

V.9 SERIJA MAGNETITA I ILMENITA

Išihara (*Ishihara, 1977*) podelio je granite u dve klase na osnovu sadržaja neprovidnih minerala (u polarizacionom mikroskopu):

- **magnetitsku seriju i**
- **ilmenitsku seriju granita.**

Navedeni minerali kontrolišu fugacitet („opšte” rečeno, količinu kiseonika) magme iz koje kristališu.

Magnetit koji sadrži Fe^{3+} je prisutan u stenama bogatim kiseonikom, i obrnuto, nema ga u redukcionim sredinama. Na taj način on ukazuje i na sastav izvora magme.

Delimičnim stapanjem pelitskih stena stvara se magma iz koje kristališu peraluminozni, ilmenitski graniti. Pošto pelitske stene sadrže grafit, a grafit je redukcion mineral, magnetit neće biti stabilan u ovim magmama. Prednost ove klasifikacione šeme je njena jednostavnost. Graniti se mogu klasifikovati merenjem njihove magnetne osetljivosti. Aeromagnetska istraživanja ukazuju na distribuciju granita sa magnetitom ili granita sa ilmenitom na proučavanom prostoru. Nedostatak je što ova klasifikaciona shema obuhvata čitavu paletu granitoidnih sastava u samo dve kategorije, i time „isuviše” uprošćava hemijsku složenost granita.

Pomenimo da je magnetitska serija granitoida vezana za mineralizaciju sa bakrom, a ilmenitska sa volframom.

V.10 MORFOLOGIJA CIRKONA

Cirkoni obično „prežive” parcijalno stapanje, kada kasnijim procesima (erozija, hemijsko raspadanje, metamorfizam itd.) ostaju stabilni i bez „prekristalizacije”.

Pupin (*Pupin, 1980*) razvio je sistem klasifikacije koji se bazira na proučavanju morfologije cirkona. Ovaj autor prepoznaje sedam različitih klasa granita i klasifikuje ih u okviru uticaja krustalnog (kontinentalne kore) omotača i mešovito izvora. Metoda je previše specijalizovana da bi je većina geologa na terenu „rutinski” koristila.

U tekstu koji sledi biće prikazane klasifikacije granitoida na osnovu modalnog sadržaja pojedinih minerala, njihovog hemijskog sastava, sredine stvaranja itd.

V.11 HEMIJSKA KLASIFIKACIJA GRANITOIDA

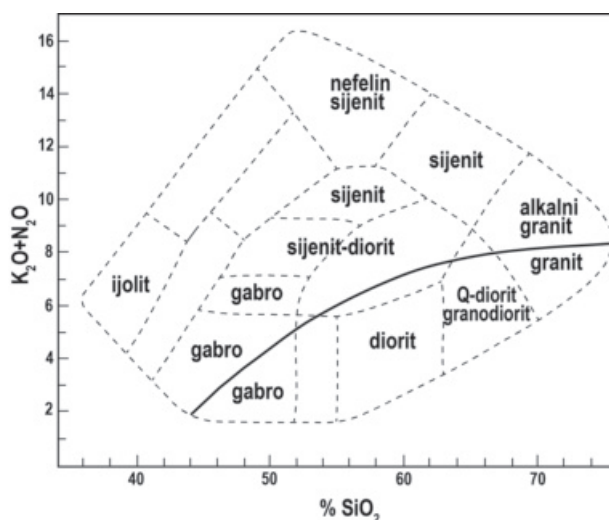
Hemijska raznolikost granitoida uzrokovana je stepenom parcijalnog stapanja, sastavom magme, asimilacijom, procesima diferencijacije, mešanjem magmi, brzinom kretanja, prisustvom fluida, brzinom hlađenja, tektonskom sredinom stvaranja itd.

Hemijski sastav granitoida (granit sensu lato) jeste promenljiv zbog pomenutih procesa. Prva hemijska klasifikacija granitoida korišćena je prema sadržaju silicije (SiO_2) koji se dobija analizom stene. Prikazali smo je u poglavlju Klasifikacija stena. Kisele stene, kojima pripadaju granitoidi, imaju od **52%** do preko **66%** silicije (SiO_2), a to nije samo zbog slobodnog kvarca, već i prisustva feldspata i bojanih minerala koji su alumosilikati. Međutim, za hemijsku klasifikaciju granitoida ne postoji standardni propisani skup makro i mikro elemenata za određivanje uslova nastanka, sredine stvaranja itd. Zbog toga u udžbenicima postoji veliki broj klasifikacija granitoida koje, sa različitim uspehom, daju jednoznačne rezultate.

Savremena tehnologija omogućava izradu i obradu ogromnog broja analitičkih podataka za tačniju, obimniju i bržu klasifikaciju granitoida, što značajno olakšava njihovo proučavanje. Pomenućemo najčešće i po našem mišljenju najbolje odabrane klasifikacije, prilagođene i nastavnom programu studenata Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu. One se baziraju na sadržaju i međusobnom odnosu pojedinih oksida, makro i mikroelemenata i izotopa.

V.11.1 TAS KLASIFIKACIJA ZA INTRUZIVNE STENE

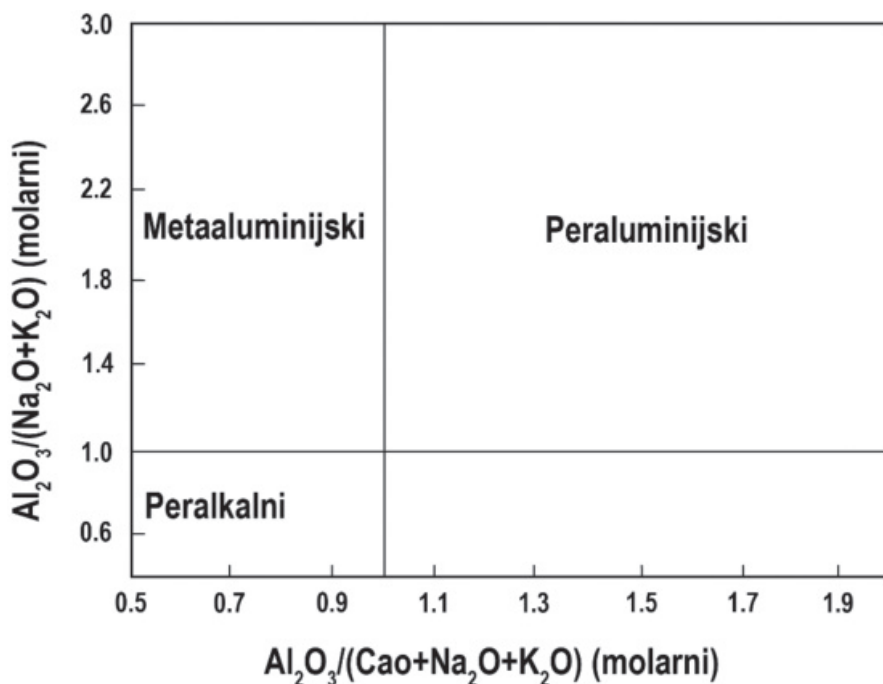
TAS klasifikacija bazira se na odnosu ukupnog sadržaja silicije (SiO_2) i zbira alkalijskih oksida ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$), po čemu je i dobila naziv (akronim od *Total Alkalies versus Silica*; **Cox i dr., 1979**; slika 618). Za granite se relativno retko koristi, jer je namenjena stenama koje ne sadrže bojene minerale sa vodom. Mnogo se češće koristi za vulkanske stene, koje će biti prikazane kasnije.



Slika 618. TAS klasifikacija dubinskih magmatskih stena (**Cox i dr., 1979**); crna neprekidna linija razdvaja alkalne i subalkalne magme (**Miyashiro, 1978**)

V.11.2 ŠANDOVA KLASIFIKACIJA

Šandova klasifikacija granitoida se bazira na **odnosu sadržaja aluminije** (Al_2O_3), **alkalija** ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) i **kalcijske** (CaO), tzv. indeksu zasićenja aluminije (**ASI**), koji se lako može povezati sa mineralogijom. Na osnovu njega dobijamo informaciju da li magma ima više ili manje Al_2O_3 od onoga što je potrebno da bi se formirao i kristalisao feldspat. Dalja podela se zasniva na odnosu sadržaja alkalija i kalcijuma, i naglašava trendove diferencijacije različitih granitoidnih magmi i vezu sa potencijalnim primarnim rastopima (magma). Šandova klasifikacija bazira se na molekulskom odnosu Al_2O_3 sa ($\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$; slika 619), gde se izdvajaju tri grupe granitoida: **peralkalni**, **metaaluminijski** i **peraluminijski** (Clarke, 1992).



