorku iz odabrane reprezentativne bušotine 330A/18. Uz pomoć ove metode detektovano je više različitih mineralnih faza (kvarc, feldspati, kalcit, liskuni, amfiboli, pirokseni, epidoti, granati...). Dobijeni difraktogrami ispitivanih uzoraka i spiskovi prisutnih faza, prikazani su na slikama 32-37.



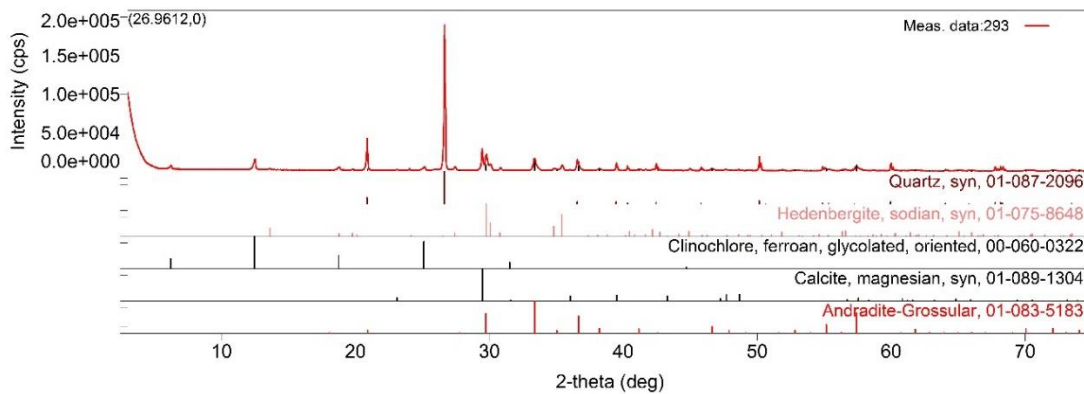
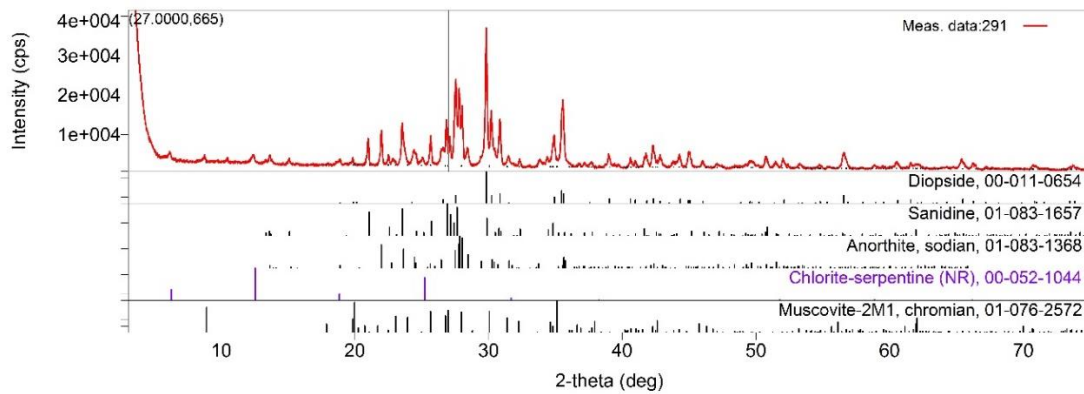
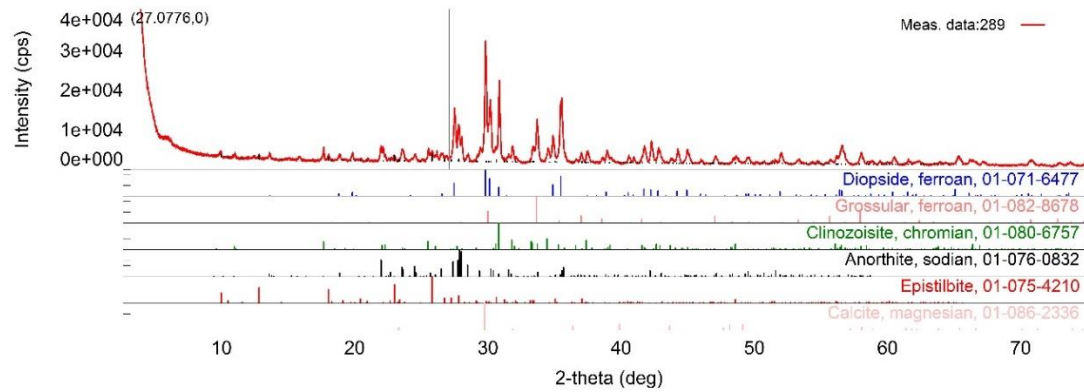
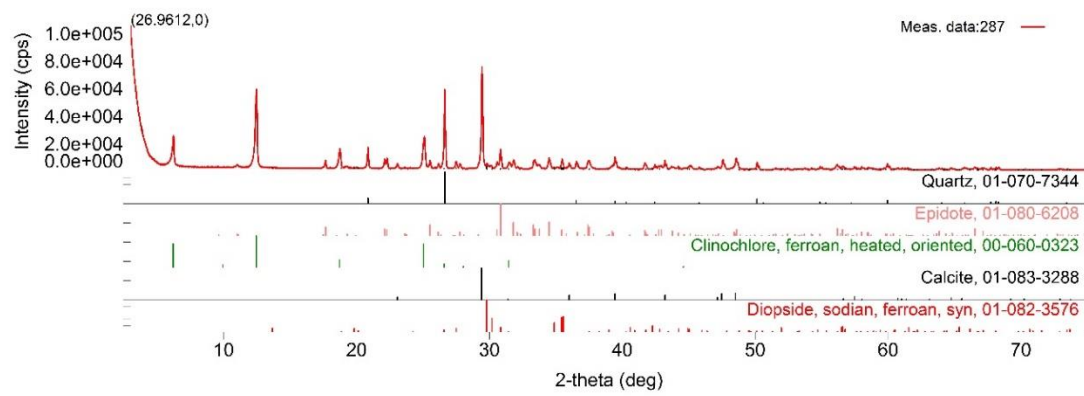
Slika 32: Difraktogrami ispitivanih uzoraka 219, 226 i 244 iz bušotine 330A/18



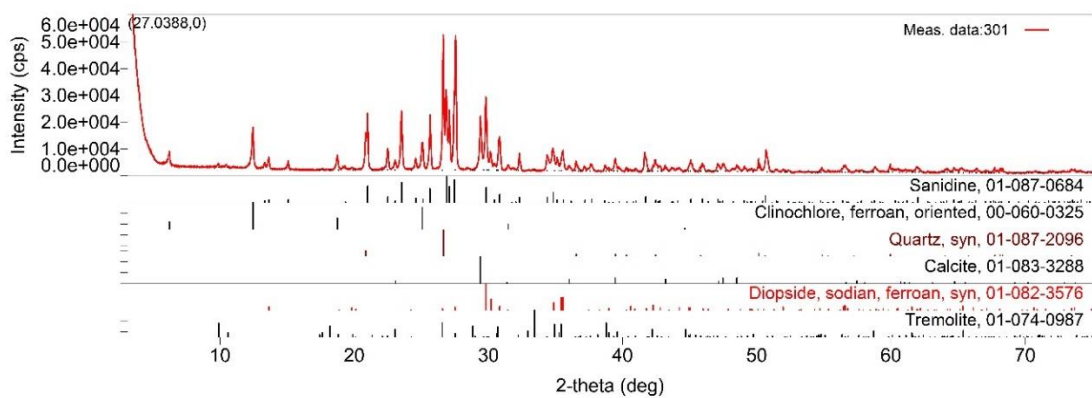
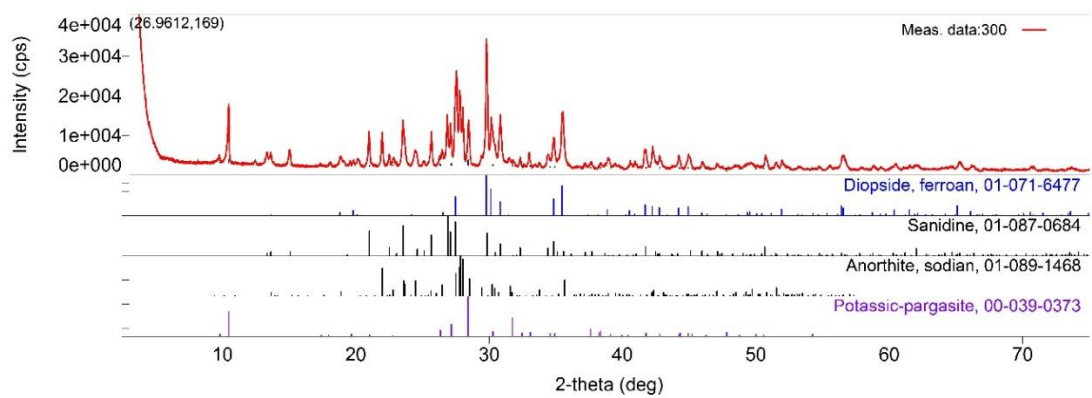
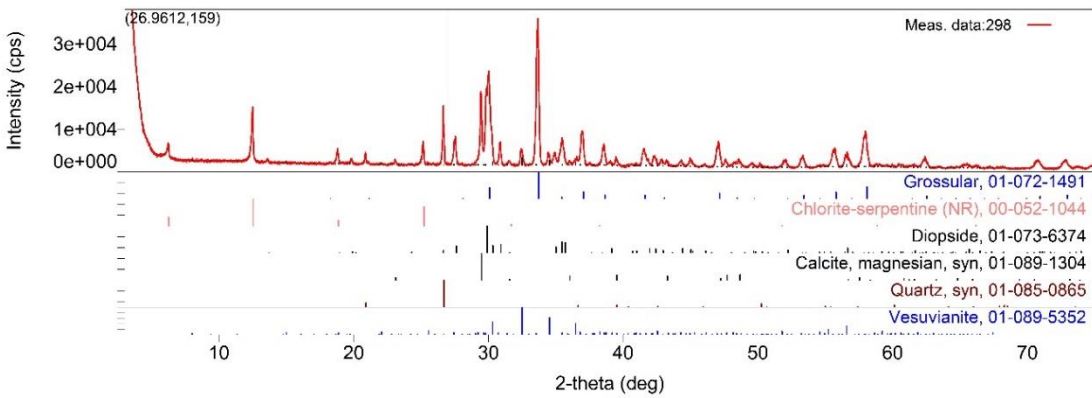
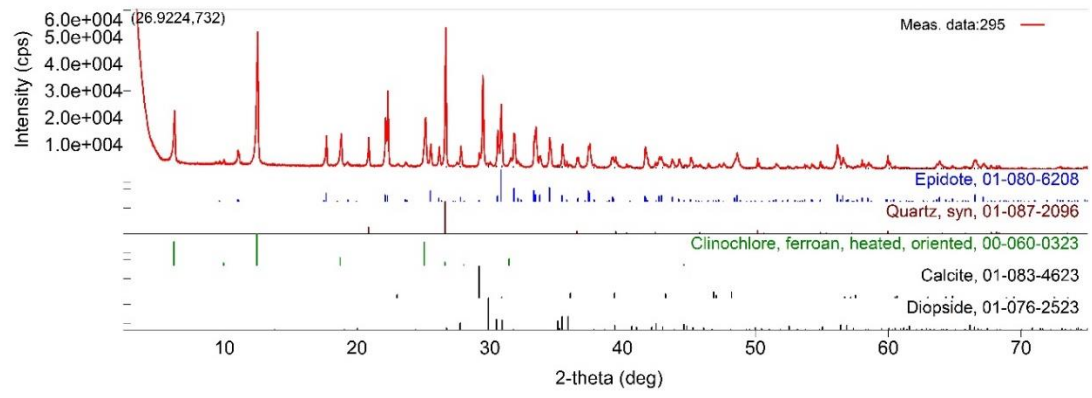
Slika 33: Difraktogrami ispitivanih uzoraka 250, 260, 269 i 270 iz bušotine 330A/18



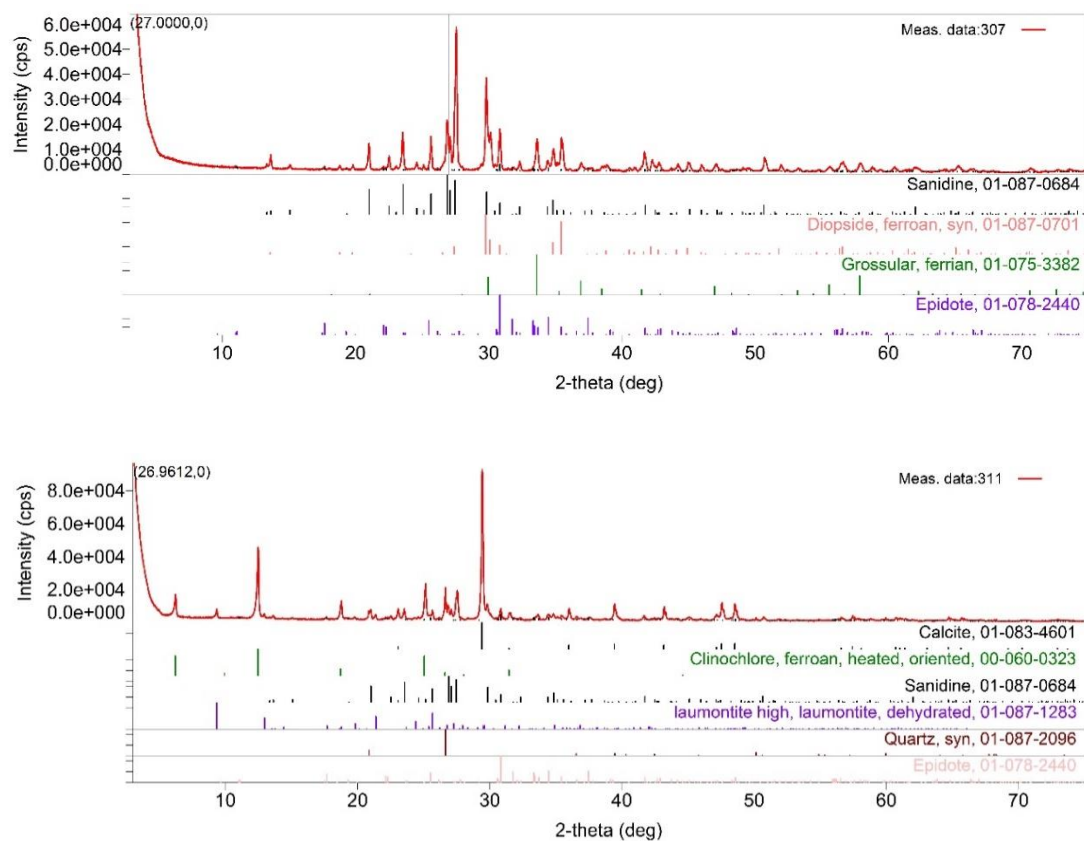
Slika 34: Difraktogrami ispitivanih uzoraka 272, 276, 281 i 283 iz bušotine 330A/18



Slika 35: Difraktogrami ispitivanih uzoraka 287, 289, 291 i 293 iz bušotine 330A/18



Slika 36: Difraktogrami ispitivanih uzoraka 295, 298, 300 i 301 iz bušotine 330A/18



Slika 37: Difraktogrami ispitivanih uzoraka 307 i 311 iz bušotine 330A/18

HEMIJSKA ISPITIVANJA KONTAKTNO METAMORFNIH STENA RUDNIKA

U sklopu hemijskih ispitivanja kontaktno metamorfnih stena Rudnika rađena je kompletna hemijska analiza sprašenih uzoraka i određivanje sadržaja karbonatne komponente metodom kompleksometrije.

SADRŽAJ KARBONATA ODREĐEN METODOM KOMPLEKSOMETRIJE

Kompleksometrijsko određivanje ukupnog sadržaja kalcita i dolomita u steni je od izuzetne važnosti, jer dobijene vrednosti Ca i Mg su isključivo vezane za karbonatnu komponentu koja izgrađuje stenu. Za ovu metodu izabrana su 22 uzorka iz bušotine 330A/18 koji su prethodno pripremljeni i sprašeni. Sadržaj karbonatne komponente koja uključuje kalcit i dolomit u prvih 150 metara bušotine se kreće u vrednostima od 5.11 do 8.61%. U intervalu od 150 do 250 metara sadržaj karbonatne komponente se povećava do maksimalno 24.19%, t.j. do granice koja bi odgovarala laporcima po Pettijohn (1972). Od 250 do 330 metara ispitivane bušotine sadržaj karbonatne komponente opada i kreće se od 7.08 do 11.13%. Od 330 do 422 metra sadržaj karbonatne komponente se povećava do maksimalnih 41.29%, sa izuzetkom na 353 metru, gde je sadržaj karbonata najniži u ispitivanoj bušotini i iznosi 3.18% (tabela 11).

Tabela 11: Sadržaj kalcita, dolomita i ukupni sadržaj karbonata u uzorcima iz bušotine 330A/18

Oznaka uzorka	Dubina (m)	Kalcit	Dolomit	Ukupno	Nekarbonati
218	15.6	2.47	6.14	8.61	91.39
219	18	0.14	4.97	5.11	94.89
226	34.2	2.38	4.44	6.82	93.18
244	88.8	0.14	8.3	8.44	91.56
250	111	0.78	7.46	8.24	91.76
260	153.6	5.8	0	5.80	94.20
269	181.1	10.22	5.84	16.06	83.94
270	184.9	7.5	3.09	10.59	89.41
272	191	1.6	4.49	6.09	93.91
276	208.8	10.96	5.81	16.77	83.23
281	228.5	3.3	3.06	6.36	93.64
287	259.6	19.64	4.55	24.19	75.81
289	265.3	4.85	3	7.85	92.15
291	274.3	2.47	4.61	7.08	92.92
293	289.4	8.8	0	8.80	91.20
295	302.2	6.57	3.05	9.62	90.38
298	317.6	8.12	3.01	11.13	88.87
300	330.4	7.44	0	7.44	92.56
301	332.8	8.29	6.16	14.45	85.55
307	353.5	1.65	1.53	3.18	96.82
311	375.9	33.68	7.61	41.29	58.71
317	422.6	11.5	6.1	17.60	82.40

KOMPLETNA HEMIJSKA ANALIZA MAKRO, MIKRO I ELEMENATA RETKIH ZEMALJA

Kompletne hemijske analize makro, mikro elemenata, kao i RZ, izvršene su u akreditovanoj laboratoriji u Bureau Veritas Commodities Canada Ltd., Kanada, koja je specijalizovana za hemijske analize geoloških uzoraka. Odabrana su i analizirana 22 reprezentativna uzorka iz bušotine 330A/18. Od toga je šest uzoraka iz grupe metaklastita, četiri su hornfelsi, jedanaest su skarnovi i jedan uzorak vulkanita. Posmatrano od površine ka dubljim delovima ispitivane bušotine, hemijska ispitivanja pokazala su da prvih sedam uzoraka imaju izuzetno visoke vrednosti hroma, nikla i magnezijuma. Vrednosti Cr_2O_3 kreću se od 0.028 do 0.391%, a nikla između 170 do 1275 ppm. Visoke vrednosti MgO, od 6.7-22.8% MgO takođe su zapažene u prvih sedam uzoraka iz plićih nivoa ispitivane bušotine. U srednjim i dubljim delovima ispitivane bušotine, vrednosti MgO, Cr_2O_3 i nikla su znatno niže i kreću se između 0.95-6.3% (MgO), 0.02-0.09% (Cr_2O_3) i <20-293ppm Ni. MnO je u uzorcima iz plićih i srednjih delova ispitivane bušotine blizu granice detekcije (0.04%), dok se sadržaj MnO u dubljim delovima povećava i pokazuje vrednosti između 0.2-0.6%. Vrednosti K_2O su obično niske i ne prelaze 1%. Povišene vrednosti imaju jedino u hornfels jedinici gde dostižu 8.16%, kao i u jednom uzorku vulkanita gde je izmeren sadržaj K_2O od 13.27%. Barijum pokazuje povišene merene vrednosti kod jedinice hornfelsa i kod analiza vulkanita.

Tabele sa kompletnim hemijskim analizama ispitivanih uzoraka, kao i vrednostima mikro elemenata i retkih zemalja, prikazane su u tabeli 12.

Tabela 12: Hemijske analize glavnih oksida, elemenata u tragovima i elemenata retkih zemalja

330A/18	218	219	226	244	250	260	269	270
	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit	Metaklastit	Skarn	Skarn
SiO ₂	58.94	61.94	50.76	53.41	57.12	52.74	41.75	49.18
Al ₂ O ₃	5.1	4.64	5.1	19.13	19.56	13.37	11.56	3.81
Fe ₂ O ₃	9.27	4.57	7.01	8.25	5.49	6.71	8.19	12.31
MgO	14.5	15.46	22.79	5.11	3.75	6.3	4.26	2.72
CaO	3.36	7.69	8.1	0.83	5.76	10.35	25.9	24.19
Na ₂ O	0.32	0.56	0.25	0.28	2.13	0.84	0.02	0.02
K ₂ O	0.51	0.19	0.35	7.82	2.35	5.25	<0.01	0.02
TiO ₂	0.31	0.25	0.27	0.7	0.67	0.58	0.47	0.19
P ₂ O ₅	0.05	0.05	0.06	0.1	0.1	0.13	0.11	0.11
MnO	0.04	0.08	0.15	0.06	0.1	0.1	0.37	0.33
Cr ₂ O ₃	0.225	0.391	0.380	0.053	0.042	0.093	0.028	0.050
Gubitak žarenjem	7.0	3.7	4.6	4.0	2.7	3.2	7.1	7.0
Σ	99.625	99.521	99.82	99.743	99.772	99.663	99.758	99.93
Ba	27	8	20	800	443	527	<5	<5
Ni	843	1275	1209	204	170	471	189	73
Sr	55	41	59	65	139	393	426	59
Zr	65	35	45	163	161	124	80	57
Y	8	6	8	26	26	19	20	10
Nb	6	<5	<5	13	12	11	8	<5
Sc	10	14	14	23	22	15	13	4
Be	<1	4	1	6	5	<1	2	<1
Co	41.7	62	87.4	36.9	31.5	34.5	17.8	5.3
Cs	13.9	1.2	7.5	42.8	11.7	25.2	0.4	3.2
Ga	4.5	4.5	4.4	24.9	22.7	13.3	13.9	4.1
Hf	1.7	1	0.9	4.7	4.5	3.5	2.2	1.3
Nb	4.7	2.7	2.9	13.3	12.6	9.6	7.5	2.9
Rb	39.4	8.1	31	334.3	102.4	238.1	0.8	1.7
Sn	<1	1	3	6	3	4	10	14
Sr	52.8	40.4	90.7	64.6	134.2	379.7	398.1	57
Ta	0.6	0.3	0.2	1	0.8	0.6	0.5	0.3
Th	2.6	1.6	1.3	13.3	12.5	8.7	8.1	3
U	0.8	0.5	0.6	2	2.7	2.1	1.8	0.4
V	62	88	78	175	152	123	109	38
W	0.7	<0.5	0.6	2.2	1.8	1.4	1.4	2
La	10.3	4.6	6.4	46.2	31.4	26.4	23	1.8
Ce	18.5	8.3	11.9	93.7	62.8	50.2	43.8	3.6
Pr	2.21	1.04	1.4	10.52	7.36	5.91	4.81	0.83
Nd	8	4.1	5.5	39.7	27.9	22.3	18.3	4.7
Sm	1.44	0.96	1.2	7.52	5.24	4.24	3.48	1.31
Eu	0.32	0.16	0.3	1.15	1.02	0.77	0.87	0.32
Gd	1.45	0.86	1.35	6.28	5.02	3.81	3.36	1.39
Tb	0.23	0.17	0.21	0.91	0.79	0.6	0.53	0.23
Dy	1.4	0.97	1.33	5.36	4.73	3.72	3.3	1.42
Ho	0.31	0.23	0.29	1.04	0.97	0.75	0.66	0.3
Er	0.82	0.68	0.8	3.08	2.89	2.19	1.96	0.98
Tm	0.13	0.09	0.12	0.42	0.41	0.34	0.28	0.13
Yb	0.86	0.74	0.79	2.83	2.61	2.27	1.89	0.89
Lu	0.14	0.09	0.13	0.43	0.4	0.35	0.28	0.13

Nastavak tabele 12: Hemijske analize glavnih oksida, elemenata u tragovima i elemenata retkih zemalja

