

V.13 GRANITOIDI I TEKTONSKA SREDINA STVARANJA

UVOD

Granitoidi su plutonski ekvivalenti andezita, dacita i riolita i mogu nastati u bilo kom geotektonskom okruženju u kojem se javljaju pomenuti vulkaniti. U prilog navedenom, kada se sačuvaju krovne zone granitoidnih plutona visokog nivoa, granitoidi najčešće imaju vulkansku sukcesiju sličnog afiniteta, na primer u Andima. Brojni istraživači predlažu klasifikaciju granitoida zasnovanu na tektonskoj sredini stvaranja. Jedna od njih je prikazana na slici 636, modifikovana prema Pičeru (*Pitcher, 1982, 1993*) i Barbarinu (*Barbarin, 1990*).

	OROGENI			PRELAZNI	ANOROGENI	
	Okeanski ostrvski luk	Kontinentalni luk	Kolizija kontinenata	Postorogeni Uzdizanje/Kolaps	Kontinentalni rifting, topla tačka	Srednjeokenski greben, okeanska ostrva.
	Stapanje omotača ispod ploče	stapanje klina omotača	mešano stapanje lokalni anatexis	dekompresiono stapanje	dekompresiono stapanje hot spot plume	hot spot plume
Primeri	Solomonska ostrva Papua Nova Gvineja	Mezozojski batoliti Kordiljera zapadno Amerikas Gander terana	Manaslu i Lotse Nepala, Amerikan Gander teran	Gornjekaledonski plutoni Britana, gornjevarisjski donji severni proterozoik	Nigerijski prsten, Oslo rift, Jeloustonska topla tačka	Olioliti Omara i Trodosa, Island
Geohemija	Kalk-alkalni > toleitski M-tip i I-M hibridni Metaluminijski	Kalk-alkalni I-tip > S-tipa Met-Al do Per-Al	Kalk-alkalni S-tip Peraluminijski	Kalk-alkalni I-tip, S-tip (A-tip) Metalum. do Peralum.	Alkalni A-tip Peralkalni	Toleitski M-tip Metaluminijski
Vrste stena	kvarcdiorit u zrelom luku	tonaliti i granodiorit >granita ili gabra	migmatiti i leukograniti	bimodalni granodioriti +diorit-gabro	Granit, sijenit +diorit-gabro	Plagiogranit
Asocijacija minerala	Hbl > Bt	Hbl, Bt	Bl, Ms, Hbl, Grt, Als, Crd	Hbl > Bt	Hbl, Bt, egirin, fajsit Rbk, Arfved	Hbl
Asocijacija vulkanizma	andeziti i bazalti ostrvskih lukova	andeziti i daciti u velikim masama	često odsutna	bazalti i rioliti	alkalne lave, tufovi, i ispunjene kaldere	MORB i bazalti okeanskih ostrva
Klasifikacija Barbarin (1990)	T_{ok} toleiti ostrvskih lukova	H_{ok} hibridne kalk-alk. stene	$C_{\text{tr}}, C_{\text{Ca}}, C_{\text{Cl}}$ kontinentalni tipovi	H_{LD} hibridni kasno orogeni	A alkalne	T_{ok} toleiti okeanskih riftova
Pearce i dr, (1984)	VAG (graniti vulkanskih lukova)		COLG (kolizioni graniti)		WPG i ORG (graniti unutar ploče i okeanskih riftova)	
Maniar i Piccoli (1989)	IAG graniti ostrvskih lukova	GAG graniti kontin. lukova	CCG graniti kontin. kolizija	POG postorogeni graniti	RRG CEUG rift & abort / tople tačke	OP okeanski plagiograniti
Nastanak	Parcijalni rastop mafične podloge iz omotača	PM izdvojenog mafičnog rastopa podloge omotača +krustalni deo	Parcijalni rastop recikliranog krusalnog materijala	Parcijalni rastop donje kore+omotač i deo srednje kore	Parcijalni rastop omotača i/ili donje kore (bez vode)	Parcijalni rastop omotača i frakciona kristalizacija
Mehanizam stapanja	subdukcija: energija: prenos fluida i stopljenih delova ploče u klin, stapanje klina, prenos toplote nagore		Tektonsko zadebljanje plus radioaktivno krusalno zagrevanje	Krusalno zagrevanje plus zagrevanje omotača (uzdizanje astenosfere i magmi)	Topla tačka i/ili adijabatsko dizanje omotača	

Slika 636. Podela granitoida prema tektonskoj sredini stvaranja
(*Pitcher, 1982, 1993, Barbarin, 1990*)

Tektonika ploča ima „glavnu” ulogu u stvaranju najvećeg dela silikatnih (kiselih) magmatskih stena, posebno na granicama ploča koje se međusobno podvlače, gde je „veliki broj mogućih izvora” njihovog stvaranja mnogo veći nego na grebenima i u riftnim zonama.

Granitoidni pojasevi su „široko” rasprostranjeni u kontinentalnoj kori od arhaika do tercijara i imaju različit sastav. Stariji, fanerozojski granitoidi se uglavnom nalaze duž kontakta (subdukcija) okean–kontinent ili u zonama sudara (kolizije) kontinent–kontinent. Geohemijski su različiti, što geolozima omogućava da „dodele” tektonski kontekst starim granitima čak i bez „drugih geoloških dokaza”, ali treba biti obazriv i korektan u interpretaciji rezultata.

Generalno, granitoidi se, prema vremenu stvaranja u odnosu na tektonske pokrete, dele na:

1. **orogene** i
2. **anorogene**.

NAPOMENA: Termini *orogeni* i *anorogeni* se u literaturi i udžbenicima koriste u različitom značenju i tumačenju. Već smo ih pomenuli u vezi s **ISMA** klasifikacijom. U ovom poglavlju podrazumevaju odnos vremena i tektonskih procesa koji su stvorili granite.

Orogeni granitoidi su definisani kao stene koje nastaju tokom stvaranja „planina”, odnosno kompresionih naprezanja povezanih sa subdukcijom u ostrvskim lukovima, vulkanskim lukovima ili sutur zonama (sudarima kontinenata) itd.