Slika 619. Šandova klasifikacija granitoida (Clarke, 1992)

a. **Peralkalni granitoidi imaju odnos katjona (K+Na)/Al veći od 1.** Višak **Na** i **K** i manjak **Al**, zajedno sa **Fe** i **Mg**, omogućavaju formiranje ribekita, arfvedsonita, egirina, egirin-augita itd.

Peralkalni granitoidi se javljaju u stabilnim kontinentalnim regionima, ali ovih stena ima i u okeanskim područjima (Island, Azori, Atlantik, Indijski okean itd.), gde su asocirani sa alkalnim bazaltima, trahitima, fonolitima itd. Peralkalni graniti su bogatiji pojedinim mikroelementima (**Zr**, **Nb**, **U**, elementima retkih zemalja) od peraluminijskih granita.

Mineralogija i struktura ukazuju na to da su peralkalni graniti nastali kristalizacijom visokotemperaturnih rastopa u plitkim delovima kore. Mnogi su crvene boje jer sadrže hematit, što se smatra posledicom „viška” kiseonika, odnosno meteorske vode.

Alkalni feldspati često se javljaju s perititskim izdvajanjima i prorastanjima, ponekad i s kvarcom. Plagioklas je albit. U steni su obično prisutni alkalni amfiboli, ponekad praćeni natrijumskim piroksenom, veoma retko i fjalitom.

Biotit je bogat gvožđem i obično je intersticijski (ispunjava prostore između ostalih mineralnih zrna) jer je „kasno” kristalisao iz magme bogate fluidima.

b. Metaalumijski granitoidi imaju „jednostavnu” mineralogiju. Hornblenda i klinopiroksen (augit) mogu biti praćeni ortopiroksenom, sa malo titanita i/ili alanita. Klinopiroksen je obično delimično zamenjen kalcijumskim amfibolom, epidot je uobičajeni mineral magmatskog porekla.

c. Peraluminijski granitoidi imaju odnos katjona $(K+Na+2Ca)/Al$ manji od 1, zbog čega ove stene kao bitne minerale sadrže muskovit, biotit i kvarc, ponekad topaz, andaluzit i kordijerit koji je strukturno „najsloženiji”. Ovaj mineral (kordijerit) javlja se u euhedralnim (idiomorfim) kristalima ili pojkilitski uklapa kvarc i/ili alkalne feldspate, sreće se i u sitnozrnim agregatima asociranim s biotitom i silimanitom itd.

Muskovit se javlja u krupnim euhedralnim liskama ili prorasta s biotitom, ponekad i zamenjuje glavne minerale u steni (alkalne feldspate). Peraluminijski granitoidi su ograničeni na kontinentalna područja. Pomenute strukture pružaju važne informacije za razumevanje vrste i vremena stvaranja, kristalizacije navedenih minerala. U ovoj grupi granitoida može se javiti i granat, almandinskog sastava, što ukazuje na visok unutrašnji pritisak.

Pomenimo da se **Šandove** granitoidne klase dobro korelišu sa tektonskim sredinama u kojima se javljaju.

Sličan princip klasifikacije primenjuju i Frost i dr. (**Frost i dr., 2001**) i Frost (**Frost, 2008**), koji se oslanjaju na četiri geohemijska indeksa koji se baziraju na sadržaju pojedinih makroelemenata:

a. Modifikovani alkalno-kalcitski indeks – MALI (Na_2O+K_2O-CaO), koji prati sastave feldspata u steni. Ovo je modifikovani alkalno-kalcitski indeks (**Peacock, 1931**) i obuhvata četiri klase: kalcitske, kalk-alkalne, alkalkalcitske i alkalne.

b. Indeks zasićenja aluminijumom (ASI) je odnos $Al/(Ca-1.67 \cdot P+Na+K)$. Ovaj indeks upoređuje količinu **Al**, **Ca**, **Na** i **K** u steni sa količinama potrebnim za formiranje feldspata. Uključene su i male količine apatita prisutne u stenama. Ako ima više **Ca**, **Na** i **K** nego što je potrebno feldspatima, stena je metaaluminijska. Ako ima višak **Al**, to je peraluminijska stena i sadrži minerale bogate aluminijumom, kao što su muskovit, granat, silimanit, kordierit itd.

c. **Indeks alklnosti (AI)** određuje ravnotežu između aluminijuma i alkali-ja (**Na+K**) u steni. Ako ima višak **AI**, stena je metaaluminijska, a ako ima višak **Na+K**, stena je peralkalna i sadrži **Na**-piroksen i **Na**-amfibol.

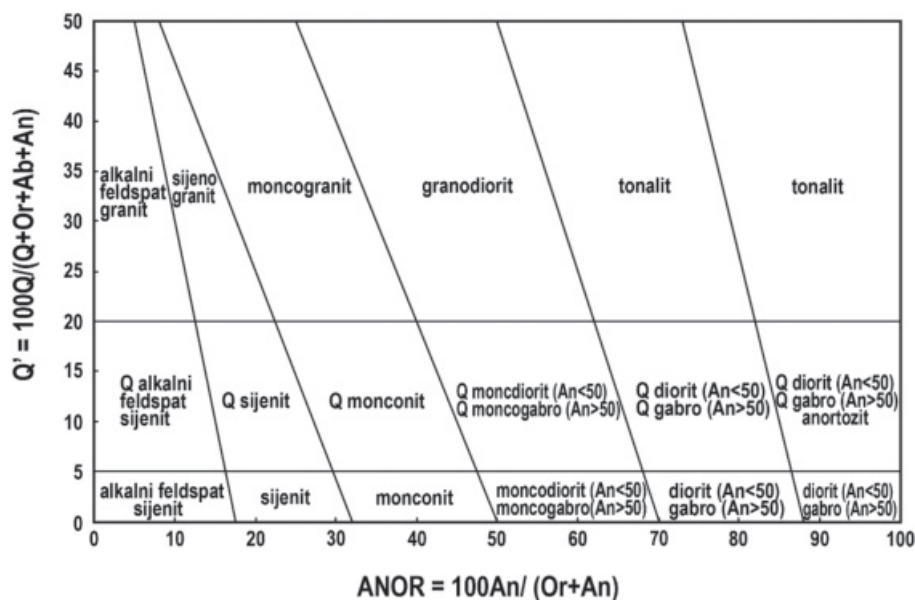
Koristeći ova četiri indeksa, Frost i dr. (*Frost i dr., 2001*) opisali su četrnaest hemijskih varijanti granitoidnih stena, koje spadaju u četiri različita tektonska okruženja. Veze između vrste granitoida, regiona izvora i tektonskog okruženja razmatrana je od strane mnogih autora koji su koristili različite kriterijume: sastav i poreklo anklava, sastav biotita, morfologiju cirkona, vrstu oksida kao akcesornih minerala, geochemije mikroelementa itd. Barbarin (*Barbarin, 1990, 1999*) sumirao je većinu pomenutih kriterijuma koji su prikazani u tabeli 13, gde su empirijski izvedeni i kriterijumi za tektonski smeštaj granitoida (biće prikazani u poglavlju Granitoidi i tektonska sredina stvaranja).

Tabela 13. Izvor (poreklo) i tektonski smeštaj granitoida, Barbarin (1990)

Izvor	Tip granita		Tektonski smeštaj	
Krustalni	Intruzivi, dvoliskunski leukograniti	S	Kolizioni i postkolizioni	Orogeni graniti
	Peraluminijski, autohtoni graniti (visoko K- nisko Na,Ca)	S		
	Peraluminijski intruzivi, graniti (visoko K-nisko, Na,Ca)	S		
Mešani (krustalni +omotač)	Metaaluminijski, kalijski kalk-alkalni graniti (visokoK-nisko Ca)	I	Subdukcione zone	
	Metaaluminijski kalk-alkalni graniti (nisko K-visoko Ca)	I		
Omotač	Toleitski graniti ostrvskih lukova	M	Okeanski riftovi	Anorogeni graniti
	Toleitski graniti okeanskih grebena	M		
	Alkalni i peralkalni graniti	A	Zone kontinentalnog riftinga i doma	