330A/18	272	276	281	287	289	291	293	295
	Vulkanit	Skarn	Hornfels	Skarn	Hornfels	Hornfels	Skarn	Skarn
SiO ₂	60.55	38.44	48.8	36.73	45.72	52.5	61.04	40.95
Al ₂ O ₃	16.71	6.87	13.53	13.00	13.83	13.95	2.89	19.70
Fe ₂ O ₃	1.1	12.16	6.88	10.16	7.55	5.49	11.56	10.62
MgO	0.95	4.97	4.9	3.95	5.85	6.31	2.14	1.24
CaO	3.31	31.14	17.21	23.24	21.91	13.48	19.24	22.02
Na ₂ O	0.49	0.02	0.46	0.02	0.67	1.8	0.02	0.01
K ₂ O	13.27	0.05	4.31	0.15	0.44	3.48	0.01	0.04
TiO ₂	0.36	0.35	0.6	0.77	0.64	0.62	0.21	0.42
P ₂ O ₅	0.14	0.31	0.1	0.14	0.13	0.1	0.09	0.07
MnO	0.05	0.36	0.21	0.35	0.2	0.11	0.4	0.2
Cr ₂ O ₃	0.003	0.087	0.03	0.042	0.059	0.053	0.028	0.026
Gubitak žarenjem	2.8	5.1	2.5	11.2	2.5	1.8	2.2	4.4
Σ	99.99	99.88	99.80	99.87	99.75	99.85	99.82	99.94
Ba	1791	7	978	17	123	483	<5	6
Ni	<20	165	189	93	269	293	<20	151
Sr	509.00	62	704	821	1342	577	20	1275
Zr	173.00	127	113	305	131	117	74	100
Y	10.00	26	23	40	17	23	9	19
Nb	12.00	8	14	13	8	14	5	9
Sc	4.00	9	15	9	15	17	3	10
Be	<1	3	<1	2	<1	<1	<1	<1
Co	1.00	12	9.6	8.8	12.7	22.8	5	11.9
Cs	11.70	1.1	6.5	0.5	12.3	8.2	0.9	0.6
Ga	14.40	6.6	17	16.7	18.9	14.1	6.7	29
Hf	4.60	3	3.1	8.1	3.6	3.2	1.9	2.6
Nb	12.30	5.7	10.1	12.3	10.6	10.3	3.4	6.7
Rb	661.80	3.5	226.1	5.7	26.7	213.7	1.4	3
Sn	2.00	13	12	42	13	4	93	103
Sr	486.80	58.2	652.7	760.8	1289	563.3	19.3	1169.7
Ta	1.10	0.4	0.8	1	0.8	0.8	0.3	0.5
Th	17.60	4.8	9.7	8.5	10.1	10	2.6	6.5
U	5.70	1	1.8	2.3	2.4	2.1	0.8	2.9
V	30.00	69	130	83	141	139	25	99
W	1.50	3.1	1.1	1.8	1.1	1.3	42.4	5.6
La	21.4	8.1	30.2	29.6	28.4	29.5	1.2	33.9
Ce	44.4	16.7	59.9	56	56.6	58.5	3.7	64.8
Pr	5.16	2.53	6.76	6.67	6.12	6.68	0.78	7.25
Nd	18.1	13.5	25.2	25.6	22.8	26.1	4.6	27.1
Sm	3.45	3.41	4.87	5.44	4.18	5.16	1.31	5.4
Eu	0.50	0.73	1.06	0.8	0.9	1.01	0.29	1.74
Gd	2.81	4.0	4.6	6.3	3.58	4.77	1.46	4.77
Tb	0.38	0.61	0.73	1.07	0.56	0.74	0.24	0.71
Dy	2.01	3.84	4.32	6.69	3.06	4.28	1.4	3.97
Ho	0.38	0.84	0.83	1.43	0.71	0.9	0.28	0.72
Er	1.00	2.35	2.39	4.15	2.06	2.62	0.89	1.87
Tm	0.16	0.32	0.37	0.62	0.34	0.37	0.13	0.25
Yb	1.03	2.1	2.45	3.95	2.26	2.48	0.86	1.64
Lu	0.17	0.31	0.39	0.59	0.39	0.38	0.13	0.23

Nastavak tabele 12: Hemijske analize glavnih oksida, elemenata u tragovima i elemenata retkih zemalja

330A/18	298	300	301	307	311	317
	Skarn	Hornfels	Hornfels	Hornfels	Skarn	Skarn
SiO ₂	39.63	52.72	54.45	52.18	31.11	34.82
Al ₂ O ₃	9.64	15.18	12.28	11.69	9.85	13.93
Fe ₂ O ₃	9.29	4.46	3.67	6.21	6.45	8.55
MgO	4.84	5.41	4.26	4.25	2.91	1.83
CaO	31.05	13.87	10.26	16.67	26.08	32.89
Na ₂ O	0.02	1.57	0.3	0.36	0.13	0.03
K ₂ O	0.03	3.54	8.16	6.21	3.27	0.21
TiO ₂	0.4	0.66	0.47	0.79	0.82	0.56
P ₂ O ₅	0.1	0.11	0.11	0.14	0.08	0.08
MnO	0.42	0.14	0.19	0.25	0.5	0.67
Cr ₂ O ₃	0.025	0.033	0.029	0.073	0.093	0.027
Gubitak žarenjem	4.4	2	5.5	0.8	18.3	6.3
Σ	99.84	99.88	99.91	99.89	99.86	99.94
Ba	<5	459	1013	1188	628	35
Ni	80	185	237	295	266	<20
Sr	44	494	587	474	356	37
Zr	75	131	94	379	548	144
Y	17	26	15	31	28	25
Nb	8	12	8	16	17	13
Sc	12	16	11	11	12	8
Be	2	9	<1	<1	2	<1
Co	9.5	6.8	19.3	18.9	27.6	2.7
Cs	1.1	19	11.4	7.6	10.8	2
Ga	12.7	18.4	8	13.1	11.2	18.6
Hf	2.1	3.8	2.6	10	14.4	4.2
Nb	7	11.7	8	12.3	12.9	10.8
Rb	3.5	191.4	440.4	308.5	173.8	13.9
Sn	53	18	27	76	117	101
Sr	41	495.7	585.9	455.9	338.8	36.8
Ta	0.5	0.9	0.6	1	0.9	0.6
Th	5.7	11.1	7.2	12.1	10.2	4.7
U	3.2	2.3	1.2	3	7.5	0.7
V	95	132	71	85	121	91
W	2.2	1.5	0.9	2.4	4.4	4.4
La	8.6	31.3	14.1	47.6	29.3	17.7
Ce	17.4	61.3	27.7	92.8	57.9	29.2
Pr	2.25	7.16	3.16	10.63	6.47	3.21
Nd	10.3	26.9	12	40	24.2	12.1
Sm	2.72	5.08	2.84	7.5	4.33	2.53
Eu	0.93	1.14	0.67	1.65	0.66	0.65
Gd	2.93	5.11	2.88	6.15	3.93	4.16
Tb	0.48	0.79	0.48	0.92	0.69	0.75
Dy	3.01	4.55	2.73	5.36	4.48	4.59
Ho	0.62	0.98	0.58	1.16	0.99	0.9
Er	1.96	2.82	1.73	3.25	3.31	2.58
Tm	0.26	0.4	0.23	0.5	0.5	0.34
Yb	1.75	2.68	1.36	3.33	3.42	2.4
Lu	0.26	0.4	0.21	0.54	0.56	0.38

ISPITIVANJA FLUIDNIH INKLUZIJA

Merenje temperature homogenizacije i tačke topljenja leda u fluidnim inkluzijama su standardne procedure u cilju određivanja karaktera hidrotermalnih fluida. Kako su u metamorfnim procesima hidrotermalni fluidi u direktnoj vezi sa kristalizacijom metamorfnih minerala, obavljena su merenja na fluidnim inkluzijama u granatima i epidotima iz skarnova. Pored granata i epidota, merenja su urađena i na zrnima kvarca iz orudnjenih žica koje "probijaju" skarnove i hornfelse.

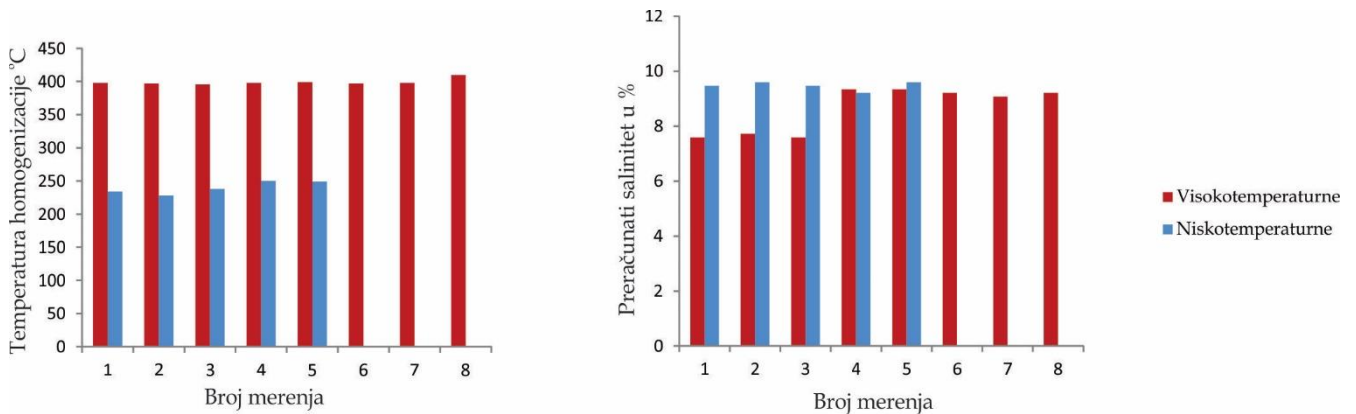
Izabran je po jedan reprezentativan uzorak na granatima i epidotima, dok su za merenja u kvarcu odabrana tri reprezentativa uzorka, i pripremljeni preparati debljine od 120 mikrona. Merenja urađena na granatima pokazuju da temperatura homogenizacije fluidnih inkluzija prevazilazi temperaturnu granicu metode od 560 °C. Za razliku od granata, temperature homogenizacije fluidnih inkluzija u epidotu iznose 320 °C, dok je preračunati salinitet 9.86%.

Merenjem temperatura homogenizacije na kvarcu utvrđeno je da postoje dve grupe fluidnih inkluzija: visokotemperaturne, koje se kreću u opsegu temperatura od 396 do 410 °C, i niskotemperaturne, u opsegu temperatura od 228 do 250 °C. Detaljan prikaz dobijenih rezultata dat je u tabeli 13, histogramima i dijagramom na slikama 38 i 39.

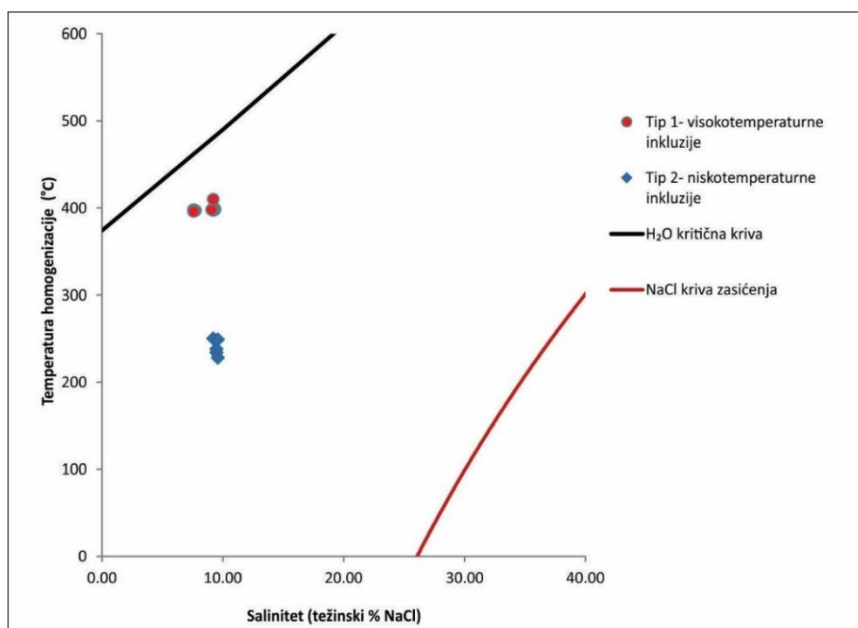
Tabela 13: Merenja temperatura homogenizacije (Th) i temperatura tačke topljenja leda (Ttl) na fluidnim inkluzijama, (n.a. - nije analizirano)

Bušotina	Uzorak	Dubina	Ttl	Th	Salinitet	Mineral	Ispitivani uzorak	Klasa
330A/18	249	107.9	-4.8	398	7.59	Kvarc	Orudnjena kvarcna žica	visokoT
330A/18	249	107.9	-4.9	397	7.73	Kvarc	Orudnjena kvarcna žica	visokoT
330A/18	249	107.9	-4.8	396	7.59	Kvarc	Orudnjena kvarcna žica	visokoT
330A/18	293	289.4	-6.1	398	9.34	Kvarc	Orudnjena kvarcna žica	visokoT
330A/18	293	289.4	-6.1	399	9.34	Kvarc	Orudnjena kvarcna žica	visokoT
330A/18	293	289.4	-6	397	9.21	Kvarc	Orudnjena kvarcna žica	visokoT
330A/18	293	289.4	-5.9	398	9.08	Kvarc	Orudnjena kvarcna žica	visokoT
330A/18	293	289.4	-6.2	234	9.21	Kvarc	Orudnjena kvarcna žica	NižeT
330A/18	293	289.4	-6.3	228	9.47	Kvarc	Orudnjena kvarcna žica	NižeT
330A/18	293	289.4	-6.2	238	9.60	Kvarc	Orudnjena kvarcna žica	NižeT
330A/18	296	306	-6	410	9.47	Kvarc	Orudnjena kvarcna žica	visokoT
330A/18	296	306	-6	250	9.21	Kvarc	Orudnjena kvarcna žica	NižeT
330A/18	296	306	-5.9	249	9.60	Kvarc	Orudnjena kvarcna žica	NižeT
294/18	145	195.2	n.a.	>560	n.a.	Granat	Skarnizirana zona	visokoT
352/18	534	415.6	-6.5	320	9.86	Epidot	Skarnizirana zona	NižeT

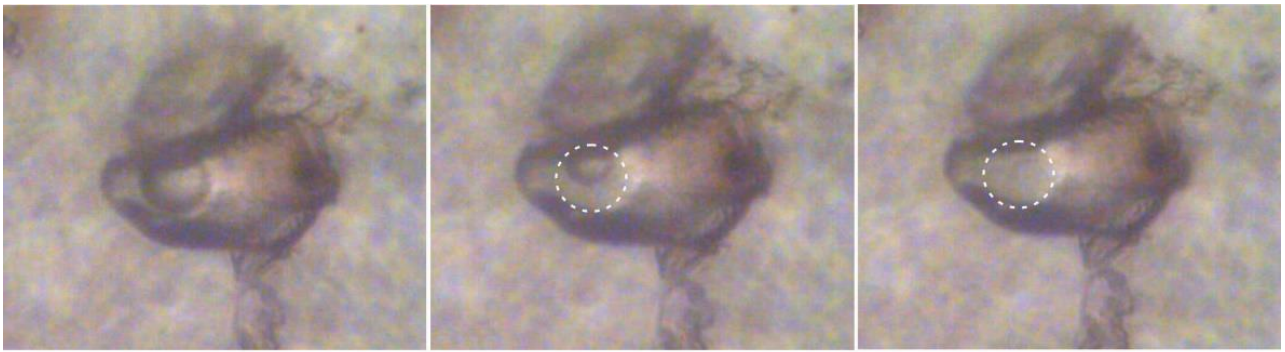
Salinitet fluidnih inkluzija se kreće u intervalu od 9.08 do 9.60% u uzorcima 293 i 296 i isti je i za niskotemperaturne i za visokotemperaturne fluidne inkluzije. U uzorku 249 preračunati salinitet je između 7.59 i 7.73%. Detaljni prikaz homogenizacije fluidne inkluzije u uzorku 293 prikazan je na slici 40. Salinitet fluidnih inkluzija određen je prema Bodnar (1993).



Slika 38: Prikaz temperatura homogenizacije i saliniteta niskotemperaturnih i visokotemperaturnih fluidnih inkluzija



Slika 39: Dijagram temperatura homogenizacije u odnosu na salinitet sa definisanim područjima kritične krive vode i krive zasićenja NaCl po Haas-u (1976).



380°C

395°C

400°C

Slika 40: Prikaz homogenizacije fluidne inkluzije u uzorku 293 na temperaturi od 399° C

GEOHEMIJSKA ISPITIVANJA MINERALA METODOM LASERSKE ABLACIJE

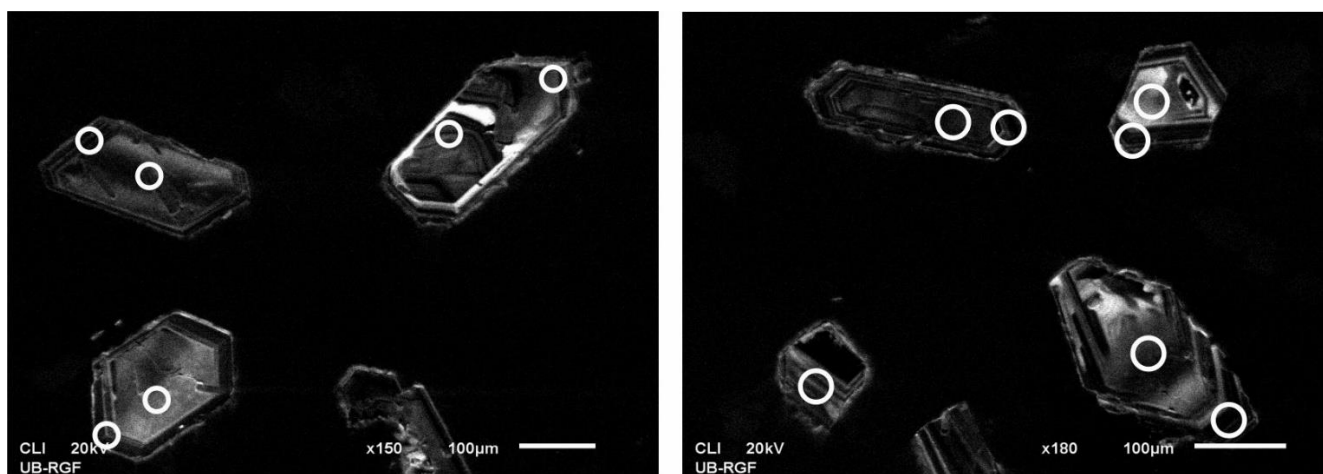
LA-ICP-MS metoda je snažan alat pomoću kojeg se mogu meriti izuzetno niske koncentracije elemenata (ppm), kao i određeni izotopi. Na odabranim separacijama cirkona iz vulkanita i hornfelsa, kao i na granatima iz skarnova *in city* su mereni izotopi uranijuma (U^{235} , U^{238}), torijuma (Th^{232}) i olova (Pb^{206} , Pb^{207} i Pb^{208}). Na anizotropnim granatima koji pokazuju zonarnost na BSE snimcima *in city* su merene koncentracije mikro elemenata i elemenata RZ.

APSOLUTNA STAROST CIRKONA IZ VULKANITA I HORNFELSA

Za određivanje starosti vulkanita odabrana su dva vulkanska tela. Prvo vulkansko telo probija sedimentne stene u vidu dajka u bušotini 330A/18, dok je za drugi uzorak 313/18 izabrano nabušeno vulkansko telo, na udaljenosti oko 5 kilometara severozapadno od ispitivanog područja.

Iz ova dva vulkanska tela izdvojena je mineralna separacija cirkona na kojoj je U-Pb metodom, određena apsolutna starost stene. Cirkoni na CL fotografijama pokazuju normalnu zonarnost, bez naznaka da poseduju nasleđena jezgra nekih ranijih vulkanskih faza. Radi sigurnosti i što bolje interpretacije, pojedinim zrnima je rađena ablacija u centru i na obodu zrna.

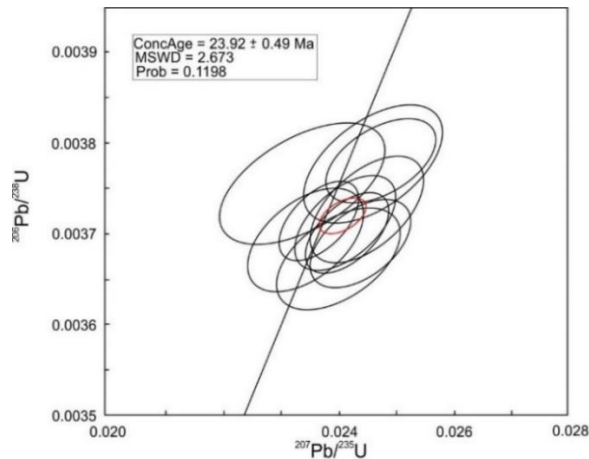
Cirkoni iz hornfels jedinice su na isti način tretirani kao i cirkoni iz vulkanita. Od cirkona iz vulkanita, razlikuju se samo po dimenzijama, jer su gotovo sva zrna mehanički polomljena. Uzrok mehaničkog loma kristala cirkona se možda nalazi u samoj pripremi uzorka. Fotografije cirkona iz vulkanita dobijene na CL detektoru prikazane su na slici 41 sa mestima obeleženim za lasersku ablaciju.



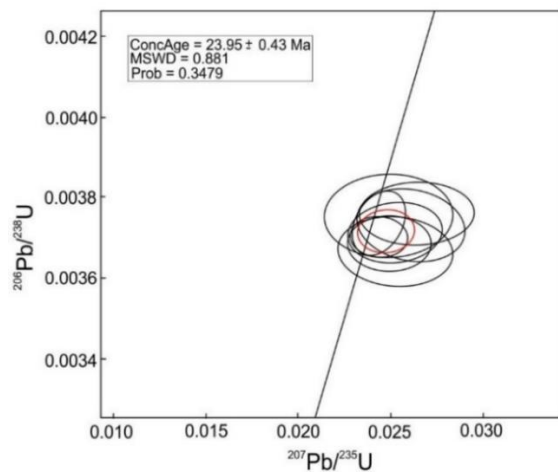
Slika 41: CL fotografija sa obeleženim mestima za lasersku ablaciju na separaciji cirkona

Nakon obrade podataka u Iolite 2.5 softveru (Paton i dr. 2011) dobijeni su izotopski odnosi ispitivanih uzoraka sa njihovim apsolutnim starostima. Rezultati apsolutne starosti dobijeni za oba vulkanska tela pokazuju starost ovih stena od 23.9 miliona godina, bez nasleđenih starosti u centru zrna.

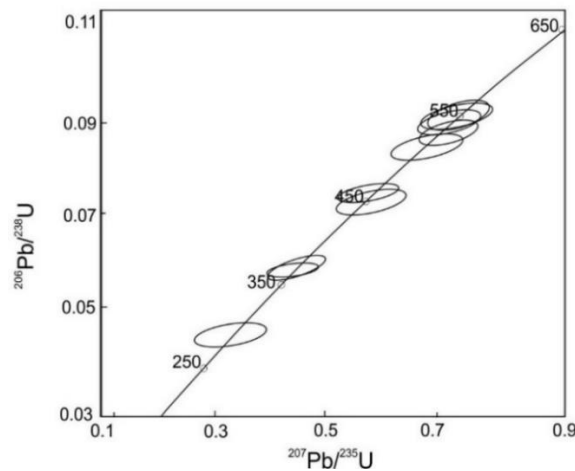
Starost cirkona iz hornfelsa je prilično heterogena. Obuhvata paleozojske periode od kambrijuma do perma, sa izuzetkom karbona. Rezultati su prikazani na konkordija dijagramima (slika 42).



Uzorak 313/18



Uzorak 330A/18



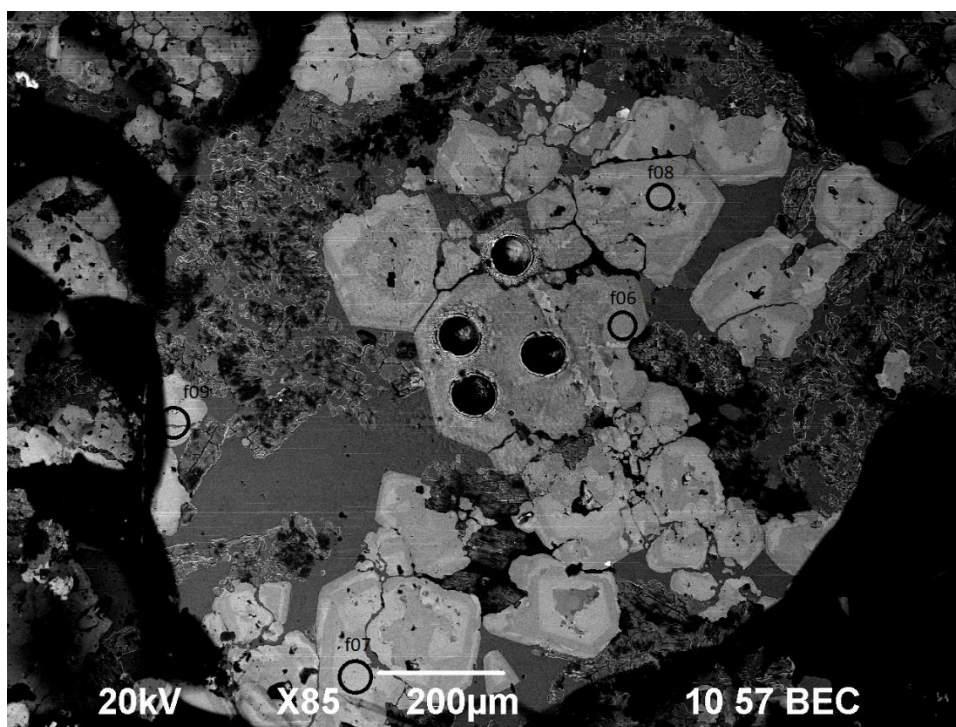
Uzorak iz hornfelsa

Slika 42: Apsolutne starosti cirkona dobijene radiometrijskom U/Pb metodom iz vulkanita i hornfelsa

STAROST METAMORFIZMA, MIKROELEMENTI I ELEMENTI RETKIH ZEMALJA U GRANATIMA

Metodom laserske ablacije pored određivanja apsolutne starosti vulkanita, merena je koncentracija izotopa uranijuma i olova radi dobijanja apsolutne starosti metamorfizma, korišćenjem granata kao minerala koji su sigurno nastali pri kontaktno metamorfnim promenama. Uspešnu primenu U-Pb metode na granatima pokazao je Yan i dr. (2020) koji je odredio vreme metamorfizma paleozojskih i mezozojskih skarnova, dok su Wafforn i dr. (2018) uspešno datirali mlade kontaktno-metamorfne skarnove pliocenske starosti. Pored određivanja koncentracija izotopa uranijuma i olova, određene su i koncentracije mikroelemenata i retkih zemalja u granatima. Merenja sadržaja mikroelemenata kao i retkih zemalja rađena su u centru i na obodu zrna kako bi se utvrdile eventualne razlike u koncentracijama. Dobijeni rezultati su prikazani u tabeli 14. Za odredbu starosti i merenje koncentracija mikro- i elemenata RZ, odabrani su uzorci granata iz skarnova 145, 293 i 310.