Unutar orogenih područja graniti mogu biti sinhroni (sinkinematski) sa subdukcijom ili se stvaraju u kasnijim fazama (postorogeni, **anorogeni**) u kolizionim zonama.

V.13.1 GRANITOIDI U AKTIVNIM KONTINENTALNIM MARGINAMA

U okviru proučavanja granitoida važno je razmotriti nastanak ovih stena u aktivnim kontinentalnim marginama jer se smatra da se u njima stvaraju najveće mase ovih stena.

Od dubinskih stena dominiraju granodioriti i kvardioriti, a od vulkanskih andeziti i daciti. Lanci stratovulkana raspoređeni u izdužene pojaseve iznad zone Beniof predstavljaju najistaknutije vulkanske karakteristike na Zemlji. Po sastavu variraju od bazalta do riolita, pri čemu su andeziti najčešći i najzastupljeniji. Vulkanizam je često veoma eksplozivan, a formiranje kaldera je uobičajeno, praćeno erupcijom rasprostranjenih piroklastičnih tokova i tufova.

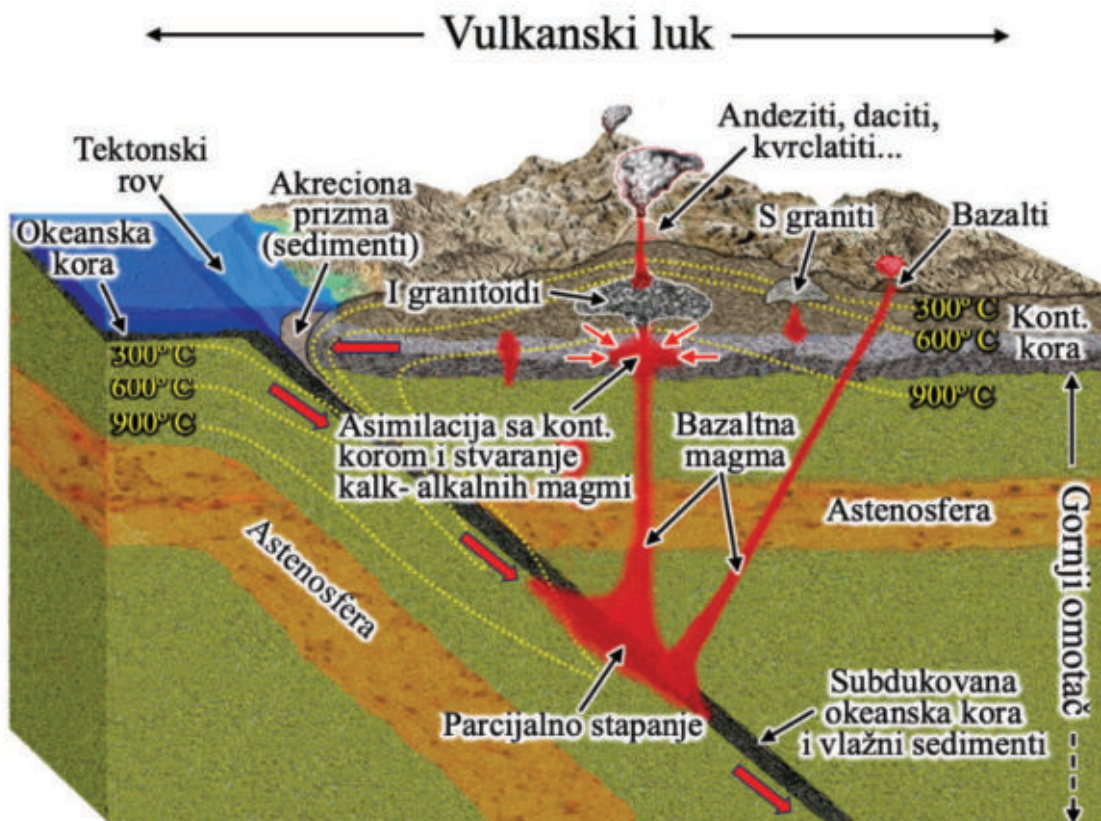
Magmatizam aktivnih kontinentalnih margina je veoma složen, jer je u njihovom stvaranju učestvovao veliki broj stena u različitim geološkim procesima i pri različitim PT uslovima.

Podsetimo se: podvlačenjem okeanske litosfere pod kontinentalnu (koja je manje gustine) nastaje vulkanski ili magmatski luk, koji označava granicu ploča, a na obdukovanoj kontinentalnoj ploči (iznad subdukovane okeanske ploče) nastaje vulkanski luk, koji je udaljen oko 100–300 kilometara od rova. koji je dubine nekoliko kilometara. Magmatizam se javlja na hiljadama kilometara dužine, paralelno sa rovom i obično upravno na pravac subdukcije (*Gill, 1981*).

Na svim aktivnim konvergentnim marginama (zonama subdukcije), struktura i sastav su slični. Međutim, teško je prikazati „sveobuhvatni” jedinstveni vulkanski luk, jer se na našoj planeti ne javljaju dva „ista”.

Generalno, stvaranje magme u bilo kom okruženju počinje na mestima gde temperatura prelazi solidus različitih tipova stena. Subdukcija je obično praćena dehidracijom i parcijalnim stapanjem stena gornjeg omotača koje se nalaze iznad nje. Tokom subdukcije se takođe transportuju i deponuju velike količine sedimenata koji se „suljaju” u rov (pomenuli smo „narastajući klin”) i takođe utiču na parcijalno stapanje i formiranje magmi određenog sastava.

Prilikom subdukcije (podvlačenja) okeanska litosfera prolazi kroz seriju metamorfnih promena, od zelenih škriljaca do eklogitske faze. Tokom ovih procesa se oslobađa voda, koja snižava temperature metamorfnih procesa i delimično doprinosi i „pomaže” parcijalnom stapanju. Formira se magma, koja se kreće prema površini i prolazi kroz debelu kontinentalnu koru, reaguje sa njom, tu se i smešta stvarajući magmatske komore (slika 637).