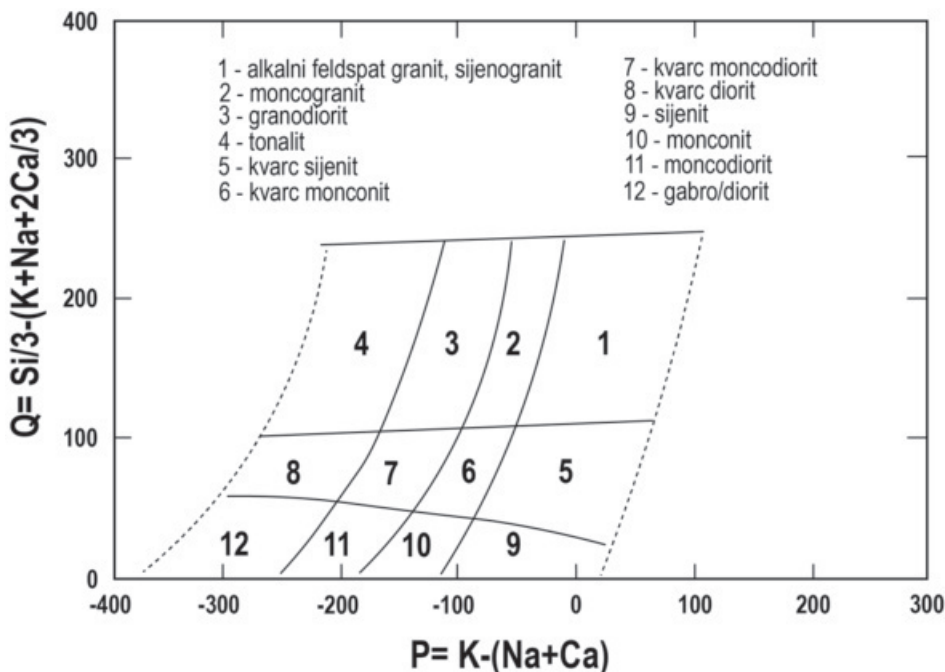
Kod klasifikacije granitoida treba biti obazriv zbog prisustva pertita (izdvajanja albita u **K** feldspatu), jer se svi pertitski albiti svrstavaju u alkalne feldspate. Ove „teškoće” su uklonjene korišćenjem **Q'ANOR** dijagrama (*Streckeisen i Le Maitre, 1979*), gde je $Q' = 100Q/(Q+Or+Ab+An)$ i parametar **ANOR** = $100 An/(An+Or)$ (slika 620). Pomenuti minerali su normativni.

Alternativni metod za prevazilaženje pomenutog problema dao je De la Roš (**De la Roche**), a modifikovali Debon i Le Fort (*Debon i Le Fort, 1983*; slika 621), u kojima su parametri $Q = Si/3-(K+Na+2Ca/3)$ i $P=K-(Na+Ca)$. Iako se ovaj dijagram često koristi u novijim publikacijama, **QAP** triangularni dijagram



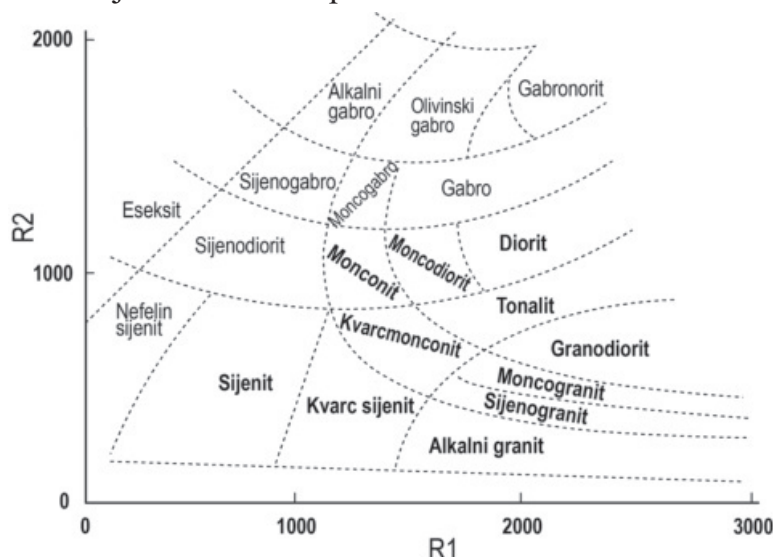
Slika 620 Klasifikacija granita prema odnosu normativnih minerala (Streckeisen i Le Maitre, 1979).

Štekajzena zadržao je svoju popularnost, čak „razlikujući” S i I tipove granita. Minerali kao što su kvarc i feldspati se „lako” razlikuju na terenu, ali tu su i lako uočljivi biotit, muskovit, hornblenda itd., koji mogu dopuniti pomenutu klasifikaciju, na primer, hornblenda granit, porfiroidni biotitski granit, leuko granit itd. Navedimo i neke od dijagrama, klasifikacija granitoida koji se baziraju na osnovu međusobnog odnosa sadržaja glavnih makroelemenata i izračunatih **normativnih** minerala. Dijagram na osnovu odnosa glavnih oksida koji su definisani kroz pa-



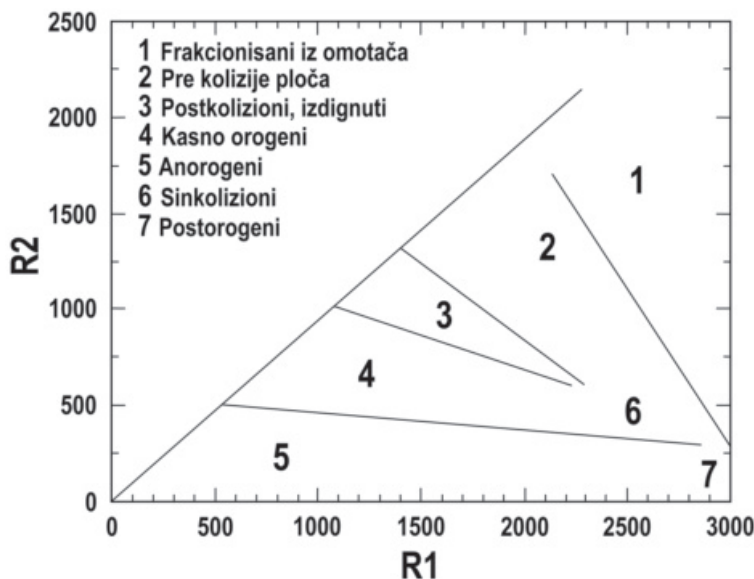
Slika 621. Klasifikacija granita prema Q i P parametrima (Debon i Le Fort, 1987)

rametre **R1** i **R2** koje su dali De la Roš i dr. (*De la Roch i dr., 1980*; slika 622) često se sreće u udžbenicima. Tektonska sredina stvaranja granitoida (koja će biti detaljno prikazana u poglavlju Granitoidi i tektonska sredina stvaranja) u „velikoj” meri se koreliše sa hemijskim sastavom granitoida, ali je znatna raznolikost izvora i procesa stapanja „neizbežna”. De la Roš i de. (*De la Roche i dr., 1980*) napravili su dijagram varijacije koji se bazira na kombinovanim parametrima glavnih elemenata za klasifikaciju vulkanskih i plutonskih stena.



Slika 622. Klasifikacija granitoida (boldovana imena stena) prema R_1 i R_2 parametrima (*De La Roch i dr. 1980*)

Bachelor i Bauden (*Bachelor i Bowden, 1985*) iskoristili su ovaj **R1–R2** dijagram $R_1 = 4 \text{ Si} - 11 (\text{Na} + \text{K}) - 2 (\text{Fe} + \text{Ti})$ i $R_2 = 6\text{Ca} + 2\text{Mg} + \text{Al}$ da bi razlikovali granitoidne stene stvorene u različitim tektonskim sredinama (slika 623). Iako posto-