Zbog poremećenog odnosa uranijuma i olova, dobijeni podaci o starosti granata u kontaktno-metamorfnim skarnovima Rudnika su diskordantni i ne mogu se upotrebiti. Naime, analizirani granati su iz skarnova iz orudnjenih delova bušotina koji su bogati galenitom (Pb). Zbog toga bi trebalo pristupiti nekoj drugoj metodi za određivanje starosti granata, na primer Nd-Sm izotopskim sistemima. Na BSE fotografiji prikazani su krateri nakon delovanja lasera na površinu granata i obeležena mesta za dalju ablaciju (slika 43).



Slika 43: BSE fotografija uzorka nakon delovanja lasera prilikom određivanja izotopa U i Pb u zrnima granata

Tabela 14: Koncentracije mikroelemenata i RZ u granatima

330A/18	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310
	centar	centar	centar	centar	centar	centar	centar	centar	centar	centar
P	26	46	87	40	26	20	91	29	112	21
Sc	2.21	3.21	3.38	3.82	2.75	4.26	4.62	4.59	4.33	4.22
Ti	1669	2992	3992	3418	3130	4330	4270	4600	3470	2580
V	22.2	26	25.1	27.5	23.7	30.1	34.9	42	30.7	32.8
Cr	68.6	93.5	76.3	117.3	70.7	118.4	303	163	83.9	109.7
Mn	3408	2550	2268	2552	2330	2335	2443	3695	2640	3130
Zn	9.3	5.4	4.8	14.4	11.2	30.8	14	8.9	8.2	3.9
Ga	30.6	37.1	36.9	35	39.7	34.5	38.1	31.1	33.4	27.1
Ge	2.68	4.24	4.44	5.75	3.94	4.8	3.98	13.5	4.47	8.5
As	1.7	7	6.8	8.3	11.8	14	7.9	9.4	8	3.6
Sr	8.6	1.76	2.31	6.65	5.3	8.5	4.71	24.6	3.46	4.41
Y	27.34	29	28.1	26.8	22.8	29.8	33.1	31.8	32.7	22.8
Zr	66.6	98.5	106.1	87.9	119.8	120	117.2	75.9	90	56.6
Nb	5.98	9.39	10.86	10.06	10.54	11.95	11.76	12.94	10.92	7.48
Sn	433	745	856	738	943	915	838	552	688	384
Ta	0.47	0.7	0.92	0.99	0.86	1.25	1.19	1.21	1	0.7
W	6.76	32.8	43.2	42.2	49	62.4	49.7	35.1	41.7	19.6
Pb	8.8	0.95	3.09	13.6	10.8	37	6	5.74	4.55	1.73
Th	0.25	13.7	2.52	2.25	2.01	3.01	2.72	1.72	2.16	1
U	0.25	3.04	1.88	1.74	1.80	2.43	2.04	1.41	1.85	1
La	0.02	0.12	0.31	0.30	0.18	0.43	0.40	0.26	0.60	0.23
Ce	0.43	2.71	3.05	3.38	2.48	3.59	2.58	2.26	3.76	2.02
Pr	0.29	1.08	1.27	1.24	1.17	1.49	1.29	0.90	1.38	0.82
Nd	3.6	12.8	14.4	14.3	13.8	17.9	15.1	10.3	13.6	6.8
Sm	6.4	9.0	10.1	8.0	10.4	10.4	10.0	6.1	7.7	4.8
Eu	1.51	2.09	2.55	2.31	2.63	2.88	2.52	1.74	2.37	1.36
Gd	7.6	8.3	8.6	8.1	9.3	9.6	9.3	6.4	8.8	5.9
Tb	1.08	1.09	1.07	1.05	1.23	1.17	1.17	1.05	1.25	0.83
Dy	5.84	5.96	5.83	5.45	5.75	6.33	6.78	5.61	6.70	4.34
Ho	1.0	1.09	1.13	0.86	0.84	1.06	1.16	1.07	1.04	0.96
Er	2.66	2.61	1.87	2.14	2.07	2.88	2.91	3.47	2.70	2.07
Tm	0.320	0.348	0.314	0.349	0.320	0.319	0.386	0.462	0.416	0.322
Yb	2.01	1.84	1.94	1.90	1.64	2.37	3.05	2.92	2.77	2.59
Lu	0.302	0.387	0.296	0.272	0.282	0.301	0.294	0.436	0.520	0.379

Nastavak tabele 14: Koncentracije mikroelemenata i RZ u granatima

330A/18	310	310	310	310	310	310	310	310
	obod	obod	obod	obod	obod	obod	obod	obod
P	24.4	22.4	20.2	530	15.8	22.9	34.7	22.5
Sc	1.15	1.38	1.49	1.04	0.72	3.28	1.93	0.59
Ti	374	420	415	336	229	798	289	700
V	8.6	9.7	15.1	9.6	6.6	23.6	13.7	14.7
Cr	19.3	31.4	51.6	20.8	21.1	70.8	53	24.7
Mn	4933	4940	4241	3612	4496	3450	5360	4090
Zn	9.5	6.1	6.5	7.1	5.4	8.1	6.7	3.4
Ga	7.22	11.00	11.18	11.50	9.94	10.50	11.90	9.50
Ge	6.47	7.40	7.70	2.53	3.81	5.50	6.60	10.00
As	14.2	72.2	22.9	53.5	67.3	32.6	78.3	56.9
Sr	1.04	23.7	1.04	4.5	0.6	42.9	30.0	1.2
Y	15.3	12.2	10.0	8.0	12.1	12.3	10.3	14.3
Zr	5.2	7.7	11.1	14.9	10.4	13.2	11.0	11.8
Nb	1.03	1.29	1.30	1.16	0.98	2.82	1.21	2.15
Sn	96	113	130	141	111	69	88	94
Ta	0.14	0.12	0.13	0.12	0.10	0.28	0.17	0.20
W	189	456	268	408	482	203	388	389
Pb	0.37	1.22	0.32	3.04	0.73	4.5	2.37	1.43
Th	0.18	0.12	0.13	0.53	0.06	0.28	0.11	0.18
U	0.39	0.19	0.33	0.39	0.21	0.09	0.20	0.24
La	2.2	4.23	2.35	4.32	4.30	3.07	3.59	3.59
Ce	8.33	10.34	8.65	12.90	10.80	6.57	8.20	9.32
Pr	1.57	1.40	1.56	1.88	1.55	0.96	0.95	1.17
Nd	9.94	6.71	8.27	9.10	7.37	4.80	5.44	5.23
Sm	3.11	2.42	2.67	2.26	2.46	2.74	2.04	1.70
Eu	0.68	0.58	0.87	1.01	0.85	0.64	0.77	0.64
Gd	4.84	3.06	3.00	2.99	3.21	3.10	2.53	2.82
Tb	0.549	0.455	0.425	0.370	0.444	0.390	0.324	0.524
Dy	3.16	2.74	2.01	1.78	2.59	2.51	1.99	3.36
Ho	0.466	0.380	0.376	0.300	0.479	0.500	0.332	0.484
Er	1.15	0.99	0.94	0.49	1.19	0.93	1.05	1.89
Tm	0.160	0.217	0.139	0.132	0.182	0.220	0.123	0.238
Yb	1.09	1.34	0.95	1.18	0.76	1.07	0.63	1.11
Lu	0.093	0.133	0.160	0.146	0.138	0.230	0.147	0.185

Nastavak tabele 14: Koncentracije mikroelemenata i RZ u granatima

330A/18	145	145	145	145	145	145	145	145	145	145
	centar	centar	centar	centar	centar	centar	centar	centar	centar	centar
P	26	22	31	250	21	19	27	33	34	25
Sc	0.62	0.42	0.91	i.g.d.	0.95	1.1	1.25	0.6	0.9	0.3
Ti	i.g.d.	i.g.d.	17.8	85	1780	1580	592	1.2	59.5	6.4
V	0.25	0.06	3.65	1.49	3.65	3.79	3.5	0.21	2.78	1.51
Cr	7.8	7.9	9.4	20.6	9.5	13.9	6.1	5.9	8.2	7.3
Mn	1629	1583	1822	15500	2717	2728	2539	2599	2865	1787
Zn	1.5	0.9	i.g.d.	2390000	4.7	i.g.d.	1.1	2.1	5	i.g.d.
Ga	15.8	14.6	13.7	4	8.7	6.3	6.5	9.8	9.3	14.2
Ge	4.4	4.1	4.8	1.7	7.4	7.4	6.8	8.8	8	4.1
As	311	265	95	490	182	48	310	298	271	271
Sr	0.36	0.17	0.19	1.05	0.32	0.66	0.55	0.39	0.54	0.94
Y	0.07	0.09	0.63	2.41	0.40	0.41	0.61	0.06	0.21	0.27
Zr	0.01	0.05	0.58	0.34	1.65	3.82	1.59	0.05	1.01	0.15
Nb	i.g.d.	i.g.d.	i.g.d.	i.g.d.	0.75	0.70	0.25	0.05	0.09	i.g.d.
Sn	23.3	20.8	31.6	4.8	9.8	15.1	2.3	5.2	13.4	22.1
Ta	0.06	0.07	0.07	0.04	0.07	0.10	0.04	0.04	0.03	0.06
W	1140	1112	510	75	286	124	279	407	466	854
Pb	0.16	0.05	0.15	0.35	0.12	0.01	2.32	0.10	1.62	0.83
Th	0.03	0.03	0.06	0.07	0.08	0.06	0.10	0.07	0.04	0.04
U	0.31	0.32	0.50	0.15	0.18	0.12	0.11	0.12	0.25	0.48
La	2.28	2.12	0.93	2.39	1.40	0.45	2.11	1.80	1.4	1.94
Ce	4.53	5.09	4.48	3.34	2.36	1.15	2.54	2.01	2.76	5.74
Pr	0.33	0.38	0.82	0.42	0.24	0.19	0.23	0.10	0.25	0.76
Nd	0.72	0.68	3.51	0.75	0.62	0.52	0.68	0.08	0.4	2.22
Sm	0.28	0.1	0.76	1.05	0.29	0.54	0.39	0.13	0.18	0.36
Eu	0.75	0.7	1.08	0.23	0.40	0.34	0.35	0.29	0.5	0.96
Gd	0.26	0.19	0.42	0.55	0.40	0.29	0.20	0.05	0.09	0.49
Tb	0.04	0.03	0.06	0.18	0.03	0.04	0.02	0.01	0.01	0.04
Dy	0.09	0.15	0.29	0.58	0.25	0.19	0.24	0.19	0.24	0.17
Ho	0.01	0.02	0.02	i.g.d.	i.g.d.	0.01	0.03	i.g.d.	i.g.d.	i.g.d.
Er	0.06	0.01	0.06	0.29	0.22	0.12	0.18	0.05	0.02	0.07
Tm	0.02	0.03	0.05	0.15	0.03	0.03	0.02	0.04	0.416	0.04
Yb	0.15	0.07	0.07	0.27	0.34	0.18	0.33	0.16	2.77	0.29
Lu	0.02	0.04	0.03	0.13	0.04	0.04	0.05	0.04	0.520	i.g.d.

Nastavak tabele 14: Koncentracije mikroelemenata i RZ u granatima

330A/18	145	145	145	145	145	145
	obod	obod	obod	obod	obod	obod
P	27	37	23	18	33	22
Sc	0.62	1.03	0.58	0.86	i.g.d.	1.12
Ti	4.4	i.g.d.	i.g.d.	13.2	i.g.d.	i.g.d.
V	1.08	0.43	0.08	3.23	0.15	1.96
Cr	9.2	7	8.8	8.3	5.2	4.8
Mn	2463	2345	2505	2950	2925	3746
Zn	i.g.d.	2.9	3.2	1.3	4.3	10
Ga	5.3	2.9	2.5	7.3	3.3	5.2
Ge	6.2	5	5.3	7.4	4.8	5.9
As	235	428	613	62	859	1184
Sr	0.24	0.36	0.62	0.41	0.54	17.4
Y	0.21	0.43	0.01	0.18	0.06	0.4
Zr	0.32	1.95	0.67	0.8	1.15	0.86
Nb	0.08	0.12	0.05	0.16	0.09	0.04
Sn	3.14	0.14	0.01	11.9	0.31	0.93
Ta	0.03	0.15	i.g.d.	0.1	0.07	0.02
W	147.7	31	23.6	139.8	48	119.7
Pb	0.53	0.53	0.54	0.47	0.48	0.53
Th	0.01	0.09	i.g.d.	0.06	i.g.d.	i.g.d.
U	0.03	0.01	0.01	0.09	i.g.d.	0.08
La	1.49	0.81	0.53	0.27	1.56	2.91
Ce	1.71	0.43	0.09	0.56	1.2	3.57
Pr	0.27	0.19	0.07	0.26	0.18	0.39
Nd	0.44	0.67	0.21	1.21	0.71	1.37
Sm	0.67	0.85	0.6	0.69	0.29	0.68
Eu	0.13	0.27	0.06	0.17	0.32	0.58
Gd	0.54	0.31	i.g.d.	0.32	0.15	0.32
Tb	0.05	0.05	0.04	0.07	0.05	0.07
Dy	0.19	0.25	i.g.d.	0.26	0.09	0.29
Ho	0.03	0.07	0.06	0.04	0.03	0.07
Er	0.31	0.04	0.24	0.08	0.04	0.23
Tm	0.02	0.03	0.03	0.05	i.g.d.	0.03
Yb	0.51	0.53	i.g.d.	0.63	0.26	0.41
Lu	0.01	0.08	0.08	0.06	0.03	0.04

Nastavak tabele 14: Koncentracije mikroelemenata i RZ u granatima

330A/18	293	293	293	293	293	293	293	293	293
	centar	centar	centar	centar	centar	centar	centar	centar	centar
P	31	24	33	29	21	30	29	28	85
Sc	1.26	1.54	1.87	2.29	2.31	3.78	1.82	3.22	2.92
Ti	103	622	746	513	1972	889	1150	961	1858
V	7.3	43.6	43.2	32.4	35.2	61.1	23.5	40.5	57.1
Cr	29.5	17.6	19	47.6	51.7	69.5	37.8	79.5	101.5
Mn	2080	2117	2083	2095	2406	2155	2383	2126	2647
Zn	64	1.3	i.g.d.	8.3	8.1	3	54000	25.4	272
Ga	3.4	21.8	21.2	18.7	24.3	21	19.1	22.4	19.8
Ge	5.1	3	3.3	4.6	5.3	3.4	4.4	3	4.8
As	256	13.2	18.7	45	16.6	8.1	38.5	29	28
Sr	0.89	0.04	0.08	0.42	2.23	0.2	0.68	1.18	18.6
Y	0.9	14.5	13.6	8.3	12.8	34.3	14.5	10.3	16.8
Zr	3.2	89.4	92.9	47.1	91.9	97.4	37	74.2	60.9
Nb	0.37	1.67	1.71	1.65	6.31	3.32	2.86	3.04	5.49
Sn	19.6	391	391	355	408	268	394	400	320
Ta	0.08	0.22	0.21	0.10	0.31	0.21	0.27	0.19	0.31
W	1.36	99.6	115.9	280.9	115.8	57.2	247.2	186	179.1
Pb	12.5	0.22	0.03	3	4.2	0.24	1.37	3.51	9.7
Th	0.06	1.18	1.22	2.59	2.27	0.69	1.93	2.41	2.48
U	0.11	1.31	1.45	2.76	2.38	0.77	2.03	2.96	2.56
La	1.24	0.45	0.55	1.04	0.59	0.31	1.14	0.91	1.16
Ce	2.7	4.66	4.85	10.03	5.76	2.91	7.6	8.84	8.67
Pr	0.29	1.53	1.67	2.94	2.13	1.04	2.29	2.99	2.64
Nd	1.1	11.9	12.8	17.2	18.5	8.1	14	21.1	16.8
Sm	0.43	4	3.4	2.22	5	3.57	2.83	4.01	2.73
Eu	0.14	1	1.01	1.36	1.59	1.04	0.95	1.06	1.14
Gd	0.51	3.15	3.33	1.93	3.8	4.86	2.12	3.67	3.61
Tb	0.07	0.32	0.49	0.27	0.55	0.98	0.46	0.41	0.47
Dy	0.22	2.07	2.30	1.85	2.52	5.96	2.27	2.37	2.31
Ho	0.05	0.63	0.7	0.31	0.31	1.25	0.57	0.54	0.66
Er	0.29	1.88	1.42	0.98	1.44	3.26	1.21	1	1.34
Tm	0.03	0.20	0.35	0.17	0.25	0.49	0.24	0.14	0.27
Yb	0.27	2.01	1.83	0.86	1.36	2.65	1.35	1.71	1.62
Lu	0.03	0.35	0.35	0.13	0.15	0.26	0.22	0.25	0.26

DISKUSIJA

Kontaktne metamorfne stene, posebno skarnovi, značajne su zbog mogućih pojava metaličnih mineralnih sirovina koje su nosioci Fe, W, Cu, Pb, Zn, Mo, Ag, Au, Sn, U, RZ, F, B u koncentracijama koje omogućavaju njihovu eksploataciju. Kontaktne metamorfne stene se uz intruzije magmatskih rastopa ili još zagrejanih magmatskih stena pojavljuju u vidu skarnova i/ili hornfelsa. Njihova dalja podela može se izvršiti po različitim kriterijumima. Najčešća podela skarnova, zavisno od protolita, je na endo i egzo skarnove. Endo skarnovi obrazuju se u spoljašnjem delu magmatskog intruziva, što kod kontaktne metamorfne stena Rudnika nije bio slučaj, a ni predmet istraživanja, pa oni dalje neće biti diskutovani. Egzo skarnovi se obrazuju u stenama u koje se intruziv utiskuje u subvulkanskom i vulkanskom nivou. Po pravilu to su sedimentne stene karbonatnog sastava. Zbog izuzetno velikog kontrasta u temperaturi, stene koje okružuju intruziv se zagrevaju, dolazi do različitih reakcija u vidu prekrystalizacije, kao i iščezavanja postojećih i formiranja novih minerala. Koji će se minerali formirati i u kojim sadržajima zavisi od prirode i hemizma protolita, temperature, pritiska, od toga da li je sistem otvoren ili zatvoren, metasomatskih procesa, oksido-redukcionih uslova, karaktera i količine hidrotermalnih fluida.

Svi ovi faktori u kontaktnom metamorfizmu ostavljaju svoj otisak ili trag u vidu kontaktno-metamorfne oreole. Zonarni karakter metamorfne oreole se ogleda u različitom mineralnom sastavu po pravilu silikatnih minerala udaljavajući se od intruziva.

Generalno posmatrajući skarnove, izdvajaju se tri zone oreole koje su definisane različitim mineralnim asocijacijama. U prirodi, neka od zona, što je čest slučaj, može izostati. Takođe, jasna granica između zona ili oreole ne postoji, nego se one u nekom svom delu preklapaju.

Skarnovi prve zone najbliži su kontaktu sa intruzivom i u njima se pojavljuje visokotemperaturna asocijacija minerala, kao što su granati, klino pirokseni, bazični plagioklasi i magnetit. Pirokseni uglavnom pripadaju grupi diopsida, granati grosularima i andraditima (granditi), dok su plagioklasi sa visokim sadržajima anortitske komponente.

Udaljavanjem od intruziva i prve zone, nalazi se druga zona skarnova. Nju definiše mineralna asocijacija sa granatima iz grupe grandita, kalcijским piroksenima, zatim mineralima koji u svom hemijskom sastavu sadrže OH grupu kao što su epidot, coisit, amfiboli i vezuvijan.

Treća zona je ujedno i najdalja zona od intruziva i nju karakteriše niskotemperaturna mineralna asocijacija sa hloritom, epidotom, coisitom, aktinolitom, tremolitom i kalcitom. Udaljavajući se od kontakta ova zona postepeno prelazi u neizmenjene protolite.

U skarnovima se može pojaviti čitav niz minerala zbog činjenice da su hidrotermalni fluidi bogati različitim inkompatibilnim elementima, pa minerali poput barita, turmalina, topaza, berila itd. nisu retkost. U gotovo sve tri zone skarnova mogu se pod uticajem fluida bogatih Cl⁻, F⁻ i B⁻ pojaviti minerali poput aksinita i skapolita. Skapolit je mineral indikativan za delovanje hidrotermalnih fluida sa povišenim salinitetom (Hammerli i dr. 2018).

Na kontaktno metamorfni oreol utiče više činilaca kao što su: veličina, hemijski sastav i oblik magmatskog intruziva, dubina na koju se magmatsko telo utiskuje (pritisak i temperaturni kontrast), kao i učešće fluida. Kontaktne metamorfne stene mogu nastati na

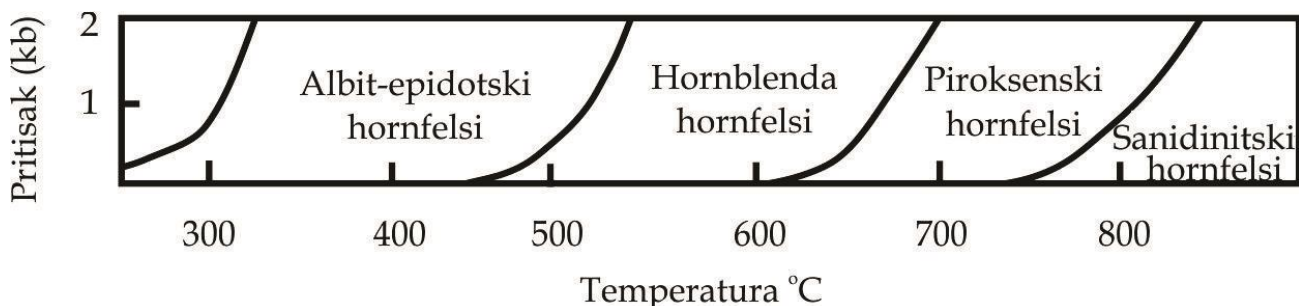
najrazličitijim dubinama Zemljine kore: neposredno uz plutonska magmatska tela, duž raseda i zona smicanja, u plitkim geotermalnim sistemima, na morskom dnu, i u dubokim nivoima Zemljine kore u terenima koji su podlegli metamorfizmu tonjenja. Međutim, kontaktno metamorfne stene i njihovi oreoli najbolje su razvijeni u plićim nivoima Zemljine kore gde je pritisak nizak, razlike u temperaturi veće, a učešće fluida izraženo.

Kontaktne metamorfne oreole obično nisu velikih razmera i kreću se od par milimetra, do par kilometara u prečniku. Prikazuju se različitim mineralnim asocijacijama, gde se mineralne asocijacije nastale na istom stepenu metamorfizma prikazuju izogradama.

Prenos toplote od intruziva ka okolnim stenama vrši se kondukcijom i konvekcijom. Ravnomerniji način prenosa toplote vrši se u suvim uslovima kondukcijom, dok je konvekcijski način prenosa toplote neravnomerniji i karakterističan za vlažne uslove. Pored termičkog kapaciteta koji intruziv "nasleđuje" od matične magme, treba napomenuti da se termički kapacitet intruziva dodatno povećava latentnom toplotom usled kristalizacije magme.

Prema Miyashiro (1973), Winter (2010) izdvojene su sledeće facije kontaktnog metamorfizma, slika 44:

- Albit-epidotska hornfels facija;
- Hornblenda hornfels facija;
- Piroksen hornfels facija i
- Sanidinit hornfels facija.