Slika 637. Stvaranje granitoida u vulkanskom luku

Posebno važnu ulogu imaju „stare” kontinentalne stene (gnajsevi, mikašisti, amfiboliti, eklogiti itd.) sa „prepoznatljivim” izotopskim karakteristikama koje se odražavaju i na formirane magme.

Mlađi sedimenti, uglavnom peščari i gline koji se nalaze u akrecionoj prizmi ili na subdukovanoj okeanskoj kori, takođe imaju različite izotopske sastave u odnosu na nastale magme. Velike količine kisele magme u vulkanskim lukovima zahtevaju značajan doprinos toplote iz omotača i kontinentalnih izvornih stena kako bi se postiglo parcijalno stapanje.

Nastale magme se uzdižu i prolaze kroz stene kontinentalne kore, neizbežno se kontaminiraju, asimiliraju i na kraju kristališu (poznati proces asimilacije i frakcione kristalizacije – AFC (*DePaolo, 1981*). Zbog toga, formirane magme generalno imaju visoke sadržaje SiO_2 , alkalija (Na_2O i K_2O), **Sr**, **Rb**, **Ba**, **Zr**, **Th** i **U**, visoke odnose **K/Rb** i **Fe/Mg**, kao i širi opseg sadržaja izotopa $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ i **Pb** itd. u odnosu na magme formirane u drugim tektonskim sredinama. Hemijski sastav intruzivnih stena znatno manje varira u odnosu na sastav vulkanskih stena aktivnih kontinentalnih margina.

Sadržaji **MgO**, **CaO** i Al_2O_3 u odnosu na SiO_2 u dubinskim stenama imaju linearan trend koji ukazuje na frakcionu kristalizaciju bojenih minerala i plagioklasa. Granitoidne magme (i lave) su bogatije silicijumom (SiO_2) u poređenju sa magmama u ostrvskim lukovima. U njima uglavnom dominiraju kalk-alkalne stene. Značajan uticaj na hemijski sastav formiranih magmi imaju i pomenuti akrecioni klinovi, koji su većinom sastavljeni od sedimentnih stena. Bogati su elementima **LILE** i **LREE**, fluidima i relativno osiromašeni **FeO**, **MgO**, **HFS** i **HREE** (*Miyashiro, 1974; Pearce i dr., 1995*). Toplotni tok u zoni subdukcije ima veliki uticaj na formiranje magme. Generalno, sistem je topliji kada je brzina subdukcije sporija. Numerički modeli Pikkoka (*Peacock, 1991*) ukazuju na to da mlada, topla okeanska kora sa sedimentima može delimično da se subdukcijom stopi dok „ponire” u gornji omotač. Sa druge strane, starija, hladnija kora uglavnom dehidrira i oslobađa fluide, koji smanjuju tačku topljenja i dovode do parcijalnog stapanja stena omotača. Izraz **MASH** se koristi za različite kombinacije topljenja, asimilacije, skladištenja i homogenizacije koje mogu nastati u baznoj kori. Samo tokom epizoda ekstenzivnog režima, „primitivnije” magme će verovatno izbiti na površinu (izliti se) kroz rasede u tankoj koru kontinentalnog luka. Kroz navedene procese magma dobija kalk-alkalni sastav. Formiraju se veliki voluminozni plutoni granodiorita, diorita, granita, tonalita, koji rashlađivanjem „prelaze” u ogromne batolite (poput Sijera Nevade, u kojoj se nalazi „stotine” plutona navedenog sastava). Izlivena magma (lava) jesu andeziti, daciti, latiti, rioliti itd., koje imaju porfirsku strukturu i obično su praćeni eksplozivnim erupcijama. Nastale stene, kao što smo pomenuli, imaju povećane sadržaje K_2O , **Rb**, **Cs**, **Ba**, **Th** i **LREE** itd. i bogate su izotopima za koje se smatra da potiču iz kontinentalne kore, što ukazuje na njen značajan uticaj u procesu magmatizma vulkanskih lukova.

Sadržaji radiogenih izotopa **Sr**, **Nd** i **Pb** takođe se koriste kao petrogenetski indikatori, iako magme generisane u subdukcionim zonama, zbog kontaminacije i

asimilacije sa okolnim stenama, mogu naslediti izotopni sastav kontinentalne kore ili subdukovanih terigenskih sedimenata. Vulkanske stene aktivnih kontinentalnih margina imaju visok sadržaj odnosa izotopa $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, od 0.703 do 0.710, zbog prisustva kontinentalne kore (kontaminacije, asimilacije) u njihovom formiranju. Sadržaj istih izotopa u bazaltima ostrvskih lukova je niži i ujednačen, od 0,702 do 0,705.

Postoji, međutim, još uvek mnogo pitanja bez odgovora. U kojoj meri se okeanska ploča (litosfera) topi, ili je njen „doprinos” samo u obliku temperature koja uzrokuje topljenje kontinentalne kore? Koliko je heterogen klin omotača iznad zone subdukcije i koliki je stepen parcijalnog stapanja? Kakav je sastav potkontinentalnog litosfernog omotača i kako se on obogaćuje? Koliko je „univerzalan” sastav područja subdukcione zone sa visokim odnosom elemenata **LILE/HFS** i da li je zaista pouzdan pokazatelj magmatizma subdukcione zone? I tako dalje.

Seizmička istraživanja ukazuju na sličnu heterogenost. Sve ove varijable predstavljaju veliki izazov za svakog istraživača. Svaki vulkanski luk je na neki način „jedinstven” za istraživanje, koje mora biti multidisciplinarno.

Prva faza stvaranja granitoida u vulkanskim lukovima se smatra vezanom za parcijalno topljenje stena gornjeg omotača, kada se formira bazaltna magma, koja se smešta u donji deo kontinentalne kore, gde se odvijaju procesi kontaminacije, asimilacije, priliva fluida itd.