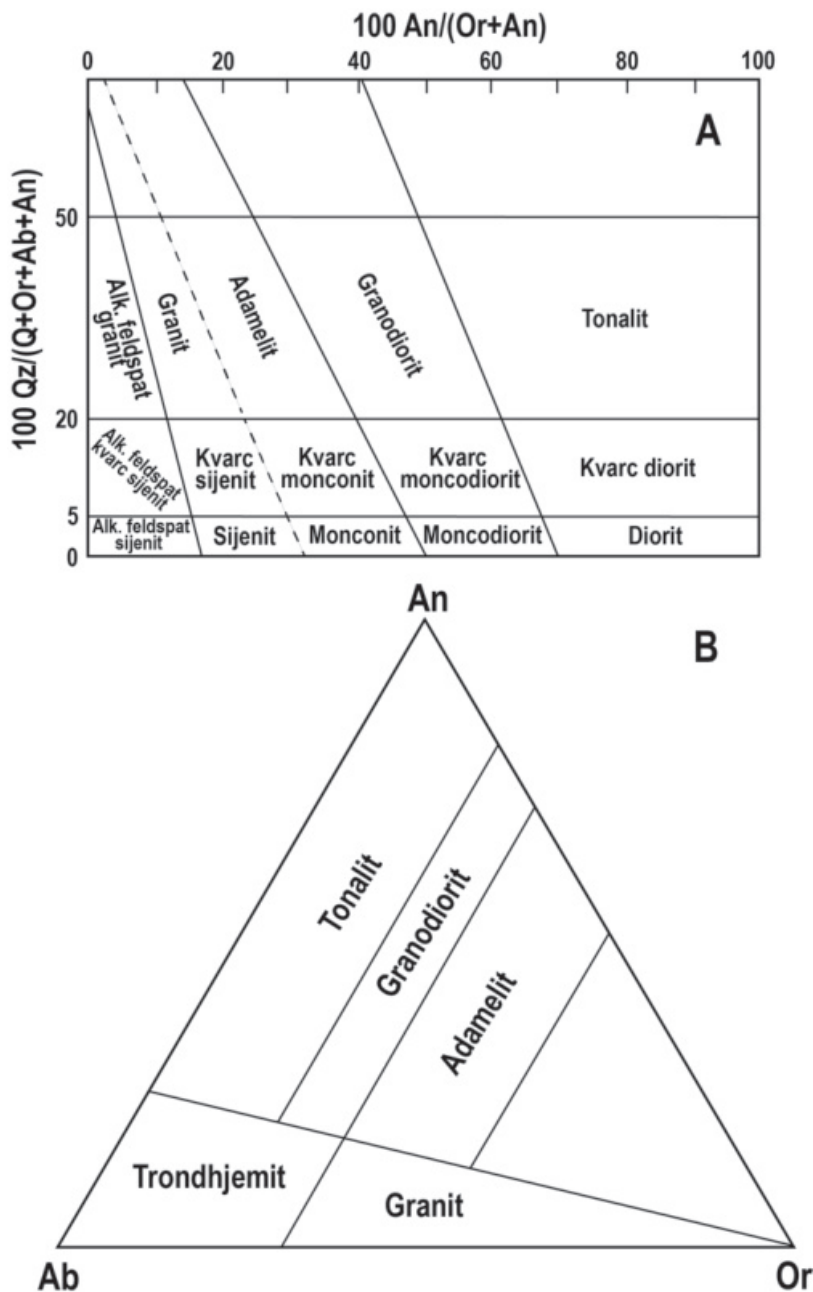


Slika 623. Tektonska sredina stvaranja granitoida prema parametrima R_1 i R_2 (*Bachelor i Bowden, 1985*)

ji značajno preklapanje polja sa niskim vrednostima **R2** i visokog **RI**, očigledan je određeni stepen „razdvajanja” između plagiogranita, granitoida subdukcionih zona, kasnih orogenih i anorogenih granita itd.

Metoda (klasifikacija) „dobro” funkcioniše samo za granitoide sa „proširenim” (većim) rasponom sastava. Prema pojedinim autorima moncograniti koji se javljaju u „različitim” postavkama ne mogu se pouzdano razlikovati.

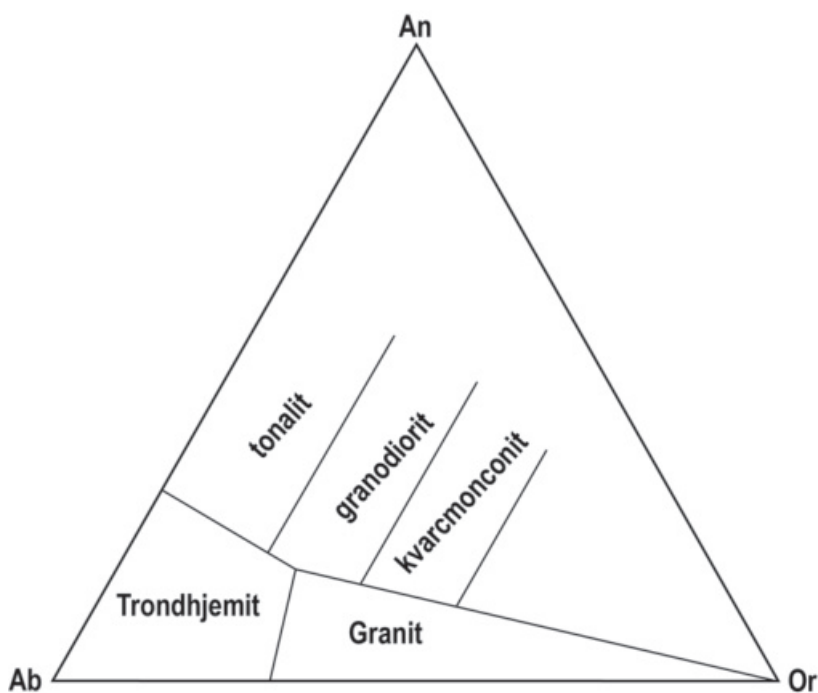
Ako postoji hemijska analiza, često se koristi i sadržaj i međusobni odnos normativnih feldspata, ortoklasa, albita, anortita i kvarca (slika 624). Ova normativna šema omogućava i razlikovanje, podelu trondhjemit.



Slika 624. Klasifikacija granitoida prema normativnim mineralima (Streckeisen i Le Maitre, 1979 i O'Connor, 1965 i Barker, 1979)

Na slici 624 A (*Streckeisen i Le Maitre, 1979*) modalni kvarc je analogan sa 100 **Qz**/ (**Qz+Or+Ab+An**), a modalni plagioklas je analogan sa 100 **An**/(**Or +An**) sa ignorisanjem normativnog **Ab**. Normativni feldspat (**An-Ab-Or**) takođe je pogodna šema klasifikacije za granitoide jer omogućava razlikovanje trondhjemske grupe stena (slika 624 B, gde su granična polja prema *O'Connor, 1965, Barker, 1979*)

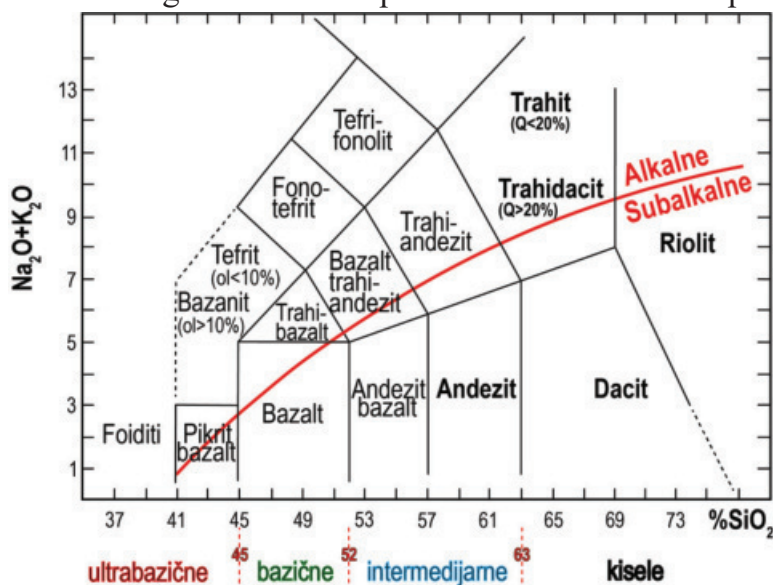
U udžbenicima se sreće još jedan, vrlo sličan dijagram (slika 625; *Barker, 1979*) sa malo drugačijim poljima granitoida.