Slika 44: PT dijagram hornfels facija prema Miyashiro (1973)

Mineralna asocijacija albit-epidotske hornfels facije zavisi od stene protolita. Pri pritisku od 0.1 kbara temperatura koja definiše ovu faciju je do 410°C, a u zavisnosti od protolita mineralna asocijacija bila bi:

Kod pelitskih protolita:

Kvarc + Albit + Epidot + Muskovit/ Andaluzit + Hlorit + Biotit

Kod kvarc-feldspatskih protolita:

Kvarc + Mikroklin + Muskovit + Albit + Biotit

Hornblenda hornfels faciju definišu asocijacije minerala obrazovanih na temperaturama od 450 do 550°C i pritiscima od 0.1 kbara. Asocijacije minerala su:

Kod pelitskih protolita:

Kvarc + Plagioklas + Muskovit/Andaluzit + Kordijerit
ili Kvarc + Plagioklas + Muskovit + Kordijerit + Biotit

Kod kvarc-feldspatskih protolita:

Kvarc + Mikroklin + Muskovit + Plagioklas + Biotit ± Almandin

Piroksen hornfels facija difiniše mineralnu asocijaciju nastalu na temperaturama od 550 do 700°C i to:

Kod pelitskih protolita:

Kvarc + Plagioklas + Kalijski feldspat + Andaluzit/Silimanit + Kordijerit

Kod kvarc-feldspatskih protolita:

Kvarc + Kalijski feldspat + Plagioklas + Biotit

Sanidinitiske hornfels facije su izuzetno retke u kontaktno metamorfnom oreolu. Najčešće se nalaze kao ksenoliti u magmatskim intruzivima gde nastaju kao posledica dejstva najviših temperatura, od 750 do 900°C. Sanidinitiski hornfelsi se karakterišu odsustvom minerala sa OH grupom. Pelitski i kvarc-feldspatski protoliti imaju istu mineralnu asocijaciju:

Sanidin + Kordijerit + Anortit + Hipersten + Silimanit + Korund ± Mulit

VULKANSKA AKTIVNOST NA PROSTORU RUDNIKA

Na širem prostoru Rudnika utvrđen je veliki broj varijeteta magmatskih i vulkanskih stena (bazalti, lamprofiri, moncograniti, daciti, kvarclatiti, andeziti...). Prvi podaci prikazivani su u vidu izveštaja u kojima su konstatovane pojave magmatskih stena i data bliža determinacija. Sa ozbiljnijim radom na vulkanskim stenama se počinje od 1963-e godine. Ideju da je Rudnik jedan veliki vulkanski kompleks podržala su istraživanja Milića iz 1988-e godine, gde na osnovu satelitskih snimaka područja Rudnika, autor definiše prstenastu strukturu u širini od 12,5 kilometara.

Po Miliću 1988-e godine, definisana struktura u čijem se zapadnom delu nalazi južni segment rudničkog vulkanskog kompleksa geografski se može interpretirati kao prstenasta struktura koja je sa severa ograničena dolinom Jasenice, sa zapada dolinom Despotovice, a na jugu dolinom Gruže. Istočna granica ove prstenaste strukture je kontakt između gornjokrednih sedimentnih stena i serpentinita. Ovaj kontakt je definisan kao Stragarski rased, koji predstavlja gornjokredno-donjopaleogenu navlaku i kontakt između Sava zone i ispredlučnog basena Istočne Vardarske zone (Toljić i dr. 2018). Samom činjenicom da je ovaj kontakt definisan kao starija struktura isključena je mogućnost da predstavlja segment mlađe prstenaste tvorevine.

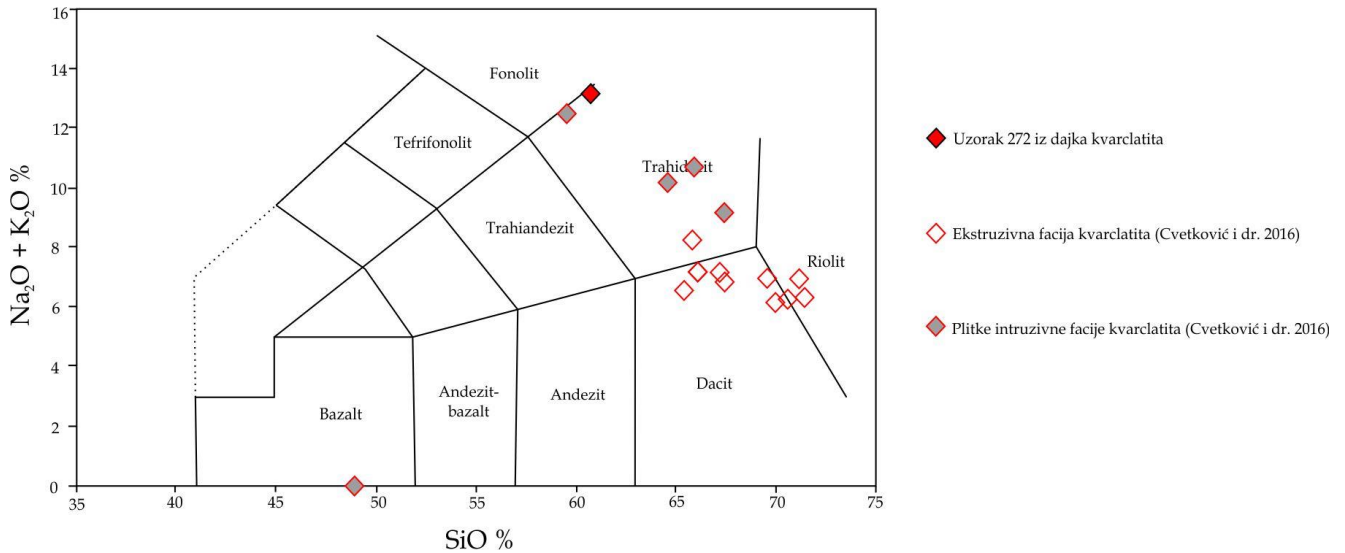
Prstenasta struktura tih dimenzija vezana za magmatsku i/ili vulkansku aktivnost Rudnika uslovlila bi koncentrični ili radijalni raspored vulkanskih stena, a ne njihovu linearnu distribuciju kakva je dokumentovana na OGK Gornji Milanovac i OGK Kragujevac, koja ne pokazuje zakonit položaj u odnosu na prstenastu strukturu. Takođe, dimenzije prstenaste strukture ukazuju da bi pojava vulkanita na površini bila daleko veća da je ona vezana za vulkanizam ili eventualno kolaps kaldere. Vulkanski materijal koji bi bio formiran kolapsom kaldere u tom obimu definitivno nije registrovan na terenu. Mogućnost je da je struktura formirana kao posledica velike intruzije (10-15 km u prečniku), a koja je ostala u subvulkanskim nivoima, iako pretpostavljena od strane mnogih istraživača, i dalje nije potvrđena.

Iz navedenih razloga, smatramo da izdvojena prstenasta struktura nije nastala vulkanskom aktivnošću, već da je vizuelni kružni oblik prstenaste strukture rezultat interakcije dva sistema raseda, glavnih regionalnih raseda pravca pružanja SZ-JI do SSZ-JJI i lokalnih raseda pružanja ISI-ZJZ do I-Z, po kojima su predisponirane doline rečnih tokova.

U bližoj okolini istraživanog područja Rudnika vulkanske stene se javljaju u vidu dajkova. Ovi dajkovi presecaju i utiskuju se u kredne sedimentne stene, a pronađeni su u više ispitivanih bušotina. Njihova debljina otkrivena u bušotinama varira od 1 do 30 metara. Cvetković i dr. (2016) godine opisuje dve vulkanske faze na Rudniku od kojih je starija faza datirana na više od 30 miliona godina. Vulkanska aktivnost sa manje od 23 miliona godina okarakterisana je kao mlađa vulkanska faza.

Radiometrijskom metodom U-Pb na cirkonima iz dva uzorka dobijena je starost vulkanskog događaja od pre 23,9 miliona godina (Kostić i dr. 2021). Jedan od dva ispitivana uzoraka uzet je iz vulkanita koji probija sedimentne stene, dok je drugi uzet iz jednog subvulkanskog tela koje se nalazi na oko 5 kilometara severozapadno od istraživanog područja. Time je potvrđeno da su vulkanske stene Rudnika koje se pojavljuju u vidu dajkova i silova vezane za mlađu vulkansku aktivnost Rudnika.

Rezultati hemijske analize ispitivanog vulkanita Rudnika (uzorak 272) prikazani su u tabeli 12. Na diskriminacionom dijagramu Le Bas i dr. (1986) ispitivani vulkanit, kao i podaci za vulkanite preuzeti iz Cvetković i dr. (2016) padaju u polje trahidacita (slika 45). Visoke vrednosti kalijuma mogu biti rezultat alteracije K-metasomatoze, ali optičkim, SEM i XRPD ispitivanjima u uzorcima nisu identifikovani minerali indikativni za ovaj tip okolorudnih izmena (neobiotit i adular). Zbog čega ove stene imaju izuzetno visok sadržaj alkalija, posebno kalijuma, ostaće otvoreno pitanje za neko drugo istraživanje.



Slika 45: Klasifikacioni dijagram po (Le Bas i dr. 1986) vulkanskih stena Rudnika. Uzorak 272 je analiziran prilikom ovog istraživanja

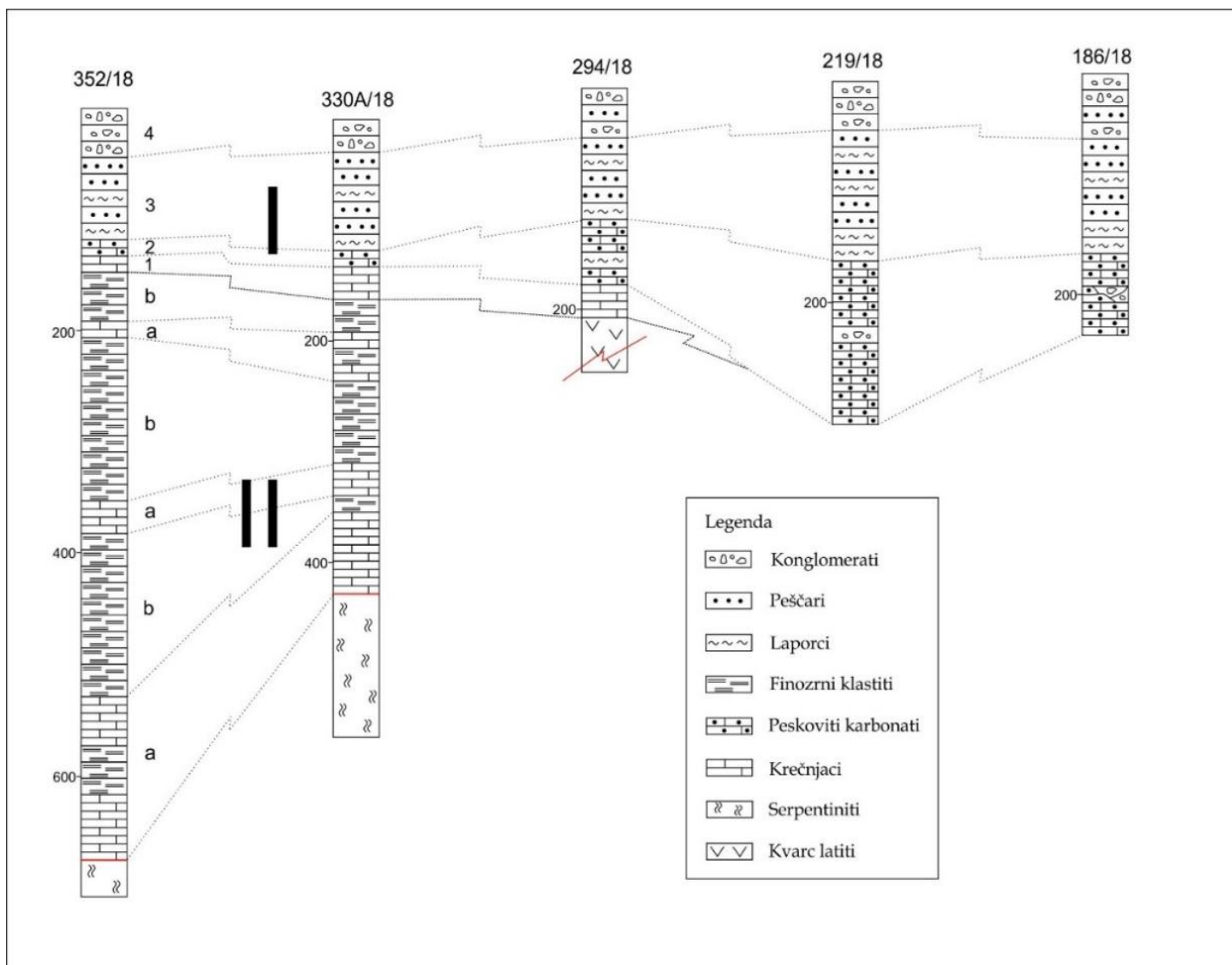
DETERMINACIJA PROTOLITA KONTAKTNO METAMORFNIH STENA RUDNIKA

Kontaktne metamorfne stene Rudnika ispitivane optičkim metodama pokazale su veliku raznovrsnost. Iz pet ispitivanih bušotina napravljeno je oko 450 petrografskih preparata za sistematsko ispitivanje u propuštenoj svetlosti. Utvrđeno je postojanje šest različitih varijeteta (1, 2, 3, 4, a i b; slika 46). Protoliti izdvojenih varijeteta konstatovani su kao dve krupne litološke jedinice (I i II).

Prva litološka jedinica podeljena je na četiri različita člana. Izgrađuju je konglomerati, peščari, alevroliti i peskoviti karbonati, koji su kontaktno metamorfisani u metakonglomerate i metapeščare, dok su delovi sa fino-zrnim klastitima transformisani u hornfelse. U delovima prve jedinice koji sadrže veće procenatne komponente, razvijeni su epidotski skarnovi.

Druga litološka jedinica, vezana za dublje nivoe, predstavljena je sa dva člana/protolita (klastičnim i karbonatnim) koji se međusobno smenjuju. Prema Toljić i dr. (2018), ciklus ritmičnog sedimentacionog ponavljanja koji se zapaža u donjoj kredi do cenomana, rezultat je transgresije. Fino-zrni klastiti iz druge litološke jedinice termokontaktno su izmenjeni u hornfelse, dok su karbonati transformisani u skarnove.

Generalno posmatrano, ispitivane bušotine zauzimaju položaj istok-zapad i pokrivaju deo profila čija je ukupna dužina 1230 metara. Najveću dubinu sa površine terena od 716,3 metara ima bušotina 352/18.



Slika 46: Litofacijalni stubovi ispitivanih bušotina sa izdvojenim litološkim članovima i podčlanovima.

DETERMINACIJA KONTAKTNO METAMORFNIH STENA RUDNIKA

Metaklastiti Rudnika

Metaklastiti Rudnika izgrađeni su od metakonglomerata i metapeščara. Metakonglomerati su prema sastavu podjeljeni na monomiktne i polimiktne metakonglomerate. Kod monomiktne metakonglomerata najzastupljeniji su valuci kvarcita, dok su polimiktne metakonglomerati izgrađeni od valutaka kvarcita, karbonata, peščara, rožnaca, serpentinisanih peridotita... Jedinica metaklastita Rudnika u rezultatima hemijskih analiza pokazuje povišene vrednosti pojedinih elemenata poput hroma i nikla. Prema Schmid i dr. (2008), ove jedinice su interpretirane kao deo Sava zone predstavljajući šavnu zonu koja razdvaja orogen Karpat-Balkanida (mega-jedinica Dakije) od Dinarida (Adrijska ploča). Po raznolikosti valutaka iz polimiktne metakonglomerata i njihovog prožimanja sa metapeščarima, ova jedinica podseća na erodovane i/ili resedimentovane delove akrecione prizme. Prisutnost valutaka serpentinisanih peridotita, rožnaca, kao i zrna hromspinelu u karbonatnom matriksu ukazuju da je materijal koji izgrađuje metakonglomerate i metapeščare erodovan i spiran sa ultrabazičnih stena, a da se potom mešao sa drugim materijalom u sedimentacionom basenu.

Metaklastiti se generalno nalaze bliže površini i dostižu dubinu do 170 metara (slika 53). Prelaz između metakonglomerata i metapeščara nije oštar, već postepen, uz međusobno prožimanje i mešanje. U bušotini 294/18 je zapaženo mešanje posebnih partija metapeščara i metakonglomerata u vidu sočiva. Metapeščari na kontaktu sa hornfelsima pokazuju ubrane deformacije, a pojedine lamine metapeščara mogu biti i iskidane.

Kod metapeščara klastičnu komponentu čine zrna kvarca, feldspata, hromspinelu i odlomaka serpentinita, dok u hornfelsima iz jedinice metaklastita klastičnu komponentu čine samo kvarc, feldspati i pirokseni, što je potvrđeno elektronskom mikroskopom i rendgenskom difrakcijom praha. Na diskriminacionom dijagramu hromnog i magnezijskog broja, spineli iz metaklastita vode poreklo od peridotita harzburgitskog sastava. Najbliži materijal izložen na površini kao potencijalni izvor erodovanog materijala sa peridotita nalazi se na istoku Rudnika u okolini mesta Stragari i takođe je harzburgitskog sastava (Brković i dr. 1978). Od Stragara ka zapadu prostiru se gornjokredne stene Jarmenovačkog razvića. Pozicije svih ispitivanih bušotina nalaze se u stenama gornje krede iz Jarmenovačkog razvića, koje su na Rudniku predstavljene metaklastitima. U njima odlomci serpentinisanih peridotita su sada delimično ili u potpunosti izmenjeni u aktinolit/tremolit i praškasti magnetit. Matriks većine metakonglomerata je glinovito-karbonatnog sastava, slabo metamorfisan u epidot, coisit i hlorit.

Skarnovi i hornfelsi Rudnika

Skarnovi u ispitivanim bušotinama Rudnika se pojavljuju od 170-og metra i dostižu dubinu do 360 metara u bušotini 330A/18 (vidi sliku 48). Bušotina 186/18 je zaustavljena u skarnovima, te se zbog toga ne zna prava debljina skarnova u navedenoj bušotini. Mineralni sastav skarnova direktno zavisi od temperaturnih uslova, sadržaja karbonata u protolitima i od uticaja hidrotermalnih rastvora. Kalcit i kvarc su redovno prisutni minerali kod svih tipova skarnova na Rudniku. Uslove slabijeg metamorfizma markiraju epidot/coisit i hlorit, dok pri jačem stepenu metamorfizma skarnovi pored kalcita i kvarca sadrže piroksene, granate i vezuvijan.

Podela skarnova Rudnika izvršena je po dominantnim mineralima na:

- Epidotske skarnove;
- Granatsko-vezuvijanske skarnove;
- Granatsko-piroksenske skarnove.

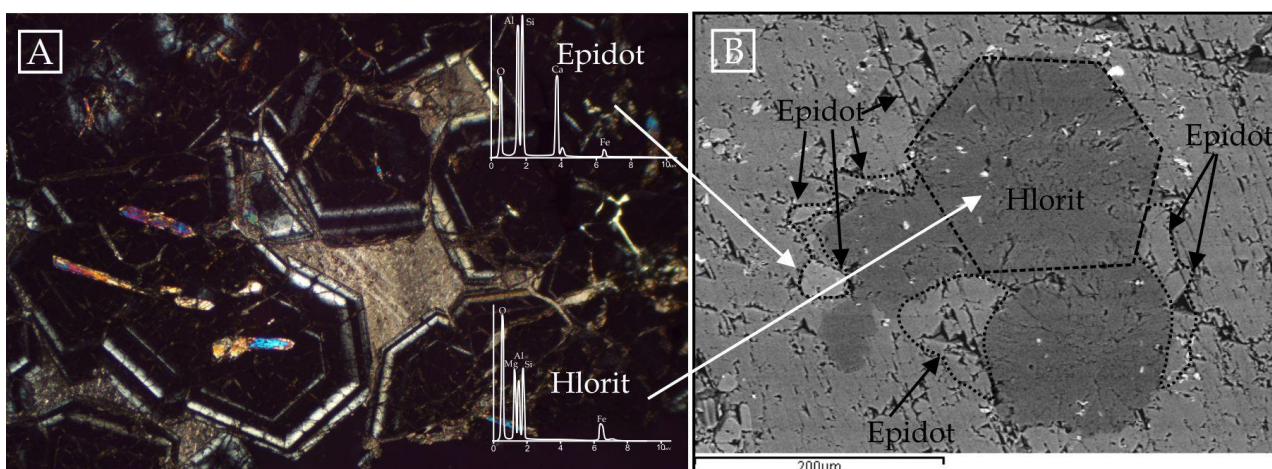
Najrasprostranjeniji su epidotski skarnovi koji pored epidota i coisita sadrže hlorit, kalcit i kvarc. Njihovo rasprostranjenje je uglavnom vezano za pliće delove bušotina do maksimalno 150 metara dubine. Kalcit je uglavnom prekrystalisao. Hlorit u epidotskim skarnovima ima izražen polihroizam u nijansama zelene boje i berlin plave interferentne boje. Pojava epidota je uvek praćena povećanim sadržajem kalcita, kad se pojavljuje u pravilnim kristalima. Metalni minerali su u epidotskim skarnovima podređeni i impregnaciono rasuti u steni. Veća nagomilanja se mogu zapaziti u sekundarnim kvarcnim i kalcitskim žicama.

Granatsko-vezuvijanski skarnovi u svom mineralnom sastavu sadrže epidot i piroksen u izuzetno podređenim koncentracijama, najčešće kao inkluzije u granatu. Granati pokazuju anizotropiju i zonarnost i u direktnom su kontaktu sa vezuvijanom koji se javlja u idiomorfim kristalima sa indigo-ljubičasto-sivim interferentnim bojama. Pored granata, vezuvijana i piroksena, mogu se javiti epidot i kalcit, a nije retka ni pojava metalnih minerala, galenita i sfalerita. Granatsko-vezuvijanski skarnovi su povezani sa zonom u kojoj su hidrotermalni rastvori indirektno imali veliki uticaj. Sadržaj hlora i fluora u vezuvijanu pokazuje da su magmatski intruzivi najverovatnije u vidu dajkova otvarali puteve velikim količinama hidrotermalnih rastvora koji su učestvovali u razmeni materija. Aksinitsko-kvarcne žice se u granatsko-vezuvijanskim skarnovima pojavljuju u zoni prelaska granatsko-vezuvijanskih skarnova u epidotske skarnove. Treba napomenuti da pojava vezuvijana na području Rudnika nije ranije zabeležena, pa Rudnik pored Bukulje, Potaj Čuke i Susula treba svrstati u lokalitete sa pojavom vezuvijana.

Granatsko-piroksenski skarnovi su, prema rezultatima hemijskih analiza, generalno nastali na račun protolita sa povišenim sadržajem karbonatne komponente. Protoliti nisu čisti krečnjaci, već mešavina klastita i karbonata (najverovatnije laporaca). Granati pripadaju anizotropnim granatima iz grupe grosular-andradita. Po Kostić i dr. (2021) centar zrna je bogatiji grosularskom komponentom, dok je obod više andraditskog sastava. Pravilnog su pseudoheksagonalnog oblika, a optička zonalnost se može zapaziti i u polarizacionom mikroskopu (slika 21,A,B,C i F). Pirokseni pripadaju grupi diopsida, ređe hedenbergita. Pojedina zrna piroksena mogu dostići dimenzije preko 5 milimetara, dok su sitnija zrna često inkluzije u granatima. Zrna su izduženih i prizmatičnih formi sa visokim

interferentnim bojama zbog kojih se piroksen može pogrešno odrediti kao epidot. Hemijska ispitivanja piroksena elektronskim mikroskopom, pokazala su odsustvo zonalnosti od centra zrna ka obodu.

Granatsko-piroksenski skarnovi su često dezintegrisani usled jakog uticaja hidrotermi koje rastvaraju kalcit i na njegovom mestu „obaraju“ metalne minerale poput halkozina, halkopirita, pirita, galenita i sfalerita (strukture zamenjivanja, „replacement“)... Udaljavanjem od zone najintenzivnijeg metamorfizma pojava hlorita u radijalnozrakastim formama koji sa epidotom gradi pravilne šestougone forme, je uobičajena. Reliktni pravilni oblik asociраних hlorita i epidota ukazuje da su formirani retrogradnim reakcijama na račun granata. Radijalnozrakasti hloriti i epidoti prikazani su na BSE fotografiji sa spektrima ovih minerala dobijenih SEM metodom, slika 47.



Slika 47: (A) Optički zonarni granati sa inkluzijama piroksena; (B) Radijalnozrakasti hlorit i epidot prikazani su na BSE snimku sa njihovim EDS spektrima

Hornfelsi Rudnika su jedinica kontaktno metamorfne stena koja je generalno nastala od fino-zrnih klastita i laporaca. U dubljim delovima ispitivanih bušotina ritmički se smenjuje sa skarnovima. Njihov mineralni sastav uključuje kvarc, kalcit, kalijski feldspat, plagioklas, amfibol, piroksen, epidot i hlorit. U delovima koji su bliži kontaktu sa kvarclatitskim dajkovima i koji imaju veći sadržaj CaCO_3 u mineralni sastav „ulaze“ i sitni granati (veličine oko 0.1 milimetar) i vezuvijan. Od akcesornih minerala sadrži apatit i cirkone, nasleđene od protolita, dok su od metalnih prisutni pirit i podređeno arsenopirit.

Prema važećoj podeli (Miyashiro, 1973) hornfelsi Rudnika pripadali bi:

- Albit-epidotskoj faciji;
- Hornblenda faciji i
- Piroksenskoj faciji.