Formiraju se granitoidi tipa **I**, koji su uglavnom metaluminijski do peraluminijski i po sastavu odgovaraju tonalitima, granodioritima, uz širok spektar ostalih granitoida. Hemijska i strukturna kompleksnost kore može doprineti formiranju **S** granitoida, koji su metaaluminijski, a ponekad nastaju čak i gabrovi i dioriti tipa **M**. Prostorna i vremenska povezanost ovih plutona sa vulkanitima ukazuje na to da su oba rezultat iste magmatske i orogene aktivnosti.

Neki istraživači smatraju da je stapanje gornjeg dela kontinentalne kore i stvaranje granitoidnih magmi „lako”. Dovoljna je toplota bazaltne magme koja se utiskuje kroz nju i delimično se topi. One asimiliraju okolne gnajseve, mikašiste, klastične stene itd., kada se stvara tonalitska magma koja je dovoljno „laka” da se popne do plicjeg nivoa, gde dalje frakcioniše i očvršćava, dajući kiselije stene.

U području subdukcije smatra se da je kontinentalna kora debljine do 70 km, kroz koju nastala magma mora proći i sa kojom reaguje, menjajući svoj sastav. Manja gustina kontinentalne kore usporava kretanje magme ka površini, kada se ubrzava njena diferencijacija, kontaminacija, asimilacija itd., te postaje kiselija, odnosno granitoidnog sastava.

U prilog pomenutom govori to da se donji deo kontinentalne kore, izgrađen od eklogita, granulita, tj. stena bazičnog (bazaltnog) sastava, parcijalno ne stapa zbog visoke PT stabilnosti. Međutim, postoje mišljenja da su oba slučaja moguća. Veći deo magme, smatra se, nikada ne izlazi na površinu, već je zarobljen u magmatским komorama, gde se hladi i kristališe. Zbog toga ima znatno više (po pojedinim autorima i 20 puta) intruzivnih stena, kvarcdiorita, diorita, granodiorita itd., nego vulkanskih stena (andezita, dacita itd.), koje često izbijaju eksplozivnim erupcijama.

Pomenute, posebno intruzivne granitoidne stene, važne su za proučavanje razvoja kontinentalne kore i jedan su od glavnih mehanizama njenog rasta, najvećim delom lateralno ili vertikalno „dodavanjem” intermedijarnih i kiselih stena.

Duž kontinentalnih lukova, posebno u delovima gde je vulkanizam prestao, dolazi do erozije koja otkriva plutone, delove vulkana, tj. njihove magmatske komore. Oni su uobičajeni u okruženju vulkanskog luka i pokazatelji su drevnih aktivnih subdukcionijskih granica podvlačenja, gde one više nisu prisutne zbog mlađih tektonskih procesa.

Pomenimo da se neke stene subdukcijom ne „recikliraju” i da, prema pojedinim autorima, mogu da poniru duboko, sve do granice spoljašnjeg jezgra i donjeg omotača, gde se stapaju i stvaraju plume, „kapljice”, koje se vraćaju iz dubokog sloja „D” na granici spoljašnjeg jezgra i donjeg omotača i izlivaju se kao bazalti (poput Havaja). Vratimo se „plitkim” geološkim procesima i stvaranju granitoida.

Petrografija i prikaz geohemije magmatskih stena kontinentalnih lukova pružaju važne podatke o njihovom nastanku i formiranju, ali neki procesi još uvek su nedovoljno poznati i jasni. Međutim, istraživanje vulkanskih lukova predstavlja veliki izazov za svakog geologa (slika 638).



Slika 638. Položaj glavnih subdukcionijskih zona na Zemlji

Vulkanski (magmaški) lukovi smatraju se najkompleksnijim geološkim područjima na Zemlji. Oni su „stari” orogeni pojasevi koji su u geološkoj prošlosti, kombinacijom tektonskih pokreta, metamorfizma, vulkanizma i plutonizma stvoreni, a i danas stvaraju, velike planinske lance. Za njihovo formiranje bilo je potrebno mnogo stena okeanske i kontinentalne kore. Magmae koje su nastale u ovom okruženju (tektonskoj sredini) danas se javljaju duž zapadne obale Severne i Južne Amerike, Japana, Novog Zelanda, duž Egejskog mora itd. Vulkani su česti, a neki

od njih su dovoljno erodovani da otkriju batolite granitoida (sastava od kvarcdiorita do granita) koji su se formirali ispod vulkana („bivše” magmatske komore). Oni su sastavljeni od brojnih plutona, koji su i važni izvori metala, poput bakra, zlata, molibdena itd. Ovi batoliti su najveća magmatska tela na našoj planeti (npr. zapadni deo Kanade, Kalifornija itd.), a zajednički se nazivaju Kordiljeri. Prosečno, sastav plutona u vulkanskim lukovima je više diferenciran (kiseliji) od vulkanita, koji su dacitsko-andezitskog sastava, a koji su znatno ređi. Gabrovi i kvarcdioriti, tonaliti, su manje zastupljeni u odnosu na kvarcmonconite, monconite, granite itd.

Bazalti su retki u aktivnim kontinentalnim marginama. Oni su „lakši” od omotača, ali manje gustine od kore, pa se može očekivati da ih ima u donjim delovima vulkanskog luka.

Subdukcione zone su glavna su mesta gde se „rađaju” najdublji i najjači zemljotresi, kao i eksplozivni vulkanizam. Znamo da se neki od velikih gradova na svetu nalaze na aktivnim kontinentalnim marginama ili blizu njih, zbog čega je razumevanje geoloških procesa i iz njih proisteklih opasnosti važno za sigurnost miliona ljudi. Ove granice ploča su i mesta deponovanja najvećih prirodnih resursa metala, zlata, bakra itd. Vulkanizam povezan sa subdukcijom takođe se javlja na Mediteranu (Etna, Stromboli) u aktivnoj kontinentalnoj zoni sudara, koja se proteže od Alpa preko Turske i Irana do Himalaja.

Jedna od „najboljih” (za geologe najvažnijih) aktivnih kontinentalnih margina na našoj planeti su Andi. U tekstu koji sledi prikazaćemo je detaljnije.