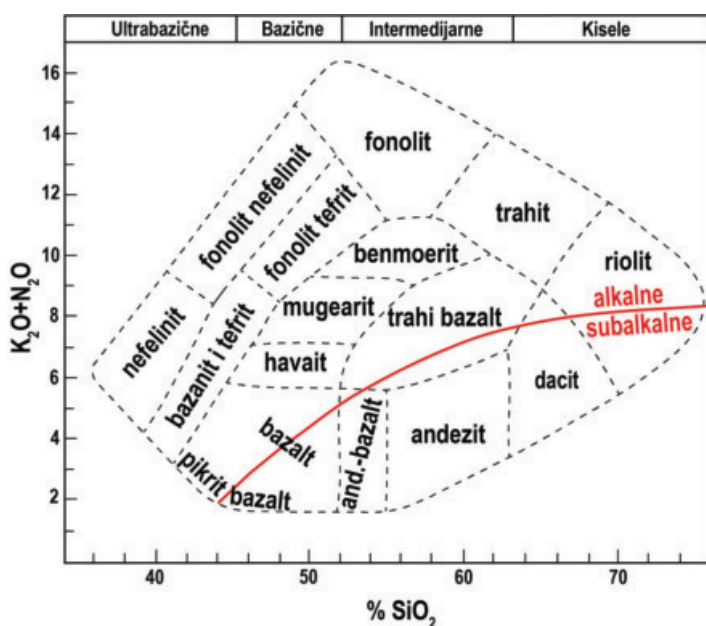
Slika 625. Klasifikacija granitoida prema normativnim An, Ab i Or (*Barker, 1979*)

V.11.3 TAS KLASIFIKACIJA ZA VULKANSKE STENE

TAS dijagram smo prikazali i kod intruzivnih stena. On prikazuje odnos sadržaja silicije i ukupnih alkalijskih oksida. Međutim, ovaj dijagram više se koristi za klasifikaciju vulkanskih stena, jer se deo minerala zbog male veličine ili prisustva stakla ne može odrediti golim okom ili polarizacionim mikroskopom (slika 626).



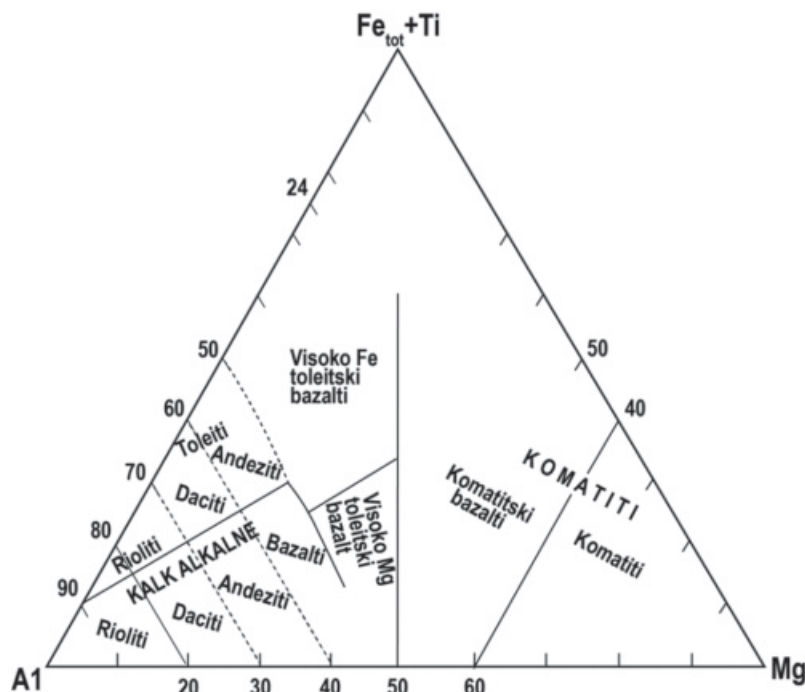
Slika 626. TAS dijagram za granitoidne vulkanske stene (Le Bas i dr., 1986)



Slika 627. TAS dijagram (Cox i dr., 1979; granična linija alkalne i subalkalne (crveno) je po Miyashiru, 1978)

Vrednosti silicije (SiO_2) i alkalijskih oksida ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) normalizuju se, računaju bez sadržaja vode (H_2O) u steni (Le Bas i dr., 1986). Podela subalkalnog i alkalnog polja je prema Irvinu i Baragaru (Irvine i Baragar, 1971). Ako je visok sadržaj MgO , preporučuje se dalja podela stena na drugom dijagramu (slika 627). Moguće je da se radi o komatitu, miemečitu (engl. miemchite) ili pikritu, pa čak i boninitu (zavisno od sadržaja SiO_2). Ovaj dijagram nema genet-

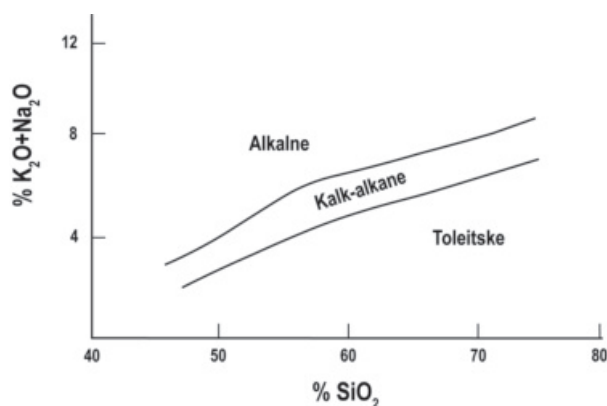
sko značenje. Pomenimo i „opštu” klasifikaciju vulkanskih stena, tj. trokomponentni dijagram, gde su prikazani odnosi sadržaja katjona **Al**, **Mg** i **Fe^{tot}+Ti** (*Rickwood, 1989*, korigovano, slika 628), koji, osim kiselih, uključuje i podelu nekih bazičnih vulkanita. Često se koristi, posebno kada se u proučavanom području nalaze vulkanske stene različitog sastava.



Slika 628. Podela vulkanskih stena prema odnosima sadržaja katjona **Al**, **Mg** i **Fe^{tot}+Ti** (*Rickwood, 1989*)

V.11. 4 KALK-ALKALNI INDEKS

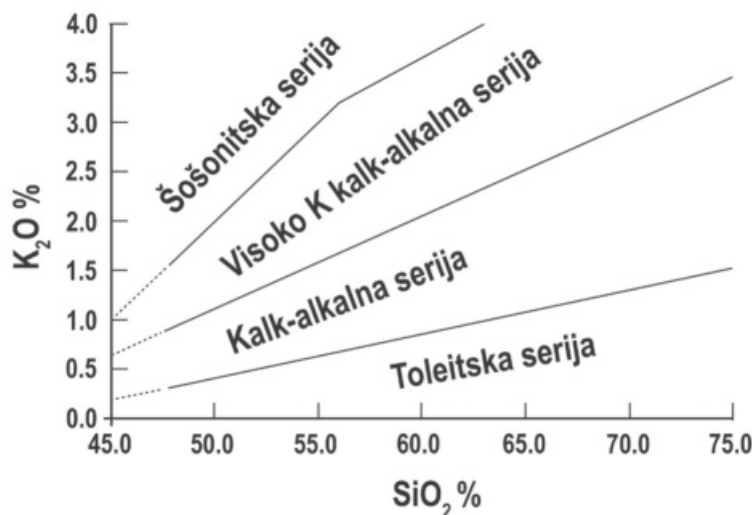
Kalk-alkalni indeks je definisao Pikok (*Peacock, 1931*) i na njemu su dati odnosi sadržaja **Na₂O+K₂O** i **CaO** u odnosu na sadržaje **SiO₂** između 51% i 61%. Stene se klasifikuju kao kalcijске za vrednosti između 50% i 55% **SiO₂**, a ako



Slika 629 Kalk-alkalni indeks (*Kuno, 1969*)

su ispod 50%, pripadaju alkalnim. Kalkalkalni indeks je koristan za granitoidne asocijacije sa „proširenim” rasponom sastava. Koriste se i drugi dijagrami, kriterijumi kao što su odnosi **K₂O+Na₂O** u odnosu na sadržaj **SiO₂**. Irvin i Baragar (*Irvine & Baragar, 1971*) i Kuno (*Kuno, 1969*) definišu polja alkalnih, kalk-alkalnih i toleitskih grani- ta (slika 629). Pomenimo još jednu

klasifikaciju za kisele vulkanske stene, koju su ponudili Pečeri i Tejl (Peccerillo i Taylor, 1976), koji koriste indeks aluminije i kalk-alkalni indeks dajući „laku” i tačnu podelu ovih stena, posebno kada se koristi zajedno sa Štrekajzenom (slika 630).



Slika 630. Kalk-alkalna klasifikacija za kisele vulkanske stene (Peccerillo i Taylor, 1976)

U vulkanskim lukovima se javljaju četiri glavne magmatske serije: nisko **K**, kalk-alkalna, visoko **K** kalk-alkalna i šošonitska. Njihova podela bazira se na sadržaju odnosa K_2O i SiO_2 (Le Maitre, 2002). U poređenju sa vulkanskim asocijacijama stena ostrvskih lukova, magme sa niskom **K** su slabo zastupljene, visoko **K** i šošonitske su češće, posebno u „kiselom” delu (bogatijem sa SiO_2) serije. Povećani sadržaj **K** se vezuje za kontaminaciju sa kontinentalnom korom. Pomenimo da se na „kopnenom delu” (u kontinentalnoj kori) javljaju alkalne vulkanske stene, alkalni bazalti, do leucit bazaniti, koji su takođe genetski vezani i za subdukcione procese.