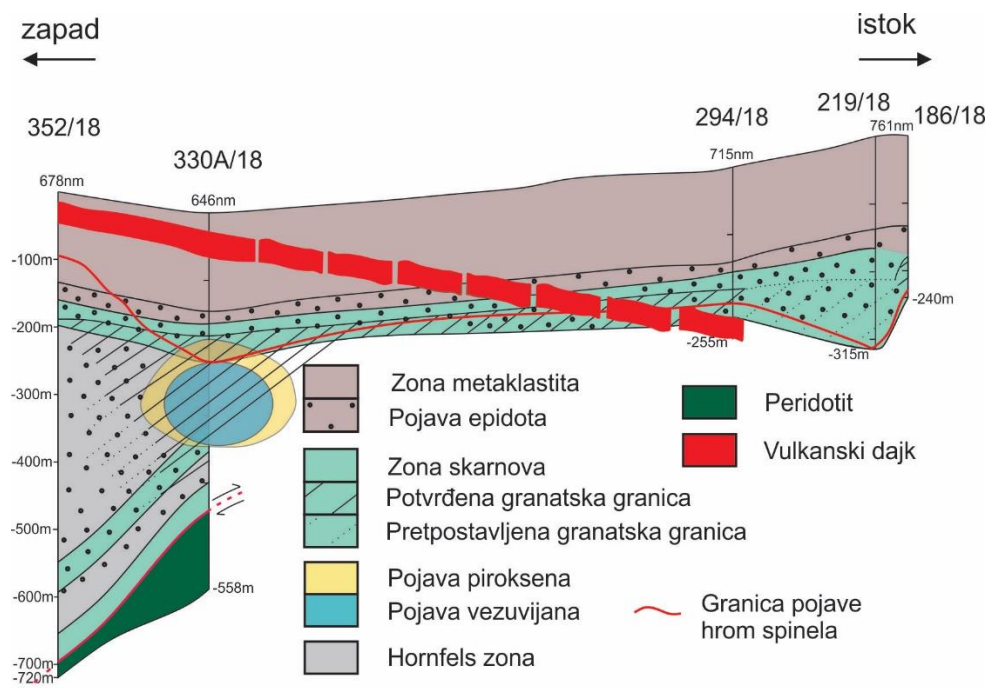
Albit-epidotska facija je slabo zastupljena, a nabušena je sa tri bušotine oznaka 186/18, 219/18 i 294/18. Uslovima kontaktno metamorfne promena ove facije podlegli su i metaklastiti koji se nalaze bliže površini i koji su delom nastali od materijala ultramafitskog

porekla. Minerali albit-epidotske facije su: kvarc, muskovit, hlorit, albit, epidot, coisit, kalcit, aktinolit/tremolit. Od metaličnih minerala u ovoj faciji dominiraju hrom spineli i magnetit.

Hornblenda facija se nastavlja na albit-epidotsku faciju. Jasna granica između njih ne postoji, već se one u prostoru od oko 10 metara međusobno prožimaju. Hornblenda facija je najrasprostranjenija i pruža se u dubinu do zone bliže kontaktu sa kvarclatitskim dajkom u bušotini 330A/18 (250 do 350 metara), gde je zamenjuje piroksenska facija. Kod bušotina 330A/18 i 352/18 zahvata i metaklastite blizu površine. Mineralni sastav u ovoj faciji je: kvarc, kalijski feldspat, plagioklas, epidot, coisit, hlorit, kalcit, amfibol aktinolit i podređeno hornblenda. Kod ove facije je za mineraloško izučavanje izrazito sitnozrnih delova korišćena metoda rendgenske difrakcije praha i skenirajuća elektronska mikroskopija. U dubljim delovima, zavisno od protolita, smenjuje se sa epidotskim i granatsko-vezuvijanskim skarnovima. Hornblenda facija ima najveće rasprostranjenje na ispitivanom terenu, a i u dubinu se može pratiti više stotina metara.

Piroksenska hornfels facija je zastupljena samo u blizini kontakta sa magmatskim telom u vidu sila ili dajka u bušotini 330A/18, gde se piroksenski hornfelsi smenjuju sa granatsko-piroksenskim skarnovima. Debljina ove facije nije veća od par metara i usko je vezana za kontakt sa magmatskim telom. Minerali u ovoj faciji su kvarc, kalijski feldspati, plagioklas, hornblenda, piroksen, podređeno epidot i kalcit. Od akcesornih minerala sadrže apatit i cirkon, a od metaličnih najprisutnija su sitna zrna pirita i arsenopirita, do 0.2 milimetra.

Skarnovi i hornfelsi se veoma razlikuju u mineralnom sastavu. Nastanak minerala u skarnovima i hornfelsima direktno zavisi od PT uslova i sadržaja karbonatne komponente u protolitu, pa je zbog toga nemoguće izvršiti dobru korelaciju i prikaz facija za skarnove i hornfelse zajedno. Iz tog razloga su za prikaz svih facija u ispitivanim bušotinama korišćene hornfels facije koje se koriste u stranoj literaturi, a koje kontaktno metamorfne stene prikazuju samo na osnovu mineralne asocijacije i PT uslova.



Slika 48: Profil rasprostranjenja kontaktno metamorfnih stena iz ispitivanih bušotina sa karakterističnim mineralnim izogradama

PROMENA HEMIZMA MINERALA U ZAVISNOSTI OD DUBINE

Pomoću metode skenirajuće elektronske mikroskopije, izvršena su hemijska ispitivanja na više minerala koji su utvrđeni u ispitivanim nabušanim stenama. Promena hemizma je obrađena samo za epidot, amfibol i granat.

Epidoti Rudnika

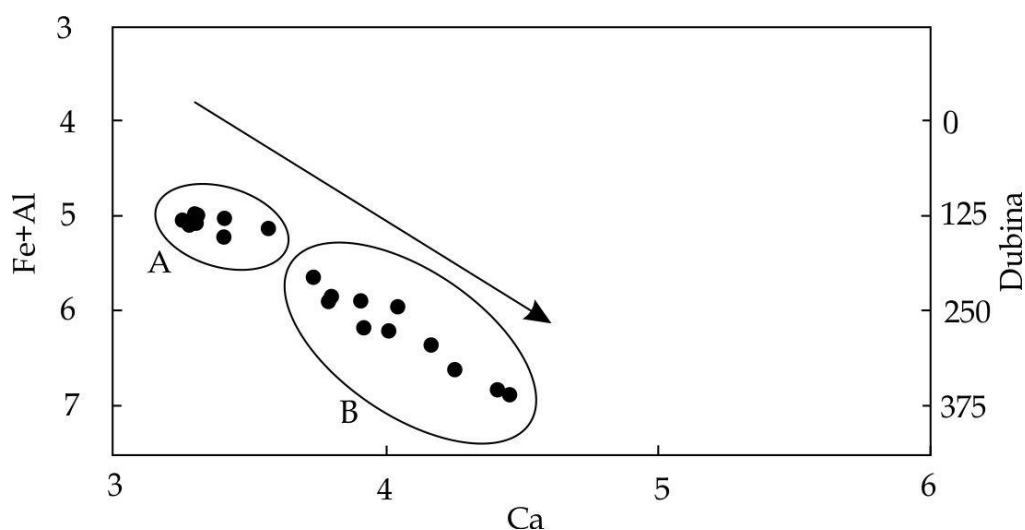
Varijable koje kontrolišu sastav epidota su različite i zavise od temperature, pritiska, hemijskog sastava protolita i karaktera fluida koji su u interakciji sa protolitom. Zamena jona Fe^{3+} i Al^{3+} između epidota i fluida koji su u ravnoteži može se prikazati kao reakcija heterogene izmene u hemijskim komponentama epidota $Ca_2FeAl_2Si_3O_{12}(OH)$ i klinocoisita $Ca_2Al_3Si_3O_{12}(OH)$. U formi jednačine ova reakcija se može prikazati putem jednačine po

Apted i dr. (1983) $\ln K_1 = \ln \frac{a_{cz}}{a_{ep}} + \ln \frac{a_{Fe^{3+}}}{a_{Al^{3+}}}$ gde je K_1 konstanta ravnoteže reakcije, a_{cz} i a_{ep} predstavljaju aktivnost $Ca_2Al_3Si_3O_{12}(OH)$ i $Ca_2FeAl_2Si_3O_{12}(OH)$ u epidotu, $a_{Al^{3+}}$ i $a_{Fe^{3+}}$ aktivnost jona trovalentnog aluminijuma i gvožđa. Iz jednačine se može zaključiti da sastav epidota zavisi od odnosa Al^{3+} prema Fe^{3+} u fluidu, kao i PT uslova konstante ravnotežne reakcije. U čvrstom rastvoru epidota, zamena Fe^{3+} i Al^{3+} jona je kompleksna funkcija temperature i pritiska, sastava protolita i sastava fluida.

Formiranje epidota u stenama sa povećanom količinom karbonata, može se prikazati pomoću jednačine:



Na slici 49. prikazan je odnos zbira katjona Fe^{3+} i Al^{3+} prema Ca^{2+} u analiziranim epidotima. Vrednosti koje su korišćene u dijagramu dobijene su iz strukturne formule epidota.



Slika 49: Dijagram odnosa zbira katjona Fe^{3+} i Al^{3+} prema Ca^{2+} u epidotu, gde se sa porastom dubine ovaj odnos linearno povećava.

Na dijagramu se izdvajaju dve grupe u kojima linearno raste odnos Fe i Al prema Ca. Prva grupa obeležena simbolom A su epidoti koji se nalaze u jedinici metaklastita, dok druga grupa obeležena sa B obuhvata epidote koji su formirani u hornfelsima i skarnovima. Iz datog dijagrama se jasno može videti da sa porastom dubine raste povećanje sadržaja Al i Fe, ali i Ca. Sistematskim ispitivanjem prisutnih faza pomoću SEM i XRPD metode, može se zaključiti da epidoti koji se nalaze u steni sa granatima, piroksenima i delimično sa vezuvijanom imaju veći odnos Fe+Al/Ca. Povećanje Fe i Al u epidotu indicira povećanje temperature i/ili blizinu kontakta, dok se povećanje Ca može objasniti protilitom koji je generalno bogatiji Ca komponentom.

Prema literaturnim podacima prvo pojavljivanje epidota očekuje se na temperaturi oko 240 °C. Sigvaldson (1963) eksperimentalno dokazuje pojavljivanje epidota i na nižim temperaturama ~200 °C, dok Reverdatto (1973) u svojoj knjizi „Facije kontaktnog metamorfizma“ navodi opseg temperatura od 300 do 500 °C na kojima je epidot stabilan.

Iz ovoga se može zaključiti da je epidot stabilan u širokom rasponu temperatura, a da na njegov hemijski sastav utiče veliki broj promenljivih faktora, pa se korišćenje epidota kao preciznijeg geotermometra ne preporučuje.

Granati Rudnika

Granati u kontakto metamorfnim stenama Rudnika strukturno odgovaraju porfiroblasta, često udruženi sa epidotom i kalcitom, pri čemu grade „gnezda“. Jedan od uslova za sigurnu pojavu granata je značajnije povećanje sadržaja karbonatne komponente u protolitu. Ovo povećanje karbonatne komponente, koje je potvrđeno kompleksometrijskim i hemijskim analizama uzoraka, korelativno je prvoj pojavi granata u uzorku 269 u bušotini 330A/18. Pojava granata je potvrđena optičkom, SEM i XRPD metodom. Granati u plićim nivoima su optički anizotropni i pripadaju grupi kalcijevskih granata (grosular). U izuzetno orudnjenoj i skarniziranoj zoni, kao na primer u bušotini 330A/18 i uzorku 293 sa dubine 289.4 metra, uočavaju se zonarni granati. Daljim ispitivanjem XRPD je pokazao da je reč o granatima grosularsko-andraditskog sastava, dok je pomoću BSE slike i SEM metode utvrđeno da je centar granata grosularskog, a obod isključivo andraditskog sastava.

Kostić i dr. (2021) ovaj fenomen pripisuju dvofaznosti procesa kontaktnog metamorfizma na Rudniku, gde je u prvoj fazi formiranja granata grosularskog sastava uticaj imala isključivo temperatura i generalni hemijski sastav protolita. Po Hickmott i dr. (1992) povećan sadržaj mikro elemenata u granatu grosularskog sastava, poput titanijuma i cirkonijuma, ukazuje na petrološko-mineraloške reakcije, odnosno na rast granata na račun epidota.

Na tendenciju da prvoformirani granati u kontakto metamorfnim stenama budu bogati aluminijom prvi je ukazao Einaudi i dr. (1981) koji je definisao ovu fazu kao progradnu fazu kontaktnog metamorfizma.

Druga faza i razvoj andraditske zone po zrnima granata grosularskog sastava rezultat je prinosa gvožđa magmatskim hidrotermalnim fluidima, što su potvrdila dva

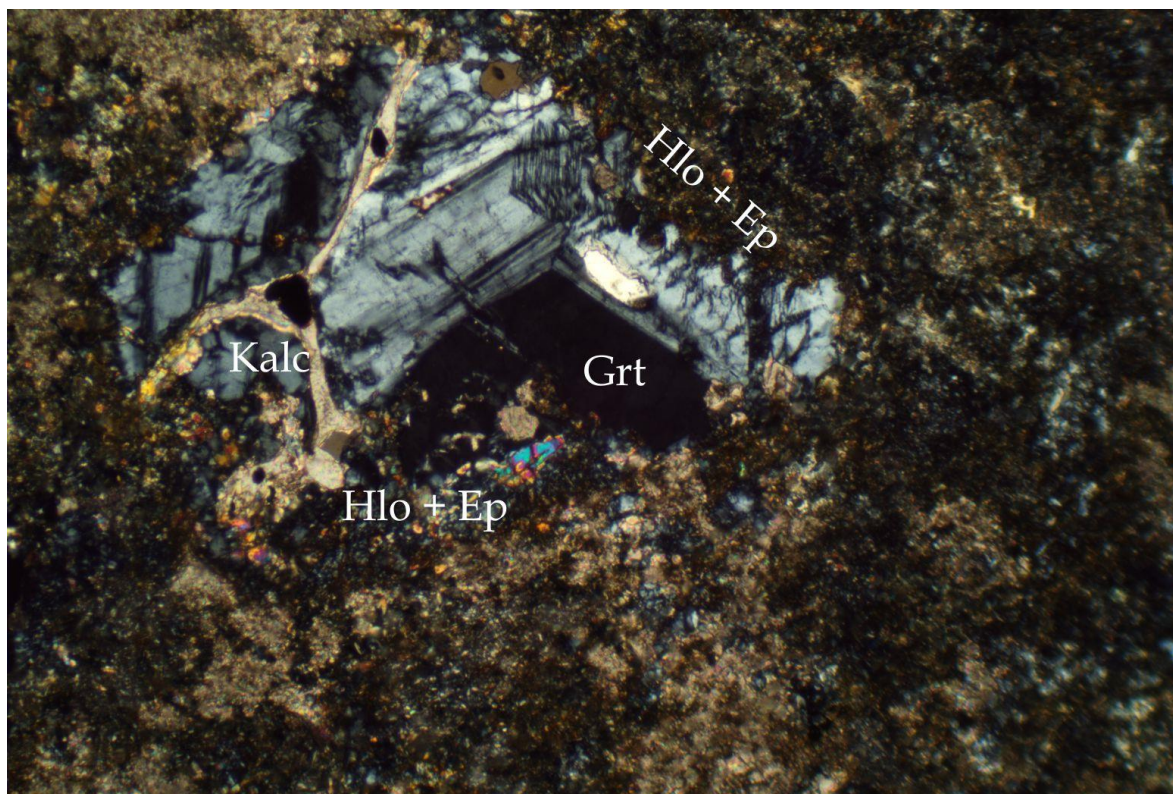
nezavisna istraživanja. Cvetković i dr. (2016) objašnjavaju vezu između formiranja rudnih minerala i „boiling“ procesa u završnoj fazi kristalizacije plutona pomoću mehanizma mešanja hemijski različitih vrsta magmi (suvih i vlažnih), gde se oslobađa značajna količina hidrotermalnih rastvora.

Analize izotopa sumpora (Tošović, 2000) na sulfidnim mineralima, pokazule su da su i poreklo i transport sumpora vezani za hidroterme magmatskog porekla.

Analizom sadržaja mikroelemenata pomoću SEM metode utvrđeno je da je andraditska faza bogata volframom. Prema Keppler dr. (1991) hidrotermalni rastvori sa povećanim sadržajem volframa oslobađaju se kristalizacijom granitskih magmi.

Inui i dr. (2004) eksperimentalno dokazuju da se sadržaj magnezijuma i gvožđa, kao i njihov odnos, povećava sa porastom temperature. Ulazak magnezijuma i gvožđa u sastav granata, objašnjava se reakcijom epidota i hlorita.

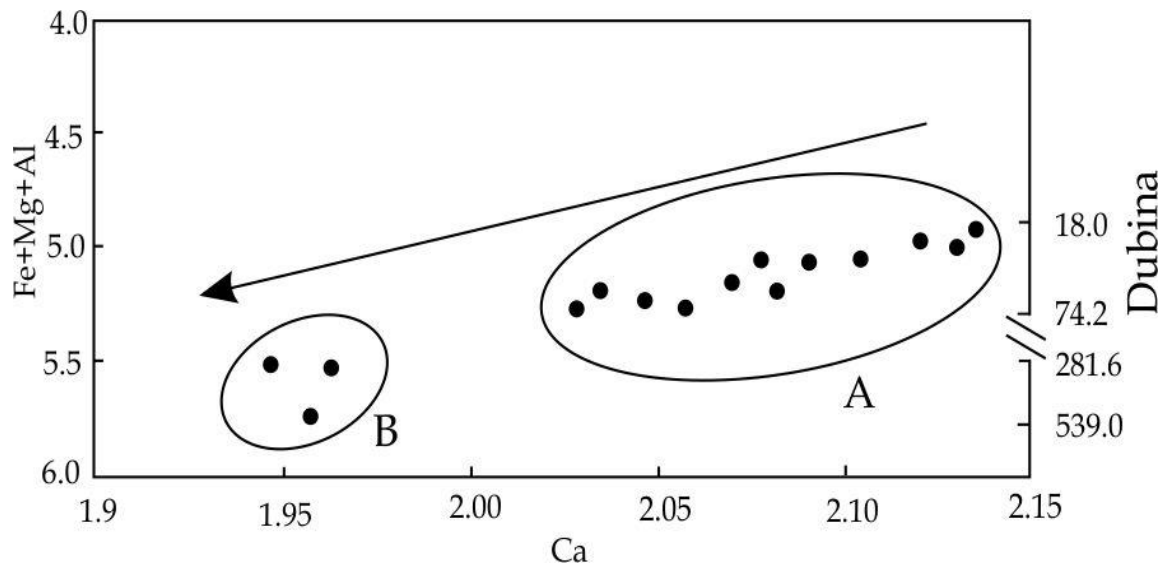
Zapažanja iz eksperimenta Inui i dr. (2004) nisu primenljiva na granate Rudnika pošto je magnezijum ispod granice detekcije SEM metodom. Magnezijum koji ulazi u sastav granata kao element ukazuje da u reakciju formiranja granata nije bio uključen hlorit, odnosno da je hlorit u steni sekundarni mineral koji je nastao alteracijom granata u epidot i hlorit tokom retrogradnih procesa. Ova reakcija je uočena i na petrografskom preparatu uzorka 298, a prikazana je na slici 50. Daljim analizama hlorita iz uzorka 298 utvrđeno je da pripada grupi visokogvoždevitih hlorita (ripidolit). Sadržaj kalcijuma u granatima, prema rezultatima hemijskih analiza, je konstantan, što ukazuje da je u protolitu bilo dovoljno karbonatne komponente i da ista nije potrošena tokom reakcije.



Slika 50: Sekundarne (retrogradne) promene granata u epidot, hlorit i kalcit u skarnu iz uzorka 298

Amfiboli Rudnika

Amfiboli u skarnovima Rudnika po hemijskom sastavu pripadaju aktinolitima i podređeno tremolitima. Tremoliti su generalno vezani za pliće nivoe nabušenih jedinica. Obzirom da se tremoliti pojavljuju samo u metaklastitima Rudnika u čiji sastav ulazi materijal iz peridotita, određivanju jasne granice između pojavljivanja ova dva amfibola nije posvećena veća pažnja. Na osnovu vrednosti dobijenih iz strukturne formule urađen je dijagram na kome se vidi da amfiboli iz hornfelsa (slika 51, A) imaju povećan sadržaj zbira katjona gvožđa, magnezijuma, aluminijuma i kalcijuma, po čemu se razlikuju od amfibola u metaklastitima (slika 51, B). Sa dijagrama se takođe može uočiti da zbir katjona Fe, Mg i Al raste, dok sadržaj Ca opada sa povećanjem dubine.



Slika 51: Dijagram odnosa zbir katjona Fe^{3+} , Al^{3+} i Mg^{2+} prema Ca^{2+} u amfibolima. Grupu A predstavljaju amfiboli iz metaklastita, dok su u grupi B amfiboli iz hornfels jedinice. Fe^{3+} , Mg^{2+} , Al^{3+} i Ca^{2+} su dobijeni iz strukturne formule amfibola.

USLOVI KONTAKTNOG METAMORFIZMA

Kontaktne metamorfne stene Rudnika ne pokazuju tipično pojavljivanje kontaktno metamorfne stena sa karakterističnim kontaktnim oreolom oko magmatskog intruziva. Zbog atipičnog načina pojavljivanja i odsustva mineraloške raznolikosti petrografskih uzoraka, odredba uslova kontaktnog metamorfizma zahtevala je primenu velikog broja metoda. PT uslovi određeni na osnovu pojavljivanja određenih minerala (epidot, granat, piroksen, vezuvijan...) nisu od velike koristi, jer su navedeni minerali stabilni u širokom temperaturnom rasponu, a neki od njih mogu nastati i hidrotermalno i kontaktno metamorfno.

Merenja temperatura homogenizacije fluidnih inkluzija u pojedinim mineralima mogu se koristiti kao geotermobarometri nezavisno od drugih metoda. Temperature homogenizacije fluidnih inkluzija dale su uvid u temperature hidrotermalnih fluida koji su cirkulisali u vreme kristalizacije minerala. Orudnjene kvarcne žice i fluidne inkluzije u kvarcu pokazale su da postoje dve generacije fluidnih inkluzija koje su okarakterisane kao visokotemperaturne i niskotemperaturne. Visokotemperaturne fluidne inkluzije imaju opseg temperatura homogenizacije od 396-410° C, dok niskotemperaturne fluidne inkluzije pokazuju temperature homogenizacije između 228-250° C. U odabranim zrnima kvarca u kojem su vršena merenja, najverovatnije postoji i treća grupa fluidnih inkluzija na temperaturama između 250 i 410° C. One prilikom ispitivanja nisu pronađene, pa se njihovo prisustvo može samo pretpostaviti.

Salinitet kvarcnih fluidnih inkluzija je u rasponu od 7.5-9.6%. Ovaj podatak ukazuje da su hidroterme bile izuzetno „aktivne-korodivne“ i sposobne da „ispiraju“ i prenose jone metala.

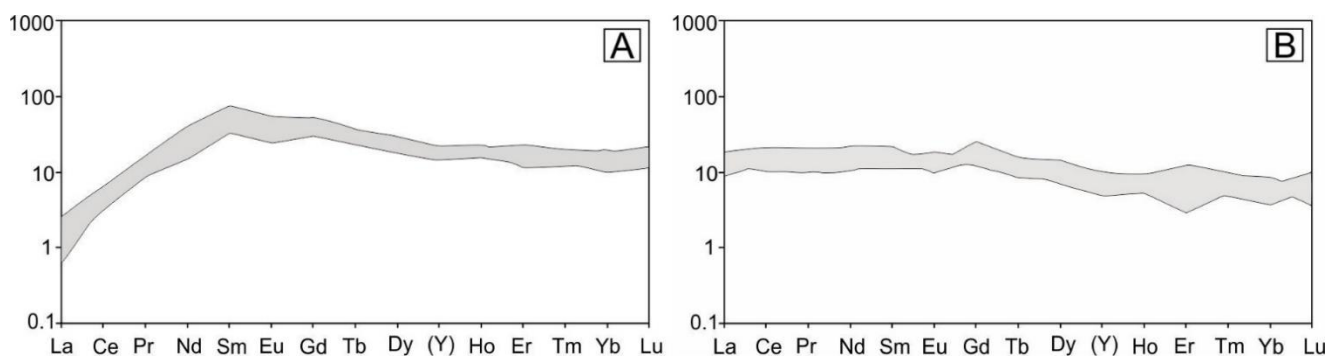
Za razliku od kvarcnih fluidnih inkluzija, merenja vršena na fluidnim inkluzijama u epidotu iz skarnova ukazuju na temperature homogenizacije od 320° C i salinitet od 9.8%. Temperature nastanka epidota u ovom sistemu odgovaraju temperaturnom opsegu koji je opisao Reverdatto (1973). Može se pretpostaviti da su fluidne inkluzije u epidotu, a koje nisu pronađene i izmerene u kvarcu, nastale na nižim temperaturama u fazi hlađenja hidrotermalnih fluida.