V.13.1.1 ANDI, VULKANSKI (MAGMATSKI) LUK, AKTIVNA KONTINENTALNA MARGINA

Od „ranih” dana tektonike ploča, južnoamerički Andi se navode kao klasičan primer subdukcije okeanske litosfere pod kontinentalnu, tj. kao aktivna kontinentalna margina, kada se stvara magmatski, tj. vulkanski luk. Andi su „prirodna” laboratorija za proučavanje interakcije (mešanja) magmi. Ujednačenost sastava ukazuje na „intimnu vezu” različitih procesa koji su stvorili magmu, naravno uz „pomoć” fluida.

U poređenju sa severnom Amerikom, južnoamerička aktivna kontinentalna margina je „jednostavnija” za objašnjenje procesa nastanka magmi, zbog čega se u udžbenicima često koristi kao klasičan model, u kojem se najvećim delom stvaraju prelazne i kisele stene. Podsetimo se da su Andi i Kordiljeri dužine oko 10.000 km, što ih čini najdužim planinskim lancem na Zemlji. Lave su obično dacitsko-andezitskog sastava i mogu biti izlivene i na nadmorskim visinama od 6000 m.

Magmatizam Anda je složen. Da bi se razumeo i objasnio, potreban je veliki broj različitih geoloških i geofizičkih podataka, što zahteva zajednički rad velikog broja geologa i značajna materijalna sredstva.

Vulkanizam unutar Anda podeljen je u tri zone (*Thorpe, 1982*):

1. **severna vulkanska zona (NVZ)**, koja se proteže od 5°N do 2°S u Kolumbiji i Ekvadoru;
2. **centralna vulkanska zona (CVZ)**, koja se proteže od 16°S do 28°S u južnom Peruu, severnom Čileu, Boliviji, i
3. **južna vulkanska zona (SVZ)**, u južnom Čileu i Argentini.

U svakoj od pomenutih zona vulkanizam je povremen (nije stalno prisutan) još od mezozoika. Lave u NVZ-u su dominantno andezit-bazalti i andeziti, dok su lave u SVZ-u nešto bazičnije, bazalti sa manje andezit-bazalta.

Lave u CVZ-u su srednje kisele do kisele, sa značajnim povećanjem sadržaja K_2O (pri konstantnom SiO_2) sa povećanjem dubine do zone Beniof. Jedna od „očiglednih” razlika između pomenutih zona je pojava prekambrijske podine ispod CVZ-a, dok su ispod NVZ-a i SVZ-a prisutne mnogo „mlađe” mezozojsko-kenozojske stene.

Među aktivnim zonama, ugao subdukcije je nešto manji u SVZ-u, tako da je dubina od vulkanskog luka do zone subdukcije samo 90 km, u odnosu na približno 140 km u NVZ-u i CVZ-u.

Zašto je aktivni vulkanizam ograničen na strme segmente nije jasno, ali može biti povezan sa prisustvom astenosfernog omotača u tim segmentima.

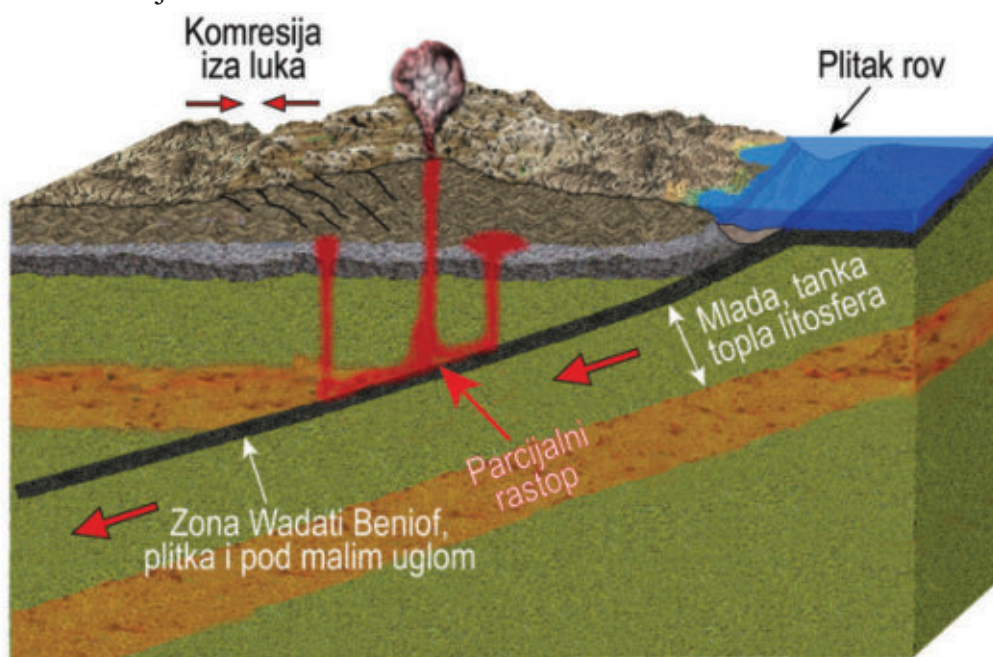
Andske magme nastale su složenim procesima parcijalnog stapanja i frakcionacije kristalizacije unutar omotača, kao i procesima kontaminacije, asimilacije i frakcionacije kristalizacije unutar kontinentalne kore. Mnogi andski vulkaniti sadrže elemente u tragovima i izotopski zapis kontinentalne kore kroz koju su prošli, ali to takođe može biti „nasleđeno” od subdukcije terigenih sedimenata, što, nažalost, nije moguće razdvojiti.

Jedna od karakteristika andskog magmatizma je i „bliska” prostorna veza između kalkalkalnih vulkanita i plutonskih stena (diorita, kvarcdiorita, granitoida), za koje se smatra da su koreni vulkana. Genetski, vulkanske i plutonske asocijacije moraju biti povezane, iako je, prema mnogim autorima, teško „pomiriti” dominantni andezitski sastav lava sa batolitima (intruzivnim stenama), koji imaju veći sadržaj silicije (količinu SiO_2 u steni).