V.12 GENETSKA KLASIFIKACIJA GRANITOIDNIH INTRUZIVNIH STENA

UVOD

Granitoidi se javljaju u različitim tektonskim uslovima, ali većina njih se nalazi u područjima sa zadebljanom kontinentalnom korom. Podsetimo se da omotač uglavnom obezbeđuje toplotu i materijal za formiranje velikih batolita. H_2O igra važnu ulogu u stapanju stena i može sniziti temperaturu na 600 °C. Stapanje bez fluida (vode) dešava se na višim temperaturama, od 700 °C (gde se muskovit razgrađuje) do preko 950 °C (za topljenje u dehidriranoj donjoj kori).

„Prekomerni” sadržaj H_2O „pogoduje” formiranju peraluminijskih granitoida tipa S, dok se vruće peralkalne magme javljaju u uslovima siromašnim H_2O .

Kritična frakcija rastopa potrebna za formiranje mobilnih granitoidnih rastopa kreće se u opsegu od 5% do 30%, zavisno od viskoziteta rastopa i stanja naprezanja. Uloga omotača i brzina rasta kore su predmet kontroverzi. Postoji složena interakcija između više procesa koji su uključeni u nastanak granitoida i „povezanih” tektonskih režima.

Neki granitoidi imaju karakteristike više tipova (varijacije u mineralnom i hemijskom sastavu) i javljaju se u istom „genetskom” području. Ponekad se desi da granitoidi imaju različite karakteristike, čak i sve karakteristike stena. Primer su granitoidi u Andima, gde imamo više tipova i vrsta granita kako se krećemo ka istoku. Bilo bi „divno” kada bi dijagnostika diskriminacije mogla uspešno da razlikuje ove grupe i vrste granita i složi se sa drugim geološkim parametrima.

Genetska klasifikacija nam omogućava grupisanje i proučavanje granitoida fokusirajući se na petrogenetske procese. Podelu granita možemo započeti s ISMA klasifikacijom, koja je „vrlo korisna” (praktična, jasna) i često se nalazi u udžbenicima.

V.12.1 ISMA („ABECEDNA”) KLASIFIKACIJA

Čapel i Vajt (*Chappell i White, 1974*) razvili su šemu klasifikacije u kojoj se razlikuju četiri vrste granita: **I**, **S**, **M** i **A** (tabela 14).

Tabela 14. Klasifikacija granitoida (Chappell i White, 1974)

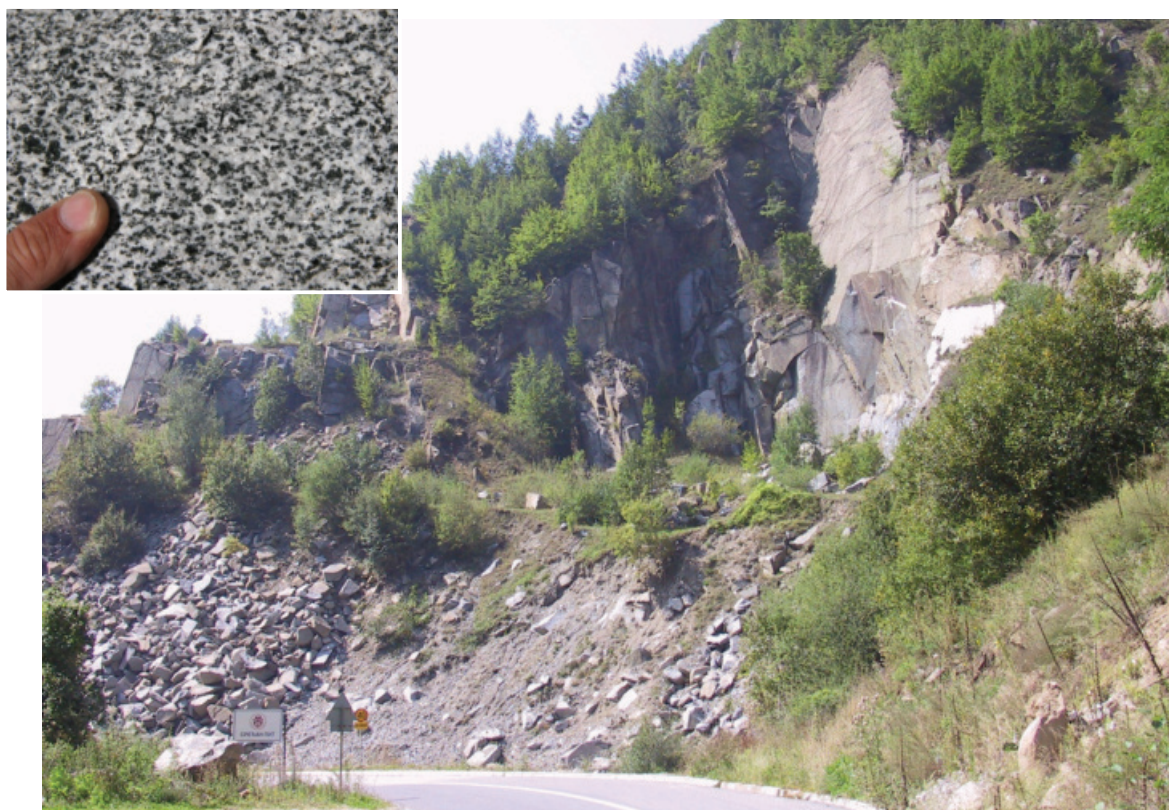
Tip	SiO ₂	K ₂ O/Na ₂ O	Ca, Sr	Al/(C+N+K)*	Fe ³⁺ /Fe ²⁺	Co, Ni	δ ¹⁸ O	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	Mikroelem.	Nastanak
M	46-70%	Nizak	Visok	Nizak	Nizak	Nizak	<9%	<705	Nizak Rb,Th, U, niske LIL i HFS	Subdukci- one zone ili unutar ocean. ploča
I	53-76%	Nizak	Visok u bazičnim stenama	Nizak, metaalumi- nijske do peralu- minijske	Srednji	Nizak	<9%	<705	Visok LIL/HFS srednji Rb,Th,U hornbelnda, magnetit	Izdvojeni iz omo- tača, subdukci- one zone, intra- krustalni. Bazični do intermedijarni izvor
S	65-74%	Visok	Nizak	Visok: metaalumi- nijske	Nizak	Visok	>9%	>707	Promenljiv LIL/ HFS, visok Rb, Th,U, biotit, ko- rdijerit, Als, Grt, ilmenit	Subdukci- one zone, suprakrustal- ni sedimentni izvor
A	Visok >77%	Visok Na ₂ O	Nizak	Promenljive peralkalne	Promenljiv	Nizak	Promenljiv	Promenljiv	Nizak LIL/HFS visok Fe/Mg, visok Ga/Al visok REE, Zr visok F, Cl	Anorogeni, stabilni kratoni, riftne zone

U to vreme, ova klasifikacija bila je „napredak” u istraživanju granitoida jer je pokazala da oni nastaju iz različitih izvora koji „ostavljaju hemijski trag” na ovim stenama.

Tipovi granita **I**, **S** i **M** su **orogeni graniti** povezani sa subdukcijom, dok su graniti tipa **A** **anorogeni**. (napomena: naziv granit preuzet iz originalne klasifikacije). Tipovi granitoida **I**, **S** i **M** su podeljeni na osnovu različitih hemijskih svojstava, dok su **A**-tipovi izdvojeni na osnovu tektonskog režima, što znači da ove klasifikacije nisu konzistentne (dosledne). Stoga je potrebna opreznost kod interpretacije rezultata.