Temperature homogenizacije fluidnih inkluzija izdvojenih u granatima nisu izmerene zbog tehničkog ograničenja termalnog stočića i maksimalne temperature zagrevanja prilikom eksperimenta do 560° C. Ovo ukazuje da su granati formirani na temperaturama višim od 560° C. Za merenje ovakvih visokotemperaturnih fluidnih inkluzija preporučuje se korišćenje termalnog stočića za „melt“ inkluzije. Veliki temperaturni raspon fluidnih inkluzija koje se nalaze u mineralima u istom uzorku stene može ukazati da su se prilikom formiranja skarnova hidroterme hladile, pri čemu su granati formirani u fazi u kojoj su hidrotermalni fluidi visokotemperaturni, a da su u kasnijim fazama hlađenja formirani nižetemperaturni minerali (epidot i kvarc).

Ukoliko slične vrednosti preračunatih saliniteta u fluidnim inkluzijama epidota i kvarca ukazuju na genetsku vezu hidrotermi odgovornih za njihovo formiranje, onda se može pretpostaviti da su hidroterme imale izuzetno visoke početne temperature na šta ukazuju fluidne inkluzije u granatima, a da su uslovi za formiranje ostalih rudnih i silikatnih minerala postignuti njihovim postepenim hlađenjem. U istraživanju koje je sproveo Clark

(1960) na arsenopiritima sa Rudnika dobijene su temperature formiranja arsenopirita oko 380° C.

Zonarnost granata sa Rudnika manifestuje se različitim sadržajima gvoždavite i aluminijumske komponente, pa sastav granata varira od grosulara u centru kristala do andradita na obodu zrna. Vrednosti retkih zemalja normalizovane na hondrit po McDonough and Sun (1995) pokazale su različite oblike dijagrama u zavisnosti od dominantne zone granata (slika 52). Delovi granata bogatiji andraditskom komponentom pokazuju osiromašenje lakim elementima retkih zemalja, dok obod zrna bogatiji grosularskom komponentom pokazuje podjednako obogaćenje lakim i teškim elementima retkih zemalja. I obod i centar zrna pokazuju jedva приметnu negativnu Eu anomaliju Kostić i dr. (2021).



Slika 52: Retke zemlje analizirane laserskom ablacijom i normalizovane na hondritske vrednosti McDonough and Sun (1995). (A) Lake retke zemlje pokazuju osiromašenje u delovima granata koji su bogatiji andraditskom komponentom, (B) Granati bogatiji grosularskom komponentom imaju ujednačene koncentracije retkih zemalja Kostić i dr. (2021)

Andraditski obod bogatiji je od grosularskog centra volframom skoro 12 puta. Nasuprot tome, sadržaji uranijuma, torijuma i cirkonijuma su povećani u grosularskom centru kristala. Bau (1991) eksperimentalno dokazuje da se granati iz skarnova koji pokazuju osiromašenje lakim elementima retkih zemalja sa negativnom ili odsutnom Eu anomalijom formiraju u neutralnim (zatvorenim) sistemima. Gaspar i dr. (2008) navode da se grosularski granati najčešće formiraju interakcijom fluida čiji sastav najviše zavisi od hemizma stene protolita. Takođe navode da Fe bogati kalcijski granati sa povećanim sadržajem elemenata lakih retkih zemalja i pozitivnom Eu anomalijom nastaju na račun elemenata prinatih magmatskim rastvorima.

Tendencija raniformiranih Al-bogatih granata u skarnovima da u kasnijim retrogradnim fazama prelaze u Fe-bogate granate, interpretirana je kao rezultat različitih fizičko-hemijskih promena tokom kristalizacije (Einaudi i dr. 1981, Meinert i dr., 1992, Kostić i dr. 2021).

Stowell i dr. (1996) objašnjava da se kristalizacija granata u skarnovskom sistemu može odigravati putem difuzije u stenama protolitima usled procesa metasomatizma, kao i promena pritiska i temperature. Za granate sa Rudnika se može zaključiti da je nakon prve faze kristalizacije u kojoj je formiran Al-bogatiji grosular, došlo do nagle promene i da kristalizacija granata nastavlja u smeru Fe-bogatih, andraditskih faza. Ova promena rezultat je prinosa gvožđa u sistem, najverovatnije hidrotermalnim rastvorima. Prinos Fe u

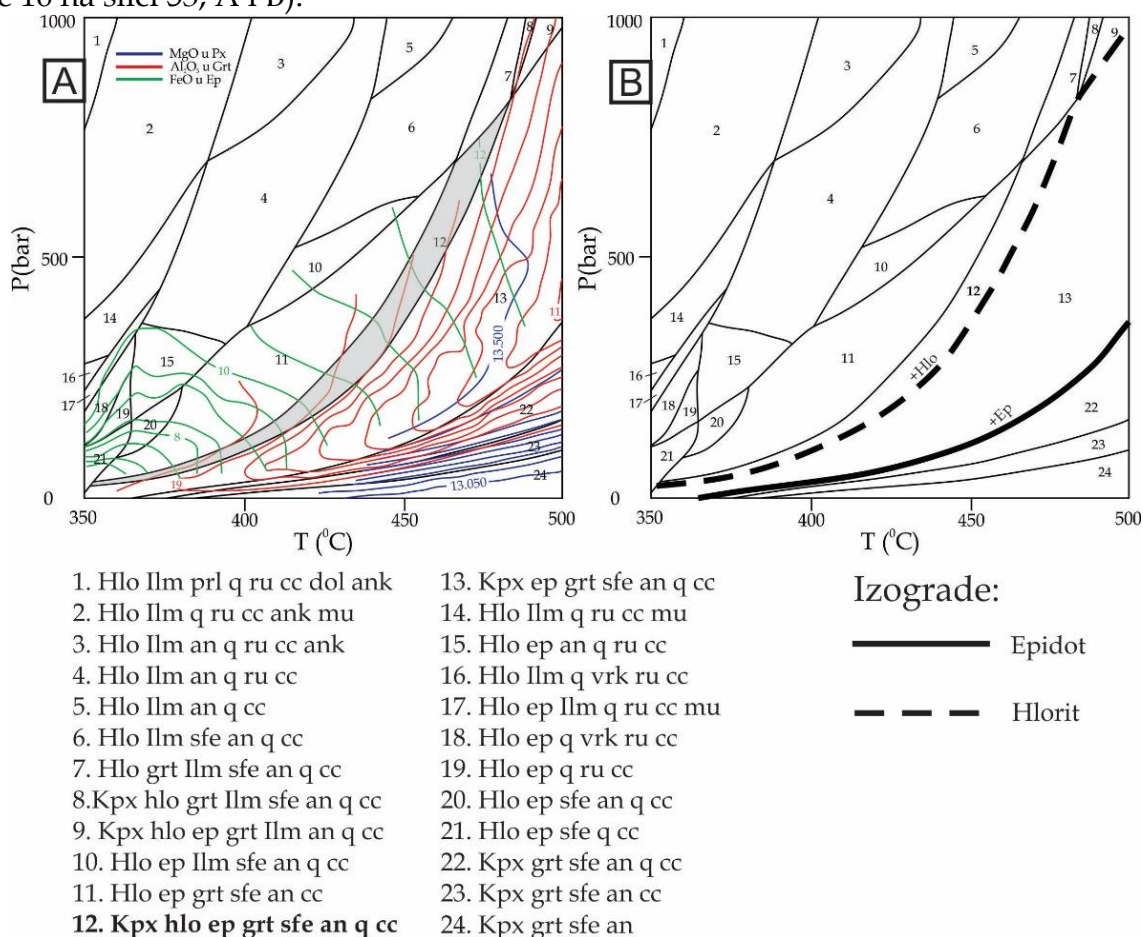
sistem tokom druge faze omogućilo je formiranje vezuvijana, čije pojavljivanje u skarnovima Rudnika nije ranije zabeleženo. Postepenim padom temperature hidrotermalnih fluida, što je potvrđeno i merenjem temperatura homogenizacije fluidnih inkluzija, omogućeno je formiranje i drugih minerala bogatih vodom, kao što su epidot i hlorit.

Prema podacima koje su prikazali Cvetković i dr. (2016) proces mešanja magmi je glavni okidač mlađe faze vulkanizma na Rudniku. Ovaj proces je ubrzao proces ključanja fluida („*boiling*“), pospešio oksidaciju hidrotermalnih fluida i stvorio uslove za intenzivnu hidrotermalnu aktivnost. Prema Jamtveit i dr. (1993) oksidacija ubrzano podiže odnose $\alpha_{\text{Fe}^{3+}}/\alpha_{\text{Al}^{3+}}$ fluida, a upravo taj proces odgovara kristalizaciji Fe-bogate andraditske komponente po obodu grosulara. U prilog ovome idu i podaci dobijeni istraživanjem Gaspar i dr. (2008) gde se navodi da andraditski granati ubrano kristališu pri povećanom odnosu voda/stena ulaskom magmatskih rastvora u sistem. Analize andraditskog oboda bogatog gvožđem pokazuju povišen sadržaj volframa. Keppler i Wiyllie (1991) zaključuju da obogaćenje volframom prouzrokuju hidrotermalni fluidi koji vode poreklo od granitskih plutona. Da hidrotermalni rastvori imaju magmatsko poreklo idu u prilog i podaci o magmatskom poreklu sumpora, dokazano analizama izotopa sumpora u sulfidnim mineralima iz skarnova Rudnika Tošović (2000). Takođe, u radu Stojanović i dr. (2018), koloformni oblici pirita, pirotita i siderita mogu se pripisati niskotemperaturnim magmatskim hidrotermama bogatim gvožđem.

TERMOBAROMETRIJSKO MODELOVANJE SKARNA SA RUDNIKA

Odabrani reprezentativni uzorak skarna 269 iz bušotine 330A/18, obrađen je u termobarometrijskom softveru i dobijen je dijagram stabilnosti mineralnih faza u zavisnosti od temperature i pritiska. Iako se kontaktni metamorfizam generalno odigrava u plitkim nivoima Zemljine kore gde je pritisak praktično zanemarljiv, za potrebe modelovanja zadat je pritisak do 1 kbara. Fazni dijagram je modelovan koristeći komponente dobijene hemijskim analizama. Korišćen je model MnNCKFASH za odabrani uzorak 269, pri čemu su prikazane glavne reakcije tokom P-T evolucije skarna.

Generalno, polje stabilnosti je usko i prati skoro linearno rast pritiska i temperature. Na dijagramu je polje stabilnosti obeleženo sivom bojom i brojem 12 (slika 53,A). Prilikom projektovanja izopleta sadržaja određenih elemenata iz analiziranih minerala (granat, piroksen i epidot), koji su plotovani na dijagram, mogu se videti delovi na kojima su ti minerali stabilni. Granat i piroksen su stabilni na višim temperaturama na desnoj strani dijagrama, dok epidot i hlorit „ulaze“ u sistem na nižim temperaturama i pseudosekcije koje razdvajaju prikazane su na slici univarijantnom krivom (slika 53,A). Polja stabilnosti u kojima egzistiraju epidot i hlorit označavaju početak druge faze t.j. retrogradne reakcije i opadanje temperature u sistemu, da bi na najnižim temperaturama egzistirao samo hlorit (polje 16 na slici 53, A i B).



Slika 53: (A) Termobarometrijski dijagram izabranog uzorka skarna 269 sa nanetim izopletama. Polje stabilnosti mineralnih faza prikazano je brojem 12. (B) Izograde epidota i hlorita, mineralnih faza koje „ulaze“ u sastav skarnova sa padom temperature. Legenda skraćena: Hlo (hlorit), Ilm (ilmenit), prl (pirofilit), q (kvarc), ru (rutil), cc (kalцит), dol (dolomit), ank (ankerit), grt (granat), sfe (sfen), kpx (piroksen), ep (epidot) i vrk (vairakit).

Termobarometrijski proračuni urađeni Perple_X softverom (Connolly, 2002) ukazuju na dve faze obrazovanja skarnova na Rudniku. Prva faza progradnog metamorfizma, prema polju stabilnosti sa asocijacijom minerala u kojoj su granat i piroksen glavni petrogeni minerali, odgovara procesima kontaktnog metamorfizma na višim temperaturama. Pseudosekcija za uzorak 269 ima veliki opseg stabilnosti (piroksen, granat, epidot i hlorit) u zavisnosti od pritiska od 0 do maksimalno 800 bara. Takođe, data mineralna asocijacija ima šire polje stabilnosti u zavisnosti od temperature i kreće se oko $430 \pm 30^\circ \text{C}$ (vidi sliku 53, A i B).

Put progradnog ka retrogradnom metamorfizmu ilustrativno je prikazan crvenom strelicom na dijagramu na slici 54. Tamno zelenom bojom su obeležena polja stabilnosti sa granatom i piroksenom, ružičasto je polje gde se epidot pridružuje sistemu, dok se u polju sa smeđom bojom pojavljuje i hlorit.

Reakcije iz dobijenog faznog dijagrama mogu se pratiti i u bušotini sa pojavom ili nestankom određenih minerala. Podaci dobijeni pseudosekcijama ukazuju da sa smanjenjem temperature iz polja stabilnosti prvi nestaje piroksen. Sa daljim padom temperature gubi se i granat, pa zaostaju samo polja stabilnosti sa epidotom i hloritom. Identična slika se može ispratiti u bušotini, gde se naviše ka plićim nivoima od dubine 181 metar (izabrani uzorak 269) gube granat i piroksen. Idući od pozicije ovog uzorka skarna ka dubljim nivoima, gube se hlorit i epidot, a ostaju samo granat i piroksen.

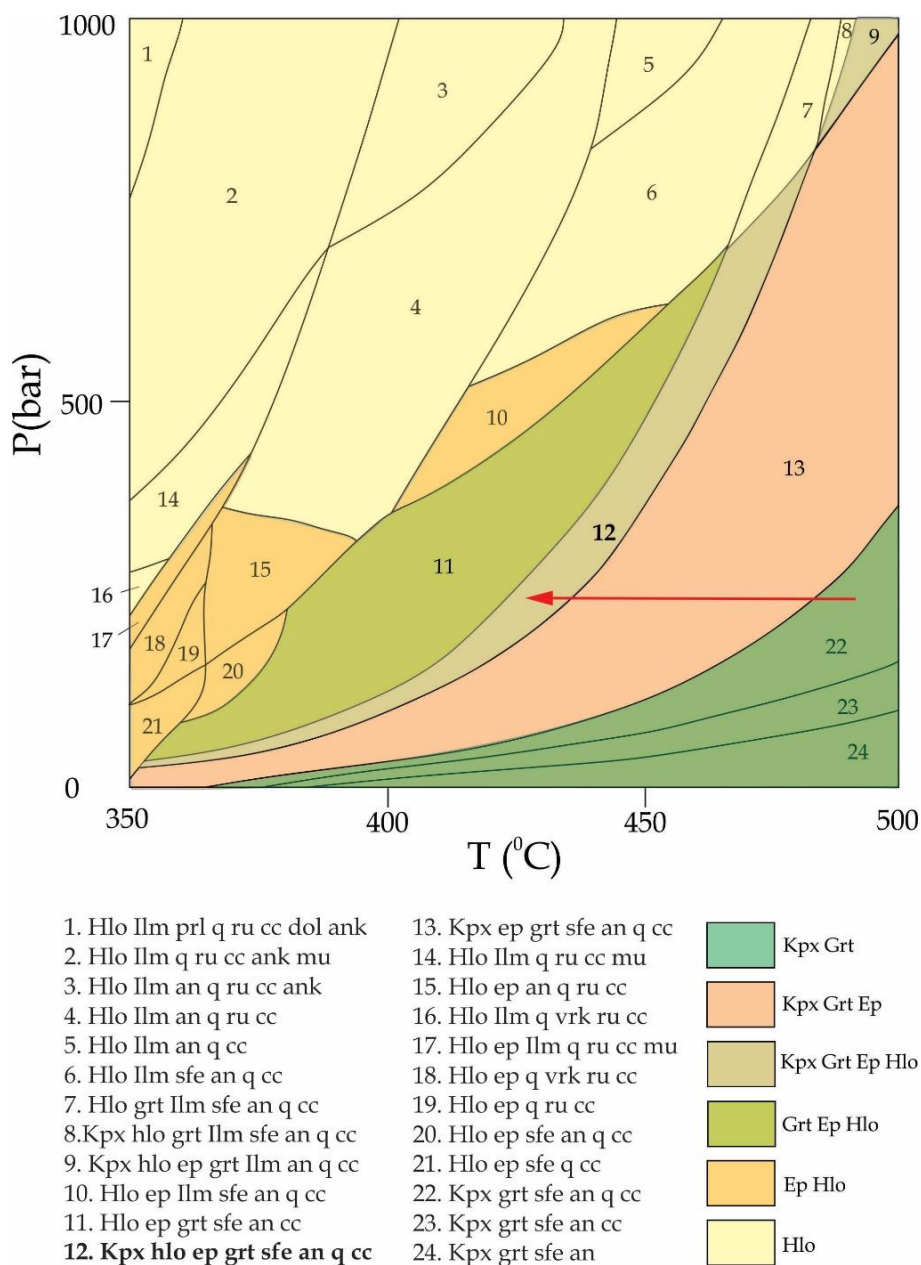
Sintezom svih dobijenih podataka (kartiranjem bušotina, hemizam minerala, prisutne mineralne/kristalne faze u steni, laserska ablacija na zrnima granata, ispitivanje temperatura homogenizacije fluidnih inkluzija, termodinamički dijagrami...) moguće je rekonstruisati sled događaja procesa kontaktnog metamorfizma sedimentnih stena Rudnika. Prvu fazu bi obuhvatalo utiskivanje vulkanita u subvulkanskom nivou, dok drugu fazu obeležavaju naknadne reakcije sa pojavom hidrotermalnih fluida.

Detaljnim kartiranjem jezgara bušotina utvrđeno je da kredne sedimentne stene preseca veliki broj vulkanskih stena u vidu dajkova različitih dimenzija. Prema Bowen-u (1915), temperature kvarclatitskih magmi mogu dostići i 870°C . Utiskivanjem takvih dajkova u kredne stene, vrši se prenos toplote koji bi zbog velike gustine dajkova bio srazmeran jednom manjem plutonskom telu i na taj način zagrevao kredne stene u svojoj okolini.

Druga faza kontaktnog metamorfizma Rudnika obuhvata uključivanje hidrotermalnih rastvora u sistem. Duž pukotina koje su dajkovi otvorili pri utiskivanju, kreću da cirkulišu zagrejani hidrotermalni fluidi čije je poreklo u samom početku bilo najverovatnije isključivo magmatsko (juvenilno). U početku su dostizali značajne temperature $>560^\circ \text{C}$, ali sa brzim opadanjem temperature formiraju se orudnjeni delovi na pogodnim mestima. Hlađenje hidrotermalnih fluida podstiče retrogradne reakcije u skarnovima koje se manifestuju u petrološkim preparatima u vidu alteracije granata epidotom i hloritom, ali i formiranjem vezuvijana kao jednog od minerala iz hidrotermalne faze.

Prilikom izrade teze je pokušaj datiranja metamorfizma pomoću granata U-Pb metodom bio neuspešan, zbog visoke koncentracije Pb prilikom merenja. Ovo se može objasniti činjenicom da je Rudnik ležište olova i cinka, tako da je kontaminacija olovom očekivana. Ovaj podatak, da je dobijen, omogućio bi utvrđivanje veze metamorfizma i vulkanizma na ovom prostoru, a ukazao bi i za koju fazu vulkanizma na ovom prostoru je

vezan kontaktni metamorfizam. Naime, po Cvetković i dr. (2016) na Rudniku se vulkanizam odvijao u dve faze, starijoj preko 30 miliona godina i mlađoj, od 23 miliona godina. Mlađu vulkansku fazu potvrđuje i Kostić i dr. (2021). Starost metamorfizma bi dala odgovor na pitanje: Da li je bilo starijih kontaktno metamorfnih procesa na prostoru Rudnika?



Slika 54: Put metamorfnih procesa od progradnih ka retrogradnim obeležen crvenom strelicom

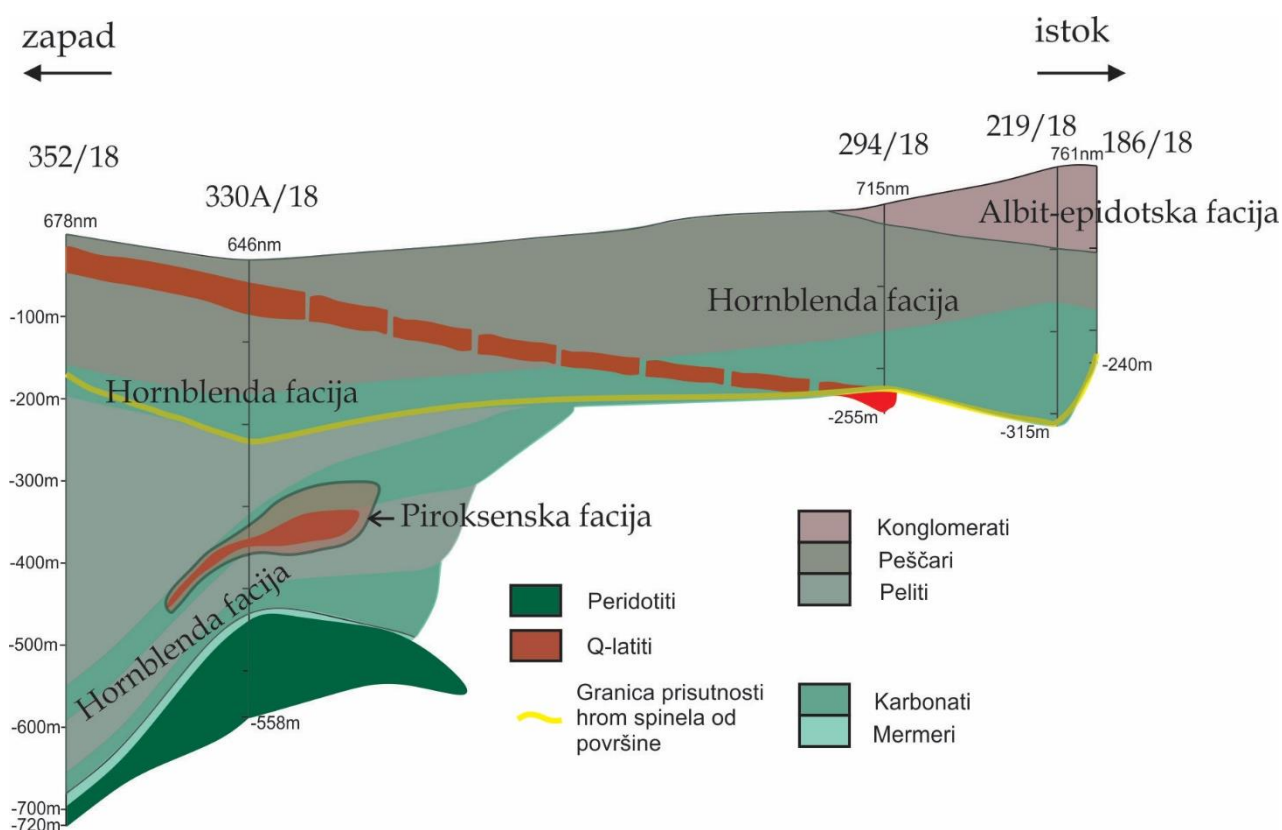
Zanimljivo je napomenuti da u plićim delovima u kojima su zastupljeni metaklastiti (metapeščari i metakonglomerati) preseca veći broj vulkanskih dajkova nije bilo značajnijih kontaktno metamorfnih promena. Naime, osim blage prekrystalizacije matriksa i pojave „zemljastog“ epidota, drugi znaci kontaktnog metamorfizma nisu zapaženi. Po podacima dobijenim prilikom izrade ove teze, klastiti koji se nalaze u plićim nivoima bušotina, a koji vode poreklo od mešavine klastita i ultrabazita (makar jedan njihov deo), ne pokazuju

značajnije termo-kontaktne izmene, jer temperatura dajkova u subvulkanskim uslovima nije bila dovoljna za neku intenzivniju i značajniju termokontaktnu reakciju.

Ovo se, međutim, ne može reći za stene koje su bogatije karbonatnom komponentom i od kojih su obrazovani skarnovi ili za delove bogatije fino-zrnim klastitima, od kojih su na visokim temperaturama formirani hornfelsi iz hornblenda facije, odnosno hornfelsi iz piroksenske facije na samom kontaktu sa vulkanskim telima. Protolit hornfelsa je alevrolitskog porekla, gde su fino-zrni klastiti dospevali u sistem erodovanjem stenskog materijala iz okruženja. Na ovo su ukazali cirkoni koji su datirani U-Pb metodom i koji su poreklom iz stena paleozojske starosti.

MODEL PROSTIRANJA FACIJA DUŽ PROFILA ISPITIVANIH BUŠOTINA

Sintezom svih podataka dobijenih različitim metodama dobijen je mogući model profila pravca istok-zapad u kome su prisutne piroksenska, hornblenda i albit-epidotska hornfels facija. Detaljni prikaz prostiranja facija dat je na slici 55.



Slika 55: Model prostiranja metamornih facija u profilu ispitivanih bušotina Rudnika

ZAKLJUČAK

Kontaktne metamorfne promene sedimentnih stena Rudnika ispitivane su na profilu relativno male dužine, oko 1230 metara, na južnim padinama planine Rudnik. Protoliti kontaktne metamorfne stena Rudnika čine dve posebne litološke jedinice, podeljene na šest različitih članova. Prvu litološku jedinicu čine četiri člana: konglomerati, peščari, alevroliti i peskoviti karbonati, dok se druga litološka jedinica sastoji od dva člana, karbonatnog i klastičnog koji se međusobno ritmično smenjuju.