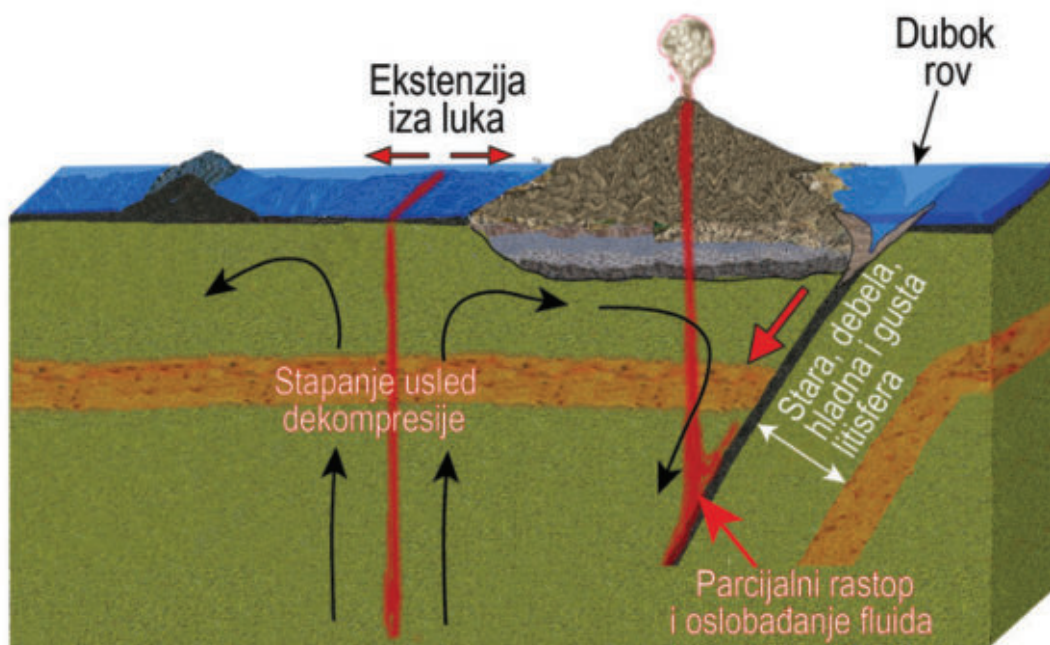
Jedan od najvećih batolita je „primorski” batolit u Peruu, koji se proteže na dužini od preko 1600 km i širini od 60 km, obuhvatajući više od 1000 plutona formiranih u rasponu od 60 miliona do 37 miliona godina. Većina tih plutona je smeštena ispod površine od „samo” 3–4 km (*Pitcher i dr., 1985*). Tonaliti i granodioriti (granitoidi) prevladavaju, povezani sa bazaltnim, andezitskim i dacitskim dajkovima.

Batolit prati jasno tektonsko-strukturni raspored koji je odredio kretanje i smeštaj magme. Slični granitni pojasevi javljaju se duž celokupne zapadne kontinentalne obale Amerike, od Aljaske do Antarktika, a formirani su u mezozoiku i tercijaru. Smatra se da vrsta i intenzitet magmatizma i vulkanizma, kao i njihov položaj u aktivnim kontinentalnim marginama zavise i od ugla subdukcije,

koji značajno utiče na pojedine geološke procese. Kada je ugao subdukcije mali, magmatizam je slab ili izostaje (slika 639), i u velikoj meri se odvija daleko od rova (čileanski tip subdukcije). To sprečava reciklažu omotača u klinu, zbog čega ostaje najvećim delo nestopljen. Čak i unutar jedne subdukcione zone, ugao se može menjati i značajno uticati na parcijalno stapanje, jačinu zemljotresa, hemijski sastav magme, položaj luka itd. Ako je ugao subdukcije veći (strmiji, slika 640), magmatiski luk je bliži tektonskom rovu (marijanski tip subdukcije), što može dovesti do stvaranja basena iza luka.



Slika 639. Magmatizam pri malom uglu subdukcije (Stern, 2002)



Slika 640. Magmatizam pri velikom uglu subdukcije (Stern, 2002)

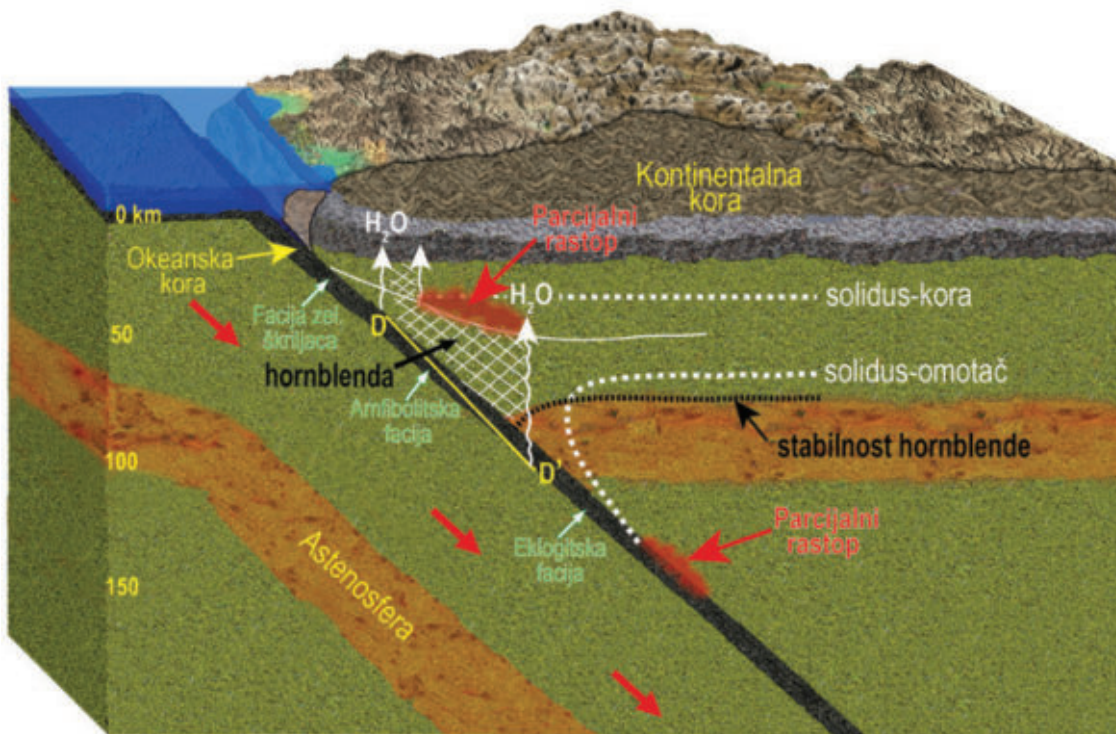
Podsetimo se da je tokom stvaranja Anda bilo značajnih promena ugla subdukcije, što se odrazilo i na položaj vulkanskog luka ili, bolje reći, vulkanskih lukova. To je u određenom trenutku uzrokovalo „reorganizaciju” kretanja ploča i uticalo na stvaranje i sastav magmi itd. Najmanji uglovi subdukcije su prisutni ispod čileanskih Anda („čileanski tip”; *Stern, 2002*), dok su najstrmiji uglovi prisutni ispod luka Izu-Bonin-Marijana (IBM) u zapadnom Pacifiku („marijanski tip”).