V.12.1 I GRANITI

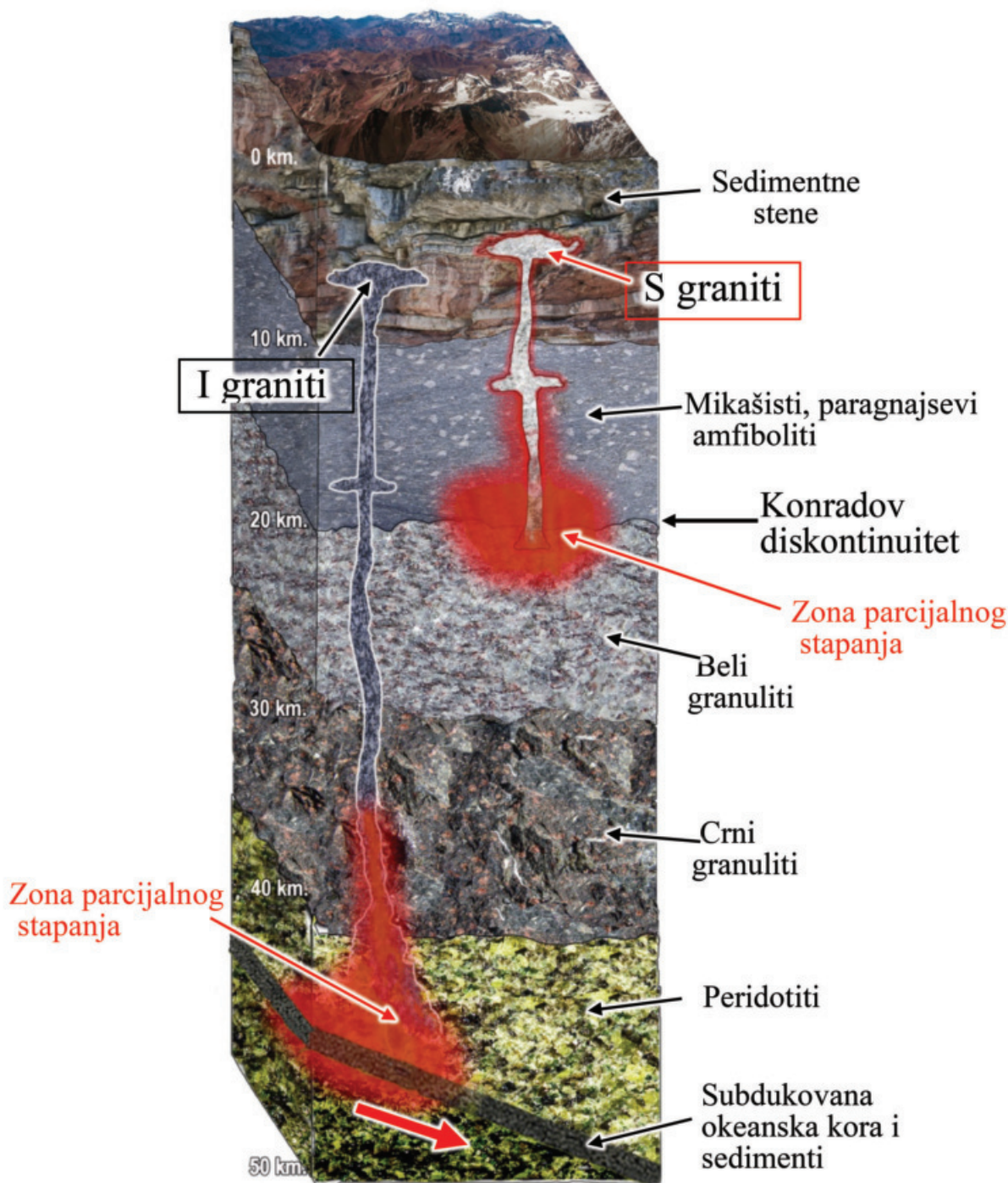
I graniti nastaju u orogenim područjima iznad zona subdukcije (biće detaljnije prikazani u poglavlju o granitoidima vulkanskih lukova). Granitoidne magme se formiraju delimičnim stapanjem najviših delova gornjeg omotača i najdubljih delova kontinentalne kore (slika 631), pri čemu se diferencijacija ovih magmi događa pri njihovom uzdizanju ili **in situ** (na mestu, slika 632). Promenljivog su mineralnog sastava, sa povišenim sadržajem natrije i kalcije. Karakterističan mineral u njima je hornblenda. Prema sastavu odgovaraju granitima, kvarcmonconitima, granodioritima i kvarcdioritima.



Slika 631. Granodiorit kod Jošanice pripada I-tipu granitoida; gore levo: detalj stene

Ove stene su metaaluminijske do slabo peraluminijske i imaju relativno visok sadržaj Na_2O . Obogaćene su sa Na_2O i Ca_2O i imaju niži sadržaj Al_2O_3 . Odnos izotopa $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ je manji od 0,708, obično u opsegu 0,704–0,706, što ukazuje na magmu „izvedenu” iz izvora omotača (tabela 15).

I graniti su izgrađeni od alkalnog feldspata, intermedijarnog plagioklasa i kvarca. Hornblenda dominira među bojenim mineralima, a prisutan je i biotit, dok je diopsid čest kao normativni mineral. Od akcesornih minerala javljaju se magnetit, sfen i ortit.



Slika 632. Mesta stvaranja I i S granita

Njihovi vulkanski ekvivalenti su daciti i andeziti. U ovim stenama i u ovoj tektonskoj sredini javlja se i mineralizacija porfirskog bakra, volframa i molibdena. I-tip granitoida je najviše zastupljen u mezozoiku i kenozoiku. Obuhvataju i većinu diorita, kvarcdiorita i tonalita. Pojedini autori smatraju da I-graniti mogu nastati i stapanjem grauvice (vrste peščara).

Svojstva	I-tip granitoida	S-tip granitoida	A-tip granitoida
Sastav glavnih elemenata	Metaalumijski	Peralumijski	Metaalumijski do peralkalni
Normativni minerali	Normativni diopsid	Normativni korund	Normativni diopsid±akmit
Sastav stena	Obično plutoni sasta- va bazičnih do kiselih stena ($\text{SiO}_2 = 56-77\%$)	Generalno ograniče- ni na visoko SiO_2 leu- kograne ($\text{SiO}_2 = 64-77\%$). Nema asocija- cije sa baz. stenama	Tipično visoko SiO_2 granitoidi obično aso- cirani sa sijenitima
Karakteristični minerali	Hornblenda i biotit	Muskovit (obično sa biotitom±drugi Al bo- gati minerali	Baziti su sa Fe bogatim biotitom, alkanim pirokse- nom/amfibolom
Odnos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.704-0.706	0.708-0.765	0.702-0.717
Sastav ksenolita	Ksenoliti sa hornble- ndom magmatskog porekla	Metasedimentni ksenoliti	Ksenoliti različitog sastava
Asocirana rudna ležišta	Porfirski Cu, Mo sulfi- di, ± žice pirita sa Ag i -Au	Sn, W, U (Li, Be, B)	Zr, Hf, Nb, Ta, Y, REE, U, Th HFS elementi

Tabela 15, Karakteristike I-tipa, S-tipa i A-tipa granitoida

V.12.2 M GRANITI

M graniti (engl. *mantle granite*, **Pitcher, 1982**) izvedeni su iz „roditeljskih” magmi koje potiču iz omotača. Njihove geohemijske i izotopske karakteristike ukazuju na to da su nastali parcijalnim stapanjem materijala stena (peridotita) omotača, a potom frakcionom kristalizacijom, kada su stvorene kiselije magme. Imaju sastav sličan omotaču, kao što je odnos sadržaja izotopa $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (oko 0,7032). Genetski se vežu za kalk-alkalne tonalite, kvarcdiorite i gabroidne stene. Osim kvarca i alkalnih feldspata, među glavnim mineralima su hornblenda, klinopiroksen, biotit i magnetit. graniti tipa **M** nastaju i u ostrvskim lukovima. Pomenimo da se tipovi **M** i **I** mogu mešati u zrelih ostrvskim lukovima i kontinentalnim lukovima. Rezervoari su toliko slični da ih „često” nije moguće geohemijski ili izotopski razlikovati. Na tako složenim mestima (sredinama) hibridne magme su više pravilo nego izuzetak. Mineralizacije bakra i zlata povezane su s granitima tipa **M**.

V.12.3 S GRANITI

S graniti (akronim od engl. *sedimentary*) nastaju parcijalnim stapanjem metamorfnih stena para porekla, gnajseva i mikašista, u gornjem delu kontinentalne kore (iznad Konradovog diskontinuiteta), zbog čega ih pojedini autori vezuju i za kolizione zone.