U seriji kontaktne metamorfne stena Rudnika izdvojene su tri grupe: 1) metaklastiti; 2) hornfelsi i 3) skarnovi. U okviru metaklastita definisani su metapeščari i metakonglomerati. Njihov heterogeni sastav, prisustvo hrom spinela i povišen sadržaj hroma i nikla u hemijskim analizama ukazuje da poreklo dela materijala koji izgrađuje metaklastite Rudnika potiče sa erodovanih peridotitskih stena. Diskriminacionim dijagramom Mg/Cr broja, utvrđeno je da spineli vode poreklo od peridotita harzburgitskog sastava. Najverovatniji potencijalni izvor erodovanog materijala su peridotiti koji se pojavljuju istočno od Rudnika, u okolini mesta Stragari.

Hornfelsi su veoma rasprostranjeni u ispitivanom profilu, naročito u dubljim delovima bušotina 352/18 i 330A/18. Najčešće se smenjuju sa skarnovima, a njihovo poreklo je određeno kao klastično. Radiometrijskim datiranjem na cirkonima izdvojenim u hornfels jedinici utvrđeno je da klastični materijal koji ih izgrađuje potiče od stena paleozojske starosti (280-550 miliona godina). Najbliže stene paleozojske starosti u okolini ispitivanog područja, danas uglavnom prekrivene miocenskim sedimentnim stenama, prostiru se istočno od Rudnika što dodatno potvrđuje iznetu pretpostavku da je materijal u sedimentacioni basen dospevao iz tog pravca.

Skarnovi se u ispitivanim bušotinama pojavljuju od 170-og metra i njihovo pojavljivanje prestaje sa 360-im metrom. Podela skarnova izvršena je prema dominantnim mineralima na epidotske, granat-vezuvijanske i granat-piroksenske skarnove.

Epidotski skarnovi se pojavljuju u oreolu širine do 30 metara. Izuzetak je bušotina 219/18 u kojoj oreol ovih skarnova dostiže širinu od 150 metara. Granat-vezuvijanski skarnovi markiraju zonu u kojoj su hidrotermalni fluidi imali najveći uticaj. Pojava vezuvijana u skarnovima Rudnika je veoma značajna informacija, jer ranijim ispitivanjima ovaj mineral nije registrovan na ovom prostoru. Granat-piroksenski skarnovi obeležavaju zonu sa najintenzivnijim kontaktne metamorfnim promenama. Anizotropni granati idiomorfne oblike pripadaju grupi grosular-andradita. Njihovo pojavljivanje je povezano sa povišenim sadržajem karbonatne komponente u protolitima, pa predstavlja idealnu sredinu za obaranje metaličnih minerala (galenit, sfalerit, pirotin, pirit...).

Radi boljeg sagledavanja intenziteta kontaktnog metamorfizma, sve kontaktne metamorfne stene Rudnika klasifikovane su u tri facije prema Miyashiro (1973): 1) Albit-epidotska facija; 2) Hornblenda facija i 3) Piroksenska facija.

Albit-epidotska facija je neznatno rasprostranjena i zahvata samo deo metaklastita koji se nalaze najbliže površini terena u bušotinama 219/18 i 186/18. Stene iz ove facije izgradjuju sledeći minerali: kvarc, muskovit, hlorit, albit, epidot, coisit, kalcit, aktinolit/tremolit.

Hornblenda facija je najrasprostranjenija na ispitivanom prostoru na Rudniku. Kontaktno metamorfne stene iz ove facije otkrivene su u svim ispitivanim bušotinama. Mineralni sastav ove facije čine: kvarc, kalijski feldspat, plagioklas, epidot, coisit, hlorit, kalcit, aktinolit i hornblenda. U plićim delovima ispitivanih bušotina stene ove facije se prožimaju sa stenama albit-epidotske facije, dok u dubljim delovima u blizini kontakta sa vulkanitima iščezavaju na račun piroksenske facije. Debljina piroksenske facije nije velika i iznosi samo par metara, a minerali zastupljeni u njoj su: kvarc, kalijski feldspat, plagioklas, hornblenda, piroksen, granat, epidot i kalcit.

Ispitivanja epidota i amfibola mikrosondom ukazala su na promene hemizma minerala sa dubinom i intenzitetom/stepenom metamorfizma. Promene u hemizmu epidota ogledaju se u povećanju zbira katjona aluminijuma i gvožđa, kao i povećanju katjona kalcijuma. Na dijagramu prikazanom na slici 35 jasno se izdvajaju dve grupe epidota, epidot iz metaklastita i epidot formiran u skarnovima i hornfelsima.

Analiza amfibola je takođe omogućila izdvajanje dve grupe. Amfiboli iz hornfelsa pokazuju povećan zbir katjona gvožđa, magnezijuma i aluminijuma u odnosu na kalcijum, dok amfiboli iz metaklastita pokazuju veći sadržaj kalcijuma u odnosu na zbir katjona gvožđa, magnezijuma i aluminijuma.

Analize mikrosondom pokazale su da su granati Rudnika grosularsko-andraditskog sastava. Optičkom mikroskopijom i na BSE fotografijama zapažena je zonarnost, gde u centru zrna dominira grosularska, a na obodu andraditska komponenta. Kostić i dr. (2021) zaključuju da je za formiranje zonarnih granata odgovorna hidrotermalna faza.

Temperature homogenizacije fluidnih inkluzija ukazuju da je temperatura hidrotermalnih fluida u početku bila izuzetno visoka, $>560^{\circ}\text{C}$, i da su u toj fazi formirani granati i pirokseni. Kako je temperatura hidrotermalnih fluida opadala, formirali su se ostali minerali, epidoti na 320°C . Kvarc je već bio oformljen na temperaturi od 400°C gde su prve fluidne inkluzije bile zarobljene. Poslednja faza kristalizacije kvarca trajala je do temperatura od 228°C , koje su i najniže temperature homogenizacije fluidnih inkluzija.

Termobarometrijskim modelovanjem skarna iz uzorka 269, dobijeno je da je polje stabilnosti (piroksen, granat, epidot i hlorit) na niskim pritiscima ($<1\text{ kbar}$) i temperaturama od $430\pm 30^{\circ}\text{C}$. Temperature potrebne za formiranje ovih minerala se veoma razlikuju, pa se iz termobarometrijskog dijagrama zaključuje da je uzorak skarna 269 podlegao retrogradnim promenama sa padom temperature u sistemu. Progradni metamorfizam definiše polje stabilnosti sa granatom i piroksenom na višim temperaturama, najverovatnije vezano za utiskivanje vulkanita u sedimente. Ovaj proces potpomaže otvaranje puteva cirkulacije hidrotermalnih fluida, pa progradni metamorfizam postepeno prelazi u retrogradni metamorfizam gde se piroksenu i granatu pridružuju epidot i hlorit.

Radiometrijskim datiranjem cirkona iz vulkanita dobijena je starost vulkanizma od 23.9 miliona godina, što se podudara sa ranijim istraživanjem Cvetković i dr. (2016) i Kostić i dr. (2021), i što ovaj vulkanizam označava kao mlađu vulkansku fazu Rudnika. Dobijanje starosti metamorfizma radiometrijskom U-Pb metodom na granatima bilo je neuspešno, nezavisno od velikog broja uzoraka i lokacije u bušotini uzetog uzorka, zbog kontaminacije olovom. Ovaj podatak bi bio od izuzetne koristi za utvrđivanje veze vulkanizma i kontaktnog metamorfizma na Rudniku. Datiranje starosti kontaktnog metamorfizma na granatima ili drugim metamorfnim mineralima metodom neodimijum-stroncijum, kako bi se izbegla kontaminacija olovom, neophodna je smernica i predlog za dalji rad.

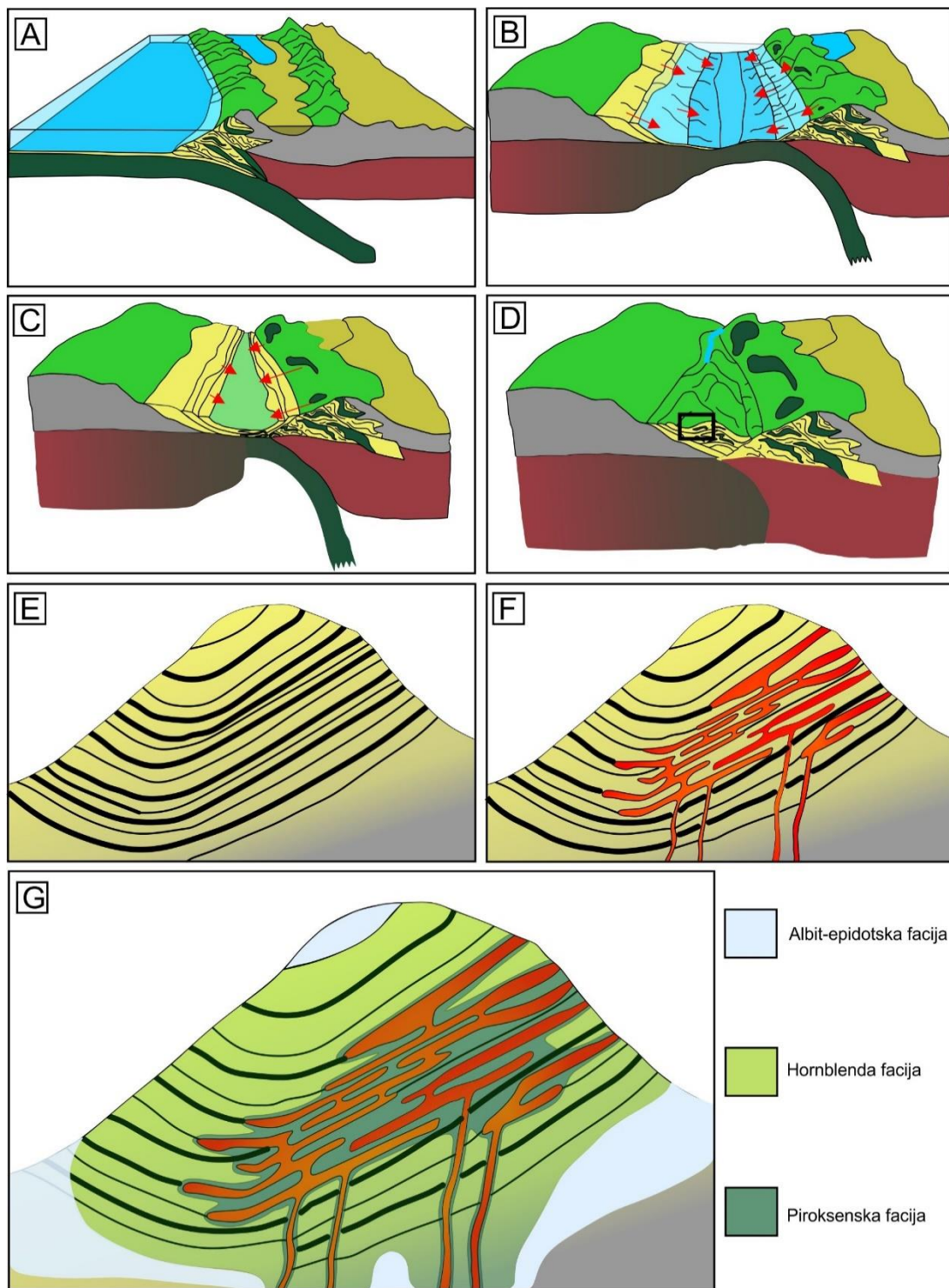
PREDLOŽENI MODEL KONTAKTNOG METAMORFIZMA U GEODINAMIČKOJ SREDINI

Prema dosadašnjoj naučnoj literaturi i podacima dobijenim istraživanjem tokom rada na disertaciji, predložen je model kontaktnog metamorfizma, koncipiran samo za prostor Rudnika (slika 60). Po predloženom modelu, po prestanku subdukcije, u periodu krede talože se karbonatni sedimenti, dok finozrni klastiti dospevaju sa erodovanih paleozojskih terena u basen različitim sedimentacionim mehanizmima. Deo akrecione prizme i obdukovanih delova okeanske kore izložen je atmosferskim uslovima, pa započinje erozioni ciklus. Najveći deo tog materijala izgrađuje klastite koji su taloženi u gornjoj kredi. Završetkom sedimentacionog ciklusa, a početkom kenozoika, prostor Rudnika postaje tektonski aktivan i ubran. Tokom miocena, vulkanska aktivnost na ovom prostoru bila je učestalija. Kako je pojava kontaktno metamorfni stena Rudnika atipična, jer izvor toplote u vidu magmatskog plutona nije pronađen nijednim istražnim bušenjem, potrebno je razmišljati šire od načina koji je predstavljen školskim primerima kontaktnog metamorfizma.

Ideja da kontaktni metamorfizam može biti iniciran od strane „rojeva“ dajkova koji su se u velikom broju tokom vulkanskog impulsa utisnuli duž slojeva sedimentnih stena potkrepljena je istraživanjima (Pons i dr. 2006; Jackson i dr. 2018). Gusta i brojna vulkanska tela mogla su imati dovoljno termičkog kapaciteta i delovati kao jedinstveno magmatsko telo, koje je kao takvo u stanju da izvrši kontaktno metamorfne promene okolnih stena. U ovom istraživanju, navedeni autori objašnjavaju da je formiranje magmatskih plutona u početnoj fazi rezultat sjedinjavanja više magmatskih tela utisnutih u okolne stene u vidu dajkova, silova, lakolita, lopolita itd. Postojanje velikog broja subparalelnih dajkova i silova različitih dimenzija na Rudniku pokazuje sličnosti sa predloženim mehanizmom formiranja plutona.

Odsustvo Rudničkog plutonskog tela u subvulkanskom nivou bilo da je njegovo razviće zaustavljeno sa prestankom vulkanske aktivnosti u ovoj oblasti, ili usmeravanjem magme u drugim pravcima dalje od Rudnika, definiše vulkanite Rudnika zapravo samo prekinutom fazom formiranja plutonskog magmatskog tela u subvulkanskim nivoima.

Ono što su proboji vulkanskih dajkova pospešili jeste otvaranje puteva hidrotermalnim rastvorima koji pokreću drugi stadijum retrogradnih promena i ono što sa njima dolazi, a to je prinos i obaranje korisnih metala.



Slika 60: Predlog modela kontaktnog metamorfizma u široj geodinamičkoj retrospektivi. (A) Formiranje akrecione prizme sa otkinutim delovima okeanske kore tokom subdukcije u mezozoiku; (B) Zatvaranje okeanskog prostora i depozicija karbonatnih i klastičnih sedimentih stena; (C) Formiranje klastita od erodovanog peridotitskog materijala; (D) Zatvoren okeanski prostor, pretpostavljena pozicija Rudnika obeležena je crnim kvadratom; (E) Uprošćeni crtež profila planine Rudnik sa prikazanim ubranim sedimentnim stenama u obliku sinforme; (F) Utisnuti vulkaniti po predisponiranim pravcima slojevitosti; (G) Formirani oreoli kontaktnog metamorfizma na Rudniku

LITERATURA

- Anđelković, M. 1955: Prilog poznavanju geološkog sastava i tektonskog sklopa terena između Ljiga, Ugrinovca i G. Branetića (Šumadija). *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, 23, p. 27-44
- Anđelković, M. 1978: *Stratigrafija Jugoslavije - Paleozoik i mezozoik*. Univerzitet u Beogradu, pp. 1017
- Apted, M. J., Liou, J. G. 1983: Phase relations among greenschist, epidote-amphibolite, and amphibolite in a basalt system. *American Journal of Seismology*. 283-A, p. 328-354
- Armbruster, T., Bonazzi, P., Akasaka, M., Bermanec, V., Chopin, C., Gieré, R., Heuss-Assbichler, S., Liebscher, A., Menchetti, S., Pan, Y. 2006: Recommended nomenclature of epidote-group minerals. *Eur. J. Mineral.* 18, p. 551-567
- Bau, M. 1991: Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium. *Chemical Geology* 93, p. 219-230
- Blečić, N. 1974: *Tečno-gasne inkluzije i njihova primena pri istraživanju pojedinih jugoslovenskih ležišta mineralnih sirovina*. Magistarska teza. Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
- Bodnar, R. J. 1993: Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57, p. 683-684
- Bowen, N. 1915: The crystallization of haplobasaltic, haplodioritic, and related magmas. *American Journal of Science* 40, p. 161-185
- Bowers, J. R., Kerrick, D. M., Furlong, K. P. 1990: Conduction model for the thermal evolution of the Cupsuptic aureole, Maine. *American Journal of Science*, 290 (6), p. 644-665
- Brković, T., Radovanović, Z., Pavlović, Z., Dimitrijević, M. 1978: *Tumač za list Kragujevac (OGK SFRJ 1:100000)*. Savezni Geološki Zavod SFRJ, Beograd, pp. 82
- Clark, L. A. 1960: The Fe-As-S system: Phase relations and applications. *Economic Geology*, 55. pp.1345-1381
- Connolly, JAD., Petrini, K. 2002: An automated strategy for calculation of phase diagram sections and retrieval of rock properties as a function of physical conditions. *Journal of Metamorphic Petrology* 20, p.697-708
- Cvetković, V., Šarić, K., Péskay, Z., Gerdes, A. 2016: The Rudnik Mts. volcano-intrusive complex (central Serbia): An example of how magmatism controls metallogeny. *Geologia Croatica*, p.89-99

Đoković, I., Đajić, Z., Vasić, N., Kondžulović, R. 2011: Strukturnogeološka studija jugozapadnog dela rudnog tela rudnika „Rudnik“ i izrada odgovarajuće strukturnogeološke karte. Fond stručne dokumentacije Rudnik.

Einaudi, M.T., Meinert L.D. Newbery R.J. 1981: Skarn deposits: Economic geology, 75th Anniversary Volume, p. 317-391

Filipović, I., Pavlović, Z., Marković, B., Rodin, V., Marković, O., Gagić, N., Atin, B., Milićević, M. 1971: Tumač za list Gornji Milanovac (OGK SFRJ 1:100000). Savezni Geološki Zavod SFRJ, Beograd, pp.69

Franz, G.; Liebscher, A. 2004: Physical and Chemical Properties of the Epidote Minerals: An introduction. Rev. Mineral. Geochem. 56, p.1-81

Gaspar, M., Knaack, C., Meinert, D.L., Moretti R. 2008: REE in skarn systems: A LA-ICP-MS study of garnets from the Crown Jewel gold deposit. Geochimica et Cosmochimica Acta 72, p. 185-205

Goldschmidt, V. M. 1911: Die Kontaktmetamorphose im Kristianagebiet. Oslo Vidensk. Skr., I., Mat.-Naturv. Kl., no.1, p. 483

Haas, J. L. 1976: Physical properties of the coexisting phases and thermochemical properties of the H₂O component in boiling NaCl solutions, US Geological Survey Bulletin, 1421-A, p.1-71

Hammerli, J., Rubenach, M. 2018: The role of halogens during regional and contact metamorphism. The Role of Halogens in Terrestrial and Extraterrestrial Geochemical Processes. Springer. p. 649-712

Hey, M. H. 1954: A new review of chlorites. Mineral. Mag. 30, p.277-292

Hickmott, D.D., Spear, F.S. 1992: Major and trace-element zoning in metamorphic garnets from calcareous pelites in the NW Shelburne Falls quadrangle, Massachusetts: garnet growth histories in retrograded rocks. Journal of Petrology 33, p.965-1005

Inui, M., Toriumi, M. 2004: A Theoretical Study on the Formation of Growth Zoning in Garnet Consuming Chlorite. Journal of Petrology 45 (7) p. 1369-1392

Ishii, T., Robinson, P. T., Maekawa, H., Fiske, R. 1992: Petrological studies of peridotites from diapiric serpentinite seamounts in the Izu-Ogasawara-Mariana Forearc, Leg 125. Proc. Ocean Drill Program Science Results, 125, p. 445-485

Jackson, M., Blundy, J., Sparks, R. 2018: Chemical differentiation, cold storage and remobilization of magma in the Earth's crust. Nature 564. p. 405-409

Jamtveit, B., Wogelius, R., Fraser, D. 1993: Zonation patterns of skarn garnets: Records of hydrothermal system evolution. Geology 21, p.113-116

- Jovanović, M. 1995: Petrološke i geoheimijske karakteristike bazaltoidnih stena Rudnika i Kopaonika. Magistarska teza, Rudarsko-geološki fakultet, pp.112
- Jovanović, M., Jović, V. 1997: Petrološke i petroheimijske karakteristike tercijarnih bazalta Rudnika (Srbija). Geološki zavod Univerziteta u Beogradu, 61, 1, p.369-388
- Karamata, S., Krstić, B. 1996: Terranes of Serbia and neighboring areas. In Knežević-Đorđević V. & Krstić B. (Eds.) Terranes of Serbia. Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade, p. 25-40
- Karamata, S. 2006: The geological development of the Balkan Peninsula related to the approach, collision and compression of Gondwana and Eurasian units. In Robertson A.H.F. & Mountrakis D (Eds.) Tectonic Development of the Eastern Mediterranean Region. Geological Society London, Special Publications, 260, p. 155-178
- Keppler, H., Wyllie, P.J. 1991: Partitioning of Cu, Sn, Mo, W, U and Th between melt and aqueous fluid in the systems haplogranite-H₂O-HCl and haplogranite-H₂O-HF. Contributions to Mineralogy and Petrology 109, p. 139-150
- Kostić, B., Srećković-Batočanin, D., Filipov, P., Tančić, P., Sokol, K. 2021: Anisotropic grossular-andradite garnets: Evidence of two stage skarn evolution from Rudnik, Central Serbia. Geologica Carpathica 72,1, p.17-25
- Kretz, R. 1983: Symbols of rock-forming minerals. American Mineralogist, 68, p.277-279
- Le Bas, J., Lemaître, W., Streckeisen, A., Zanettin, B. 1986: A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkalisilica diagram. Journal of Petrology, 27, p. 45-750
- Leake, B. E. 1978: Nomenclature of amphiboles. Mineral. Mag. 42, p. 533-563
- Locock, J. 2007: An Excel Spreadsheet to Recast Analyses of Garnet into Endmember Components, and A Synopsis of the Crystal Chemistry of Natural Silicate Garnets. Computers & Geosciences 34. p. 1769-1780
- Marković, O., Anđelković, M. 1953: Geološki sastav i tektonika šire okoline sela Osečenice, Brežđa i Struganika (zapadna Srbija). Zbornik radova SANU, 33, Geološki institut, 5, p.111-150
- McDonough, W.F., Sun S. 1995: „The composition of the Earth”. Chemical Geology 120, p.223-253
- Meinert, D. 1992. Skarns and skarn deposits. Geoscience Canada, 19/4, p.145-162
- Mihajlović, N. 1982: Geološko-petrološka i geoheimijska ispitivanja tercijarnih magmata područja Avala-Kosmaj za 1983 god. Geoinstitut, Beograd
- Mikinčić, V. 1935: Izveštaj o terenskom radu na sekciji Valjevo. Izveštaj o radu Geološkog instituta Kraljevine Jugoslavije za 1934, p.28-29

Mikinčić, V. 1936: Izveštaj o terenskom radu na sekciji Valjevo. Izveštaj o radu Geološkog instituta Kraljevine Jugoslavije za 1935, p.43-45.

Milić, R. 1988: Projekti i aneksi projekata osnovnih geoloških istraživanja (sa strukturno-istražnim bušenjem) za svaku godinu. Fond stručne dokumentacije Rudnik

Miyashiro, A. 1973: Metamorphism and Metamorphic Belts. Springer. p. 492

Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A. K., Ginzburg, I. V., Ross, M., Seifert, F. A., Zussman, J. 1988: Nomenclature of pyroxenes. Am. Mineral. 73, p.1123-1133

Norton, D. 1982: Fluid and heat transport phenomena typical of copper-bearing pluton environments. In Advances in the Geology of the Porphyry Copper Deposits, University of Arizona, p.59-72.