ZAKLJUČIMO!

Opšteprihvaćene hipoteze u okviru proučavanja aktivnih kontinentalnih margina, tj. vulkanskih lukova, praćene su „pominjanjem” Anda. Prema većini istraživača, vulkanizam se javlja samo kada je ugao veći od oko 25°. Interesantna opservacija je da se, bez obzira na velike varijacije u uglu subdukcije i brzini podvlačenja, vulkanski front obično nalazi na oko 100–150 km iznad zone Vadati-Beniof (engl. *Wadati-Benioff zone*).

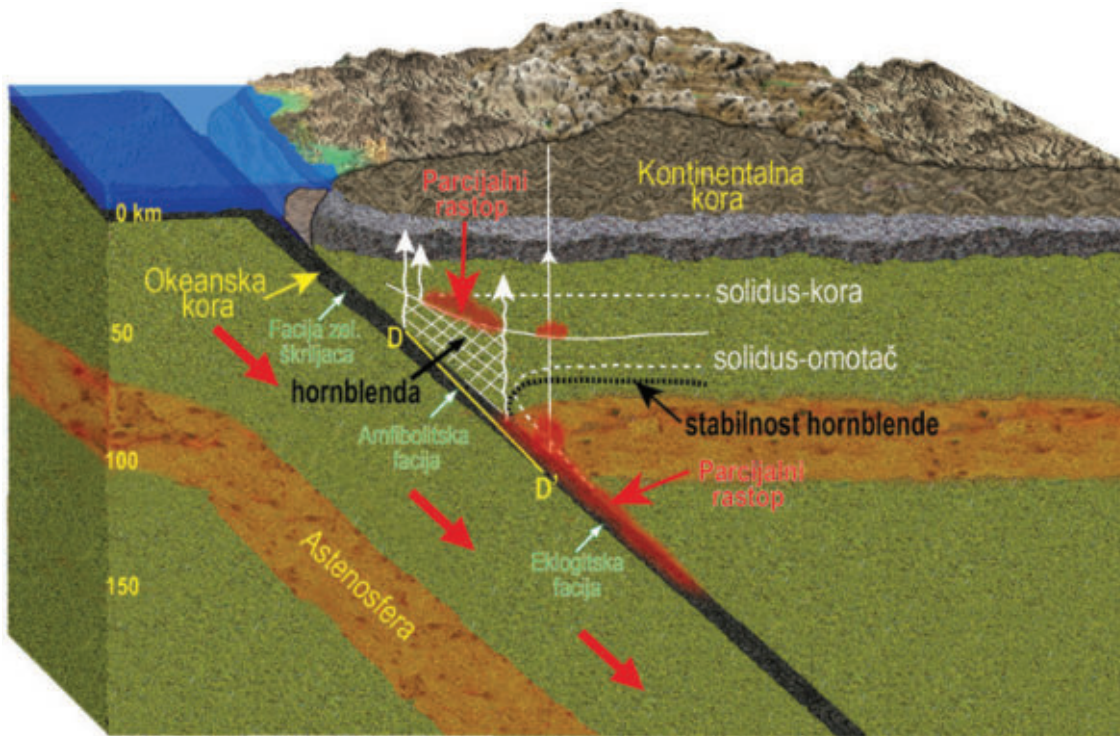
„Stara”, hladna, gusta litosfera pogoduje strmoj subdukciji, dok „mlađa”, toplija, „bujnija” litosfera stvara pliće subdukcione zone.

Veliki ugao subdukcije „ublažava” (smanjuje) stepen stapanja „debelih” klinastih delova omotača u gornjoj ploči. Blaži, manji ugao subdukcije „dozvoljava” (olakšava) procese parcijalnog stapanja. Raznolikost stvorenih magmi (stena) zavisi i od termalne strukture vulkanskog luka. Na slici 641 prikazani su položaji temperature parcijalnog stapanja za „hladnu”, a na slici 642 za toplu subdukovanu okeansku litosferu, u prisustvu H_2O , za glavne izvore parcijalnog stapanja. „Dodavanjem” fluida podstiče se parcijalno stapanje, pri čemu se stvaraju magme različite



Slika 641. Parcijalno stapanje za hladnu subdukovanu litosferu (Wyllie, 1984)

tog sastava. Stoga je „nerealno” očekivati jednostavan opšti model koji bi objasnio sve karakteristike procesa njihovog stvaranja i nastajanja. Linija **D–D’** označava početak značajne dehidracije unutar ploče, što odgovara uslovima facije zelenih škriljaca do amfibolitske facije.