Od stena, uključuju granodiorite, kvarcmonconite i granite (slika 633). Zbog visokog sadržaja kalije, aluminije i silicije, glavni minerali u S-granitima su alkal-



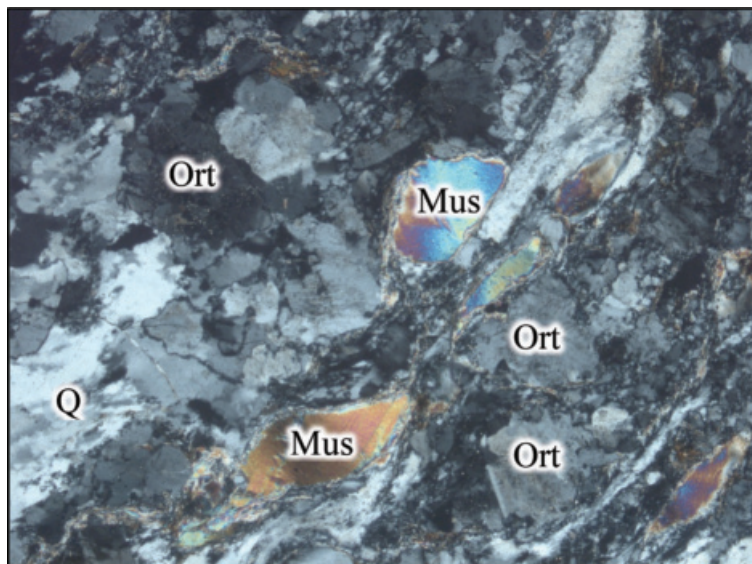
Slika 633. Granit kod Polumira pripada S-tipu granita; gore desno: detalj stene

ni feldspati (ortoklas, mikroklin), muskovit (koji je karakterističan mineral), biotit (retko) i kvarc, a od normativnih minerala čest je korund, koji ukazuje na peraluminijski karakter (slika 634).

Hornblenda je u ovim stenama veoma retka. Od akcesornih minerala javljaju se monacit, ilmenit, dok je magnetit ili odsutan ili redak. Anklave u S-tipu granita su izgrađene od biotita, granata, silimanita, kordijerita i plagioklasa.

S-graniti su obogaćeni alkalijama, aluminijumom i silicijumom (SiO_2) i imaju nizak sadržaj natrijuma (Na_2O). Relativno visok sadržaj Al_2O_3 se odražava u mineralima kao što su muskovit, disten, silimanit, kordijerit, granat itd. Imaju visok odnos K/Na i $(\text{K}+\text{Na})/\text{Al}$, kao i Fe/Mg . Obogaćeni su F, elementima HFS (Zr , Nb , Ga , I , Zn) i elementima REE, a osiromašeni su u Mg , Ca , Al , Cr , Ni i

imaju niži sadržaj vode. U odnosu na **I** i **M** granite obogaćeni su elementima **LIL** i osiromašeni refraktornim elementima (*Greaser i dr., 1991*). Oni uglavnom imaju veći sadržaj SiO_2 i alkalija, veći odnos **Fe/Mg**, više halogenih (**F** i **Cl**) elemenata, više **REE**, **Zr**, **Nb**, **Ga**, **I**, **Ce** i niži sadržaj kompatibilnih mikroelemenata (**Co**, **Cr**, **Ni**) nego **I**-tipovi. Odnos sadržaja izotopa $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ je veći od 0,708, što ukazuje na to da su izvorne stene sedimentarne.



Slika 634. Mikrosnimak granita kod Polumira; Ort = ortoklas,
Mus = muskovit, Q = kvarc; N+, 40x

Ako **I** graniti predstavljaju „intrakrustalne” (unutar kore) magmatske prekursore, **S** graniti su „suprakrustalni” (iznad kore) ili imaju sedimentni karakter. Interesantno je da se u **S** granitima često sreću uklopci (anklave) metaklastita, koji predstavljaju relikte primarnih stena koje nisu potpuno stopljene tokom metamorfnih procesa. Za ovaj tip granita vezuju se i ležišta kalaja. Stvaranje granita se ponavljalo više puta tokom istorije Zemlje, pa su stene različitog starosti

V.12.4 A GRANITI

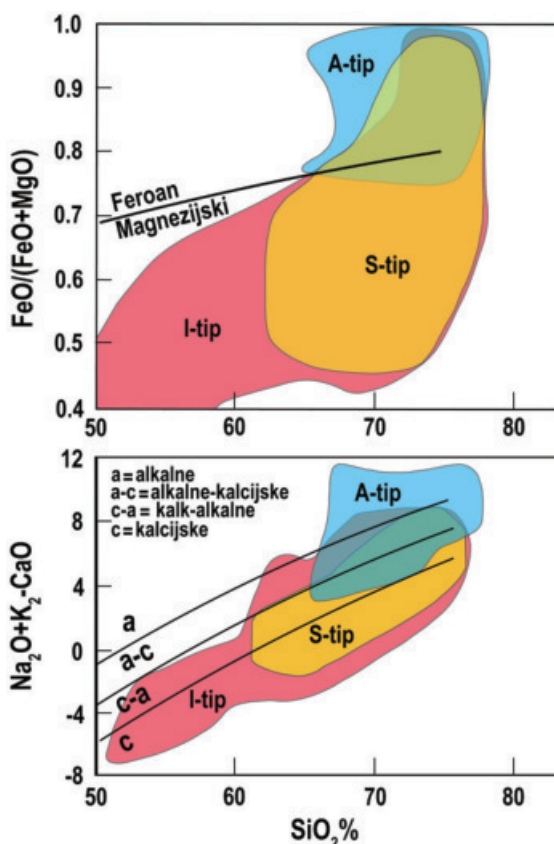
Naziv **A-tip graniti** ne odnosi se na njihovu petrogenezu, već na anorogeni tektonski kontekst, jer se ovaj tip granita javlja u posttektonskom okruženju ili u kontinentalnim ekstenzionim režimima (npr. Istočnoafrički rift). Ove stene ne uključuju zone subdukcije, suturne zone itd. Po sastavu su peralkalne i obično sadrže biotit, alkalne piroksene, alkalne amfibole i magnetit (*Collins i dr., 1982*). Uključuju i vulkanske stene, uglavnom riolite. Uz **A** granite sreću se alkalne stene, kao što su alkalni granit, sijenit, alkalni sijenit i kvarcsijenit.

Pojedini autori smatraju da nastaju parcijalnim stapanjem i/ili frakcionom kristalizacijom bazaltnih stena. Obično formiraju plitke plutone ispod vulkana. Njihova „tipič-

na” pojava uključuje i bimodalni magmatizam, riolit-bazaltne asocijacije u kontinentalnim riftovima. Graniti tipa **A** pripadaju najvećim delom hipersolvus granitima i obično imaju samo jednu vrstu pertitskog feldspata. Rioliti i opsidijani su vulkanski primeri granitoidne magme tipa **A**. Veruje se da ove magme potiču od topljenja izvora koji je već iscrpljen od magme tipa **I**. Magma tipa **A** imaju oko 2–4% fluida (H_2O), a njihova temperatura je oko 900 °C blizu površine. Na kraju, ipak, treba napomenuti da su istraživanja granitoida pokazala da postoji mnogo izuzetaka od „glavnih” opisanih tipova.

V.12.5 FEROAN GRANITI

Granitoidi se klasifikuju i na osnovu oksidnog stanja, tj. odnosa fero gvožđa i feri gvožđa ili, jednostavnije, odnosa oksida gvožđa u mafičnim (bojenim) mineralima. Klasifikacija koju su dali Frost i dr. (Frost i dr., 2001) obuhvata različite tipove granitoida, od **Fe**-bogatih diferencijata u slojevitim mafitskim intruzijama do „ogromnih” granitoidnih batolita. Na osnovu odnosa $FeO/(FeO + MgO)$, razlikujemo **feroan** i **magnezijske** granite (slika 635). Oni se dalje grupišu u skladu sa sadržajem alkalija i kalcijuma, gde je predložena nomenklatura upoređena sa „standardnom” klasifikacijom granita. **Feroan graniti** su bogati gvožđem, jer sadrže značajne količine rastopljenih materijala koji su prošli kroz opsežnu frakcionu kristalizaciju u redukcionim uslovima. Oni variraju od alkalnih do kalk-alkalnih, zavisno od toga koliko je bilo asimilacije materijala iz kore.



Slika 635. *Feroan i magnezijski graniti (Frost i dr., 2001)*

Fe-INDEKS

Fe-indeks $(FeO+0.9 Fe_2O_3)/(FeO+0.9 Fe_2O_3+MgO)$ „meri” odnos gvožđa i magnezijuma u feromagnezijskim silikatima. Ove stene su podvrgnute intenzivnoj frakcionoj kristalizaciji olivina i piroksena i manje frakcioniranju magnetita ili su nastale parcijalnim stapanjem stena. **Magnezijumske stene** su podvrgnute ranoj kristalizaciji magnetita, koji je potisnuo (onemogućio) obogaćivanje gvožđa u kasnijim fazama.