Parkinson, I. J., Pearce, J. A. 1998: Peridotites from the Izu - Bonin - Mariana Forearc (ODP Leg 125): Evidence for Mantle Melting and Melt - Mantle Interaction in a Supra-Subduction Zone Setting. J. Petrol. 39, p.1577-1618

Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., Woodhead, J., & Hergt, J. 2011: Lolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 26(12), p. 2508-2518

Pejatović, S. 1991: Metalogenetska prognozna karta rudnog polja Rudnik. Geoinstitut, Beograd

Pettijohn, F. J., Potter, P. E. and Siever, R. 1972: Sand and sandstone. Springer-Verlag, New York-Heidelberg-Berlin, pp.618

Popović, R. 2008: Pripreme za izradu programa geoloških istraživanja u rudnom polju „Rudnika“ u 2008. god. FSD Rudnika „Rudnik“

Pons, J., Barbey, P., Nachit, H., Burg, J. 2006: Development of igneous layering during growth of pluton: The Tarouate laccolith (Marocco). Tectonophysics 413 (3). p.271-286

Prelević, D., Cvetković, V., Jovanović, M. 2000: The composite dome of Beli Kamen (Mt. Rudnik, Central Serbia - the example of a specific interaction of lamprophyric and granitoid magma. Geology and Metallogeny of the Dinarides and the Vardar zone. The academy of Science and Arts of the Republic of Srpska, Collections and Monographs 1, p.255-267

Reverdatto, V. V. 1973: The facies of contact metamorphism (No. 233). Australian National University, Research School of Social Sciences

Reverdatto, V. V. 1971: Types of contact metamorphism, International Geology Review, 13(8), p.1225-1229

Ristić, P., Nikolić, V. 1959: Kijaniti Rudnika. Naučna knjiga, Beograd. 26, p.219-228

Robertson, A., Karamata, S., Šarić, K. 2009: Overview of ophiolites and related units in the late Palaeozoic- early cenozoic magmatic and tectonic development of Tethys in the northern part of the Balkan region. *Lithos*, 108, p.1-36

Schmid, M., Bernoulli, D., Fugenschuh, B., Matenco, L., Schefer, S., Schuster, R., Tischler, M., Ustaszewski, K. 2008: The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units. *Swiss Journal of Geoscience* 101, p.139-183

Shuang, Y., Zhou, R., Niu, H., Feng, Y., Nguyen, A., Zhao Z., Yang, W., Dong, Q., Zhao, J. 2019: LA-MC-ICP-MS U-Pb dating of low-U garnets reveals multiple episodes of skarn formation in the volcanic-hosted iron mineralization system, Awulale belt, Central Asia. *The geological society of America Bulletin* 132, p.1031-1045

Sigvaldason, G. E. 1963: Epidote and related minerals in two deep geothermal drillholes, Reykjavik and Hveragerdi, Iceland. u.s. Geological Survey Professional Paper 450-E: E77-9

Simić, V. 1935: Prilog tektonici zapadne Srbije. Podrinske planine. *Vesnik Geološkog instituta Kraljevine Jugoslavije*, 4/1, p.211-221

Simić, V. 1940: Izveštaj o geološkom snimanju na listu „Valjevo— 1:50.000. *Godišnjak Geološkog instituta Kraljevine Jugoslavije za 1939. godinu*, Beograd p.80-91

Smith M., Henderson P., Jeffries T., Long J., Williams G. 2003: The rare earth elements and uranium in garnets from the Beinn an Dubhaich aureole, Skye, Scotland, UK: Constraints on processes in a dynamic hydrothermal system. *Journal of petrology*, 45(3), p.457-484

Stojanović J., Radosavljević S., Tošović R., Pačevski A., Radosavljević-Mihajlović A., Kašić V., Vuković N. 2018: A review of the Pb-Zn-Cu-Ag-Bi-W polymetallic ore from the Rudnik orefield, Central Serbia. *Annales Geologiques de la Peninsule Balkanique* 79(1), p.47-69

Stowell, H., Menard, T., Ridgway, C. 1996: Ca-metasomatism and chemical zonation of garnet in contact-metamorphic aureoles, Juneau gold belt, southeastern Alaska. *The Canadian Mineralogist*, Vol. 34, p.1195-1209

Terzić, M., Ristić, P. 1963: Vulkanske stene severozapadnog dela planine Rudnik. *Geološki zavod Univerziteta u Beogradu*, 30, p.109-124

Terzić, M., Milojković, R. 1967: Bazaltoidne stene Rudnika. *Geološki zavod Univerziteta u Beogradu*, 33, p.309-318

Toljić, M., Matenco, L., Stojadinović, U., Willingshofer, E., Ljubović-Obradović, D. 2018: Understanding fossil fore-arc basins: Inferences from the Cretaceous Adria-Europe convergence in the NE Dinarides. *Global and Planetary Change* 171. p.167-184

Tornebohm, A.E. 1875: Geognostisk beskrifning ofver Persbergets Grufvefalt: Sveriges Geologiska Undersokning, P.A. Norstedt and Sons, Stockholm, pp.21

Tošović, R. 2000: Genetsko i geološko-ekonomsko modeliranje polimetalnog ležišta Rudnik. Doktorska disertacija. Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, pp.259

Vuković, M. 1966: Karakteristike mineralizacionih faza kontaktno-metamorfno ležišta Rudnik u Šumadiji. VI savetovanje geologa Jugoslavije, Ohrid, knjiga 2.

Zharikov, V. A. 1970: Skarns (Part I), *International Geology Review*, 12(5), p. 541-559

Žujović, J. 1893: *Geologija Srbije*. I deo, Beograd.

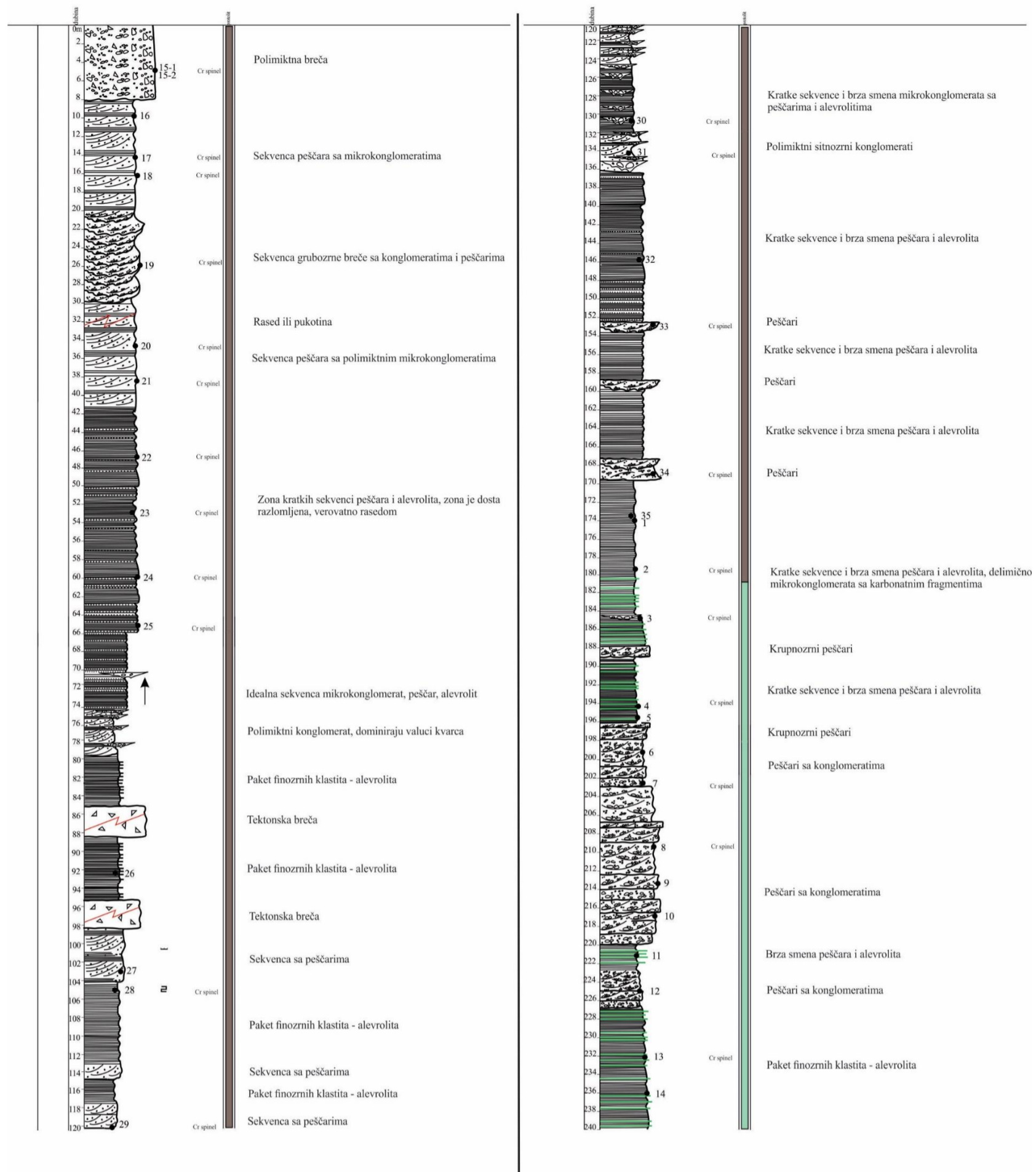
Yan, S., Renjie, Z., Niu, H., Feng, Y., Nguyen, A., Zhao, Z., Yang, W., Dong, Q., Zhao, J. 2020: LA-MC-ICP-MS U-Pb dating of low-U garnets reveals multiple episodes of skarn formation in the volcanic-hosted iron mineralization system, Awulale belt, Central Asia. *GSA bulletin* 132 (5-6): p.1031-1045

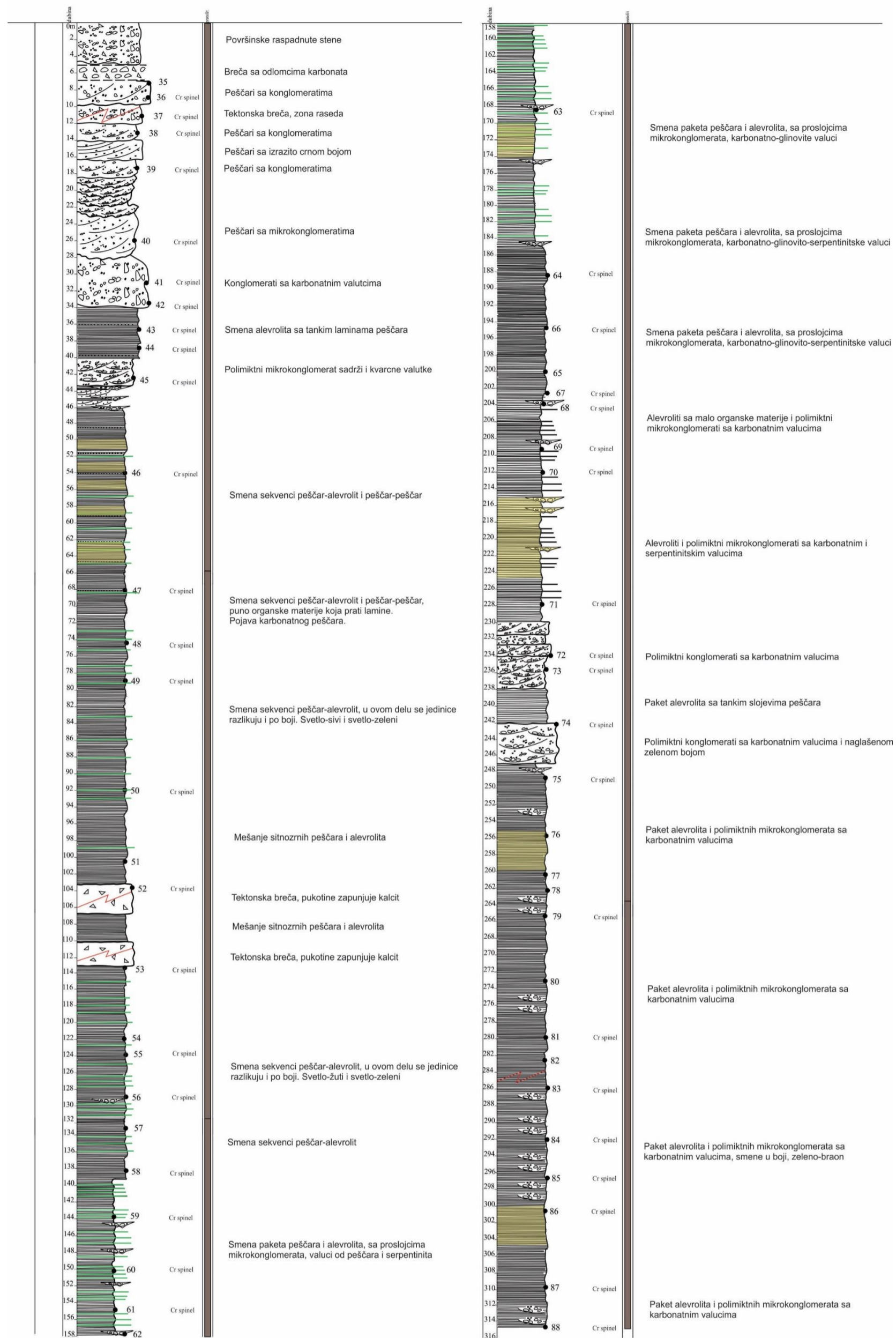
Wallmach T., Hatton C. 1989: Extreme facies of contact metamorphism developed in calc-silicate xenoliths in the eastern Bushveld complex. *Canadian Mineralogist*, Vol. 27, p.509-523

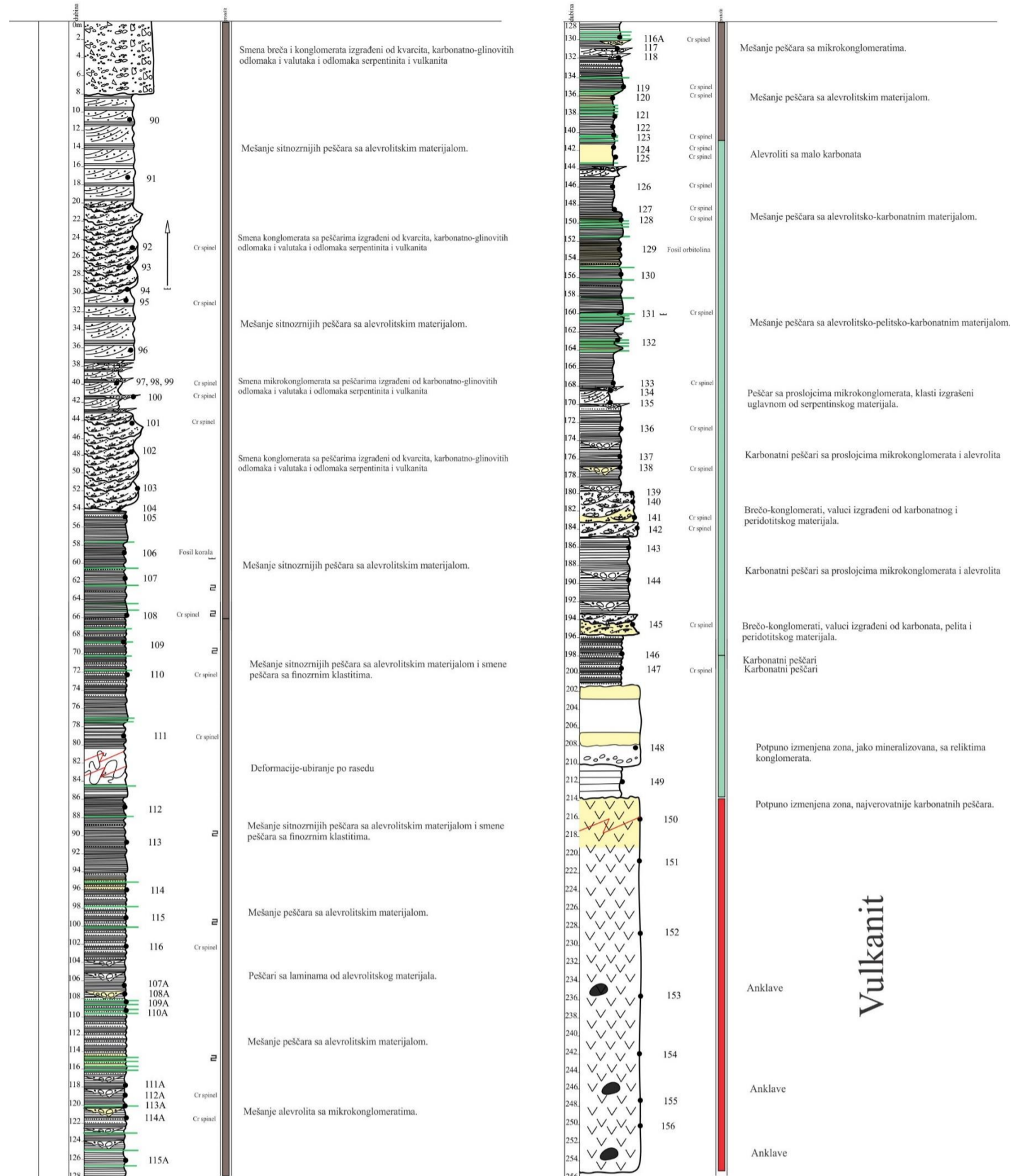
Wafforn, S., Seman, S., Kyle, R.J., Stockli, D., Leys, C., Sonbait, D., Cloos, M. 2018: Andradite garnet U-Pb geochronology of the Big Gossan skarn, Ertsberg-Grasberg mining district, Indonesia. *Economic Geology* 113, p.769-778

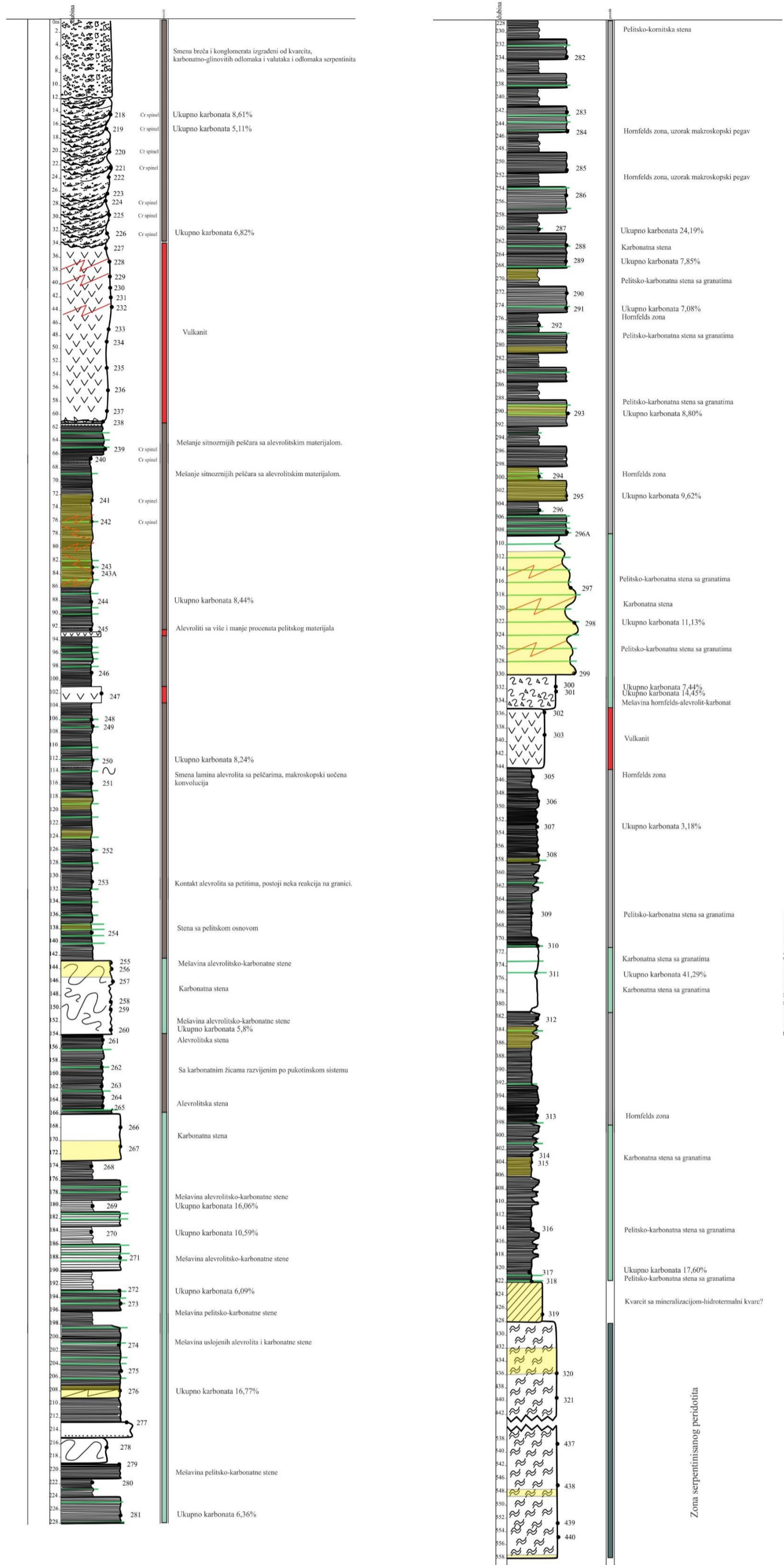
Winter, J. 2010: *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall. pp.702

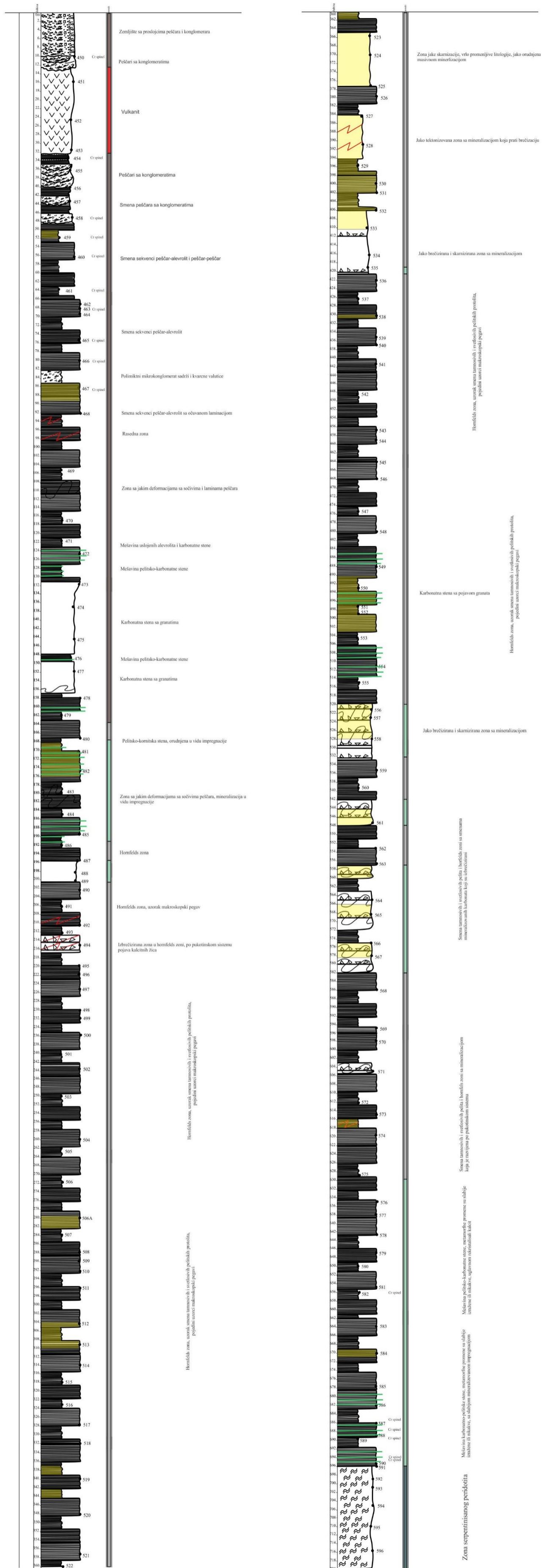
<https://www.381info.com/autokarta-srbije> pristupio dana 21.05.2020.











Bojan (Novica) Kostić

Biografija

Bojan Kostić rođen je 01.06.1984. godine u Leskovcu, osnovnu školu pohađa u Vlasotincu, dok srednju elektrotehničku školu završava u Leskovcu. Osnovne akademske studije na modulu petrologija i geochemija na Rudarsko-geološkom fakultetu upisuje 2011. godine. Završava ih 2014. godine sa prosekom ocena 9.14 (devet, 14/100) i iste godine upisuje master akademske studije na smeru petrologija i geochemija. Uspešno ih završava 2016. godine sa prosečnom ocenom 9.43 (devet, 43/100) i temom master rada „Vulkanološka analiza dela Leckog vulkanskog kompleksa (Brankova kula - Prolom Banja).

Od 2014. godine počinje da radi u laboratoriji za SEM na Rudarsko-geološkom fakultetu. Doktorske akademske studije upisuje 2016. godine na Rudarsko-geološkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu, sa smerom interesovanja za magmatske i metamorfne stene. Na mesto asistenta na Katedri za petrologiju i geochemiju izabran je 2018. godine.

Bio je učesnik i volonter brojnih kurseva, seminara i kongresa iz oblasti geologije u zemlji i inostranstvu. Autor i koautor je 7 naučnih radova koji su objavljeni u stranim časopisima koji se nalaze na SCI listi. Bio je i stipendista Ministarstva nauke, prosvete i tehnološkog razvoja Republike Srbije od 2012. do 2014. godine. Učesnik je na projektu Ministarstva nauke i prosvete (br. 176019) „Petrogeneza i mineralni resursi Karpatobalkanida i njihov značaj u zaštiti životne sredine“. Član je Srpskog geološkog društva od 2011. godine. Oženjen je i otac jednog divnog dečaka.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Костић Бојан

Број индекса Г810/16

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Контактни метаморфизам горњокредних седиментних стена Рудника

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, _____

Прилог 2

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Костић Бојан

Број индекса Г810/16

Студијски програм Геологија

Наслов рада Контактни метаморфизам горњокредних седиментних стена Рудника

Ментор др Даница Срећковић-Батоћанин, редовни професор

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Контактни метаморфизам горњокредних седиментних стена Рудника

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
- ③ Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, _____

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство - некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство - некомерцијално - без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство - без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство - делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.