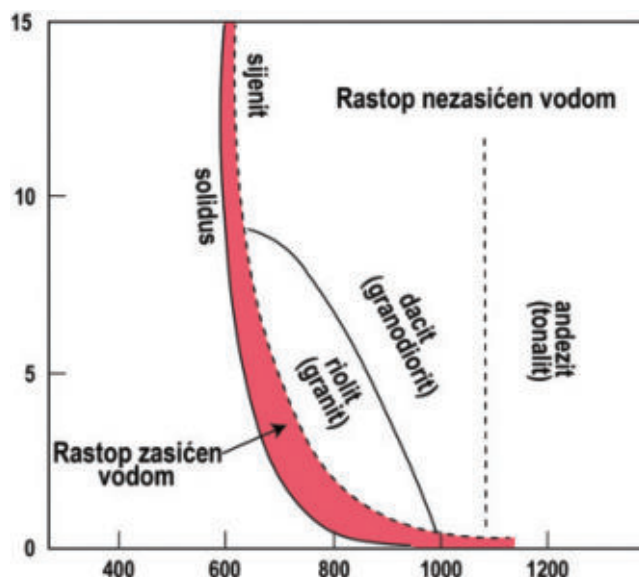


Slika 642. Parcijalno stapanje za toplu subdukovanu litosferu (Wyllie, 1984)

Oslobođeni fluidi „ulaze” u bazu (podlogu) kontinentalne kore, gde „pomažu” (smanjenjem temperature solidusa) i podstiču parcijalno stapanje. Isprekidana linija na svakom dijagramu pokazuje maksimalnu dubinu stabilnosti amfibola. Samo u „modelu” toplije subdukovane litosfere (slika 642) dolazi do intenzivnijeg parcijalnog stapanja omotača. Stvorene magme se mogu mešati sa kiselim magmama nastalim parcijalnim stapanjem kontinentalne kore. Ovaj „topli” model se može smatrati opšteprihvaćenim i za opisane Ande. Ako subdukovana okeanska kora sadrži značajan udeo kontinentalnih terigenih sedimenata, takođe dolazi do kontaminacije i „mešanja” geohemijskih svojstava u nastaloj magmi. U ovom slučaju, izotopi kiseonika su posebno korisni za rešavanje problema.

Na slici 643 prikazan je raspon sastava parcijalnih rastopa nastalih u kontinentalnoj kori (uglavnom gnajseva) u prisustvu H_2O .

Za stvaranje riolita potreban je uski temperaturni interval na niskim pritiscima i svim dubinama. Za stvaranje andezitskih i dacitskih magmi potrebne su znatno više temperature i dubine. Veći pritisak daje rastope sa nižim sadržajem SiO_2 . Iz navedenog se može zaključiti da je deo kiselih magmi Anda stvoren direktnim parcijalnim stapanjem kontinentalne kore.



Slika 643. Sastav rastopa nastao parcijalnim stapanjem kontinentalne kore (Wyllie, 1984)

Pomenimo da u područjima „dugotrajnog” magmatizma termički efekti bazaltne magme na okolne stene postaju značajni i mogu uzrokovati jači anateksis (parcijalno stapanje) kore, kada nastaju silicijumom bogatije magme, ignimbritske erupcije itd. One se mogu mešati sa magmama stvorenim u omotaču i stvarati nove. Stapanje sedimenata na vrhu subdukovane ploče takođe doprinosi ovom procesu, kada se stvaraju magme bogatije inkompatibilnim mikroelementima. Mala varijacija na ovu temu je dodavanje fluida u bazi (podlozi) ploče, kada dolazi do parcijalnog stapanja sedimenata i stvaranja kiselijih magmi bogatih vodom. Ovaj proces pomaže stvaranju mnogo veće količine magme generisane stapanjem u klinu. Tako nastala magma se uzdiže, često uz kontaminaciju sa korom iznad, i izlazi na površinu, gde se izliva kao kisela do, retko, intermedijarna lava.

Postojanje plitkih magmatskih rezervoara u kontinentalnoj kori ispod aktivnih vulkana dokazano je geofizičkim proučavanjima, ali i na osnovu petroloških dokaza, frakcione kristalizacije, geochemije, termodinamike stabilnosti glavnih minerala, prisustva erodovanih plutona itd.

Za područje Kamčatke postoje dokazi da se magmatski rezervoari nalaze na dubini od 30–90 km, sa dimenzijama između 8 km i 40 km širine i do 30 km debljine. Međutim, postoje i plići rezervoari, koji se protežu do oko 10 km dubine i koji su povezani sa dubljim rezervoarima magme. Takođe treba pomenuti da su u kori centralnih Anda izmerene zone niskih brzina seizmičkih talasa na dubinama od 10 km i 35 km, koje Okala i Mejer (*Ocala i Meyer, 1972*) tumače kao potencijalne zone skladištenja magme.

V.13.2 GRANITOIDI U OSTRVSKIM LUKOVIMA

Granitoidi se javljaju i u područjima subdukcije (podvlačenja) okeanske ploče ispod okeanske kore, kada se stvara ostrvski luk. Pomenimo pojave na Aleutskim i Kurilskim ostrvima, Karibima, Filipinima i Solomonskim ostrvima (*Pitcher, 1982*). Ove stene imaju nizak sadržaj SiO_2 i po sastavu su kvarcdioriti i tonaliti. Na nezrelim lukovima dominira toleitski magmatizam, sa nekoliko evoluiranih (diferenciranih) plutona, dok su u zrelih lukovima kalk-alkalnog sastava.

Zreli lukovi imaju kalk-alkalne plutone. Kao i njihovi vulkanski pandani, ovi granitoidi uglavnom nastaju parcijalnim stapanjem klinastog omotača iznad subdukovane okeanske ploče, koje je uzrokovano prodorom fluida iz ploča. Nastaju tipični granitoidi tipa **M** (iz omotača), mada je verovatno da će doći do kasnije hibridizacije (uticaja fluida) i promene sastava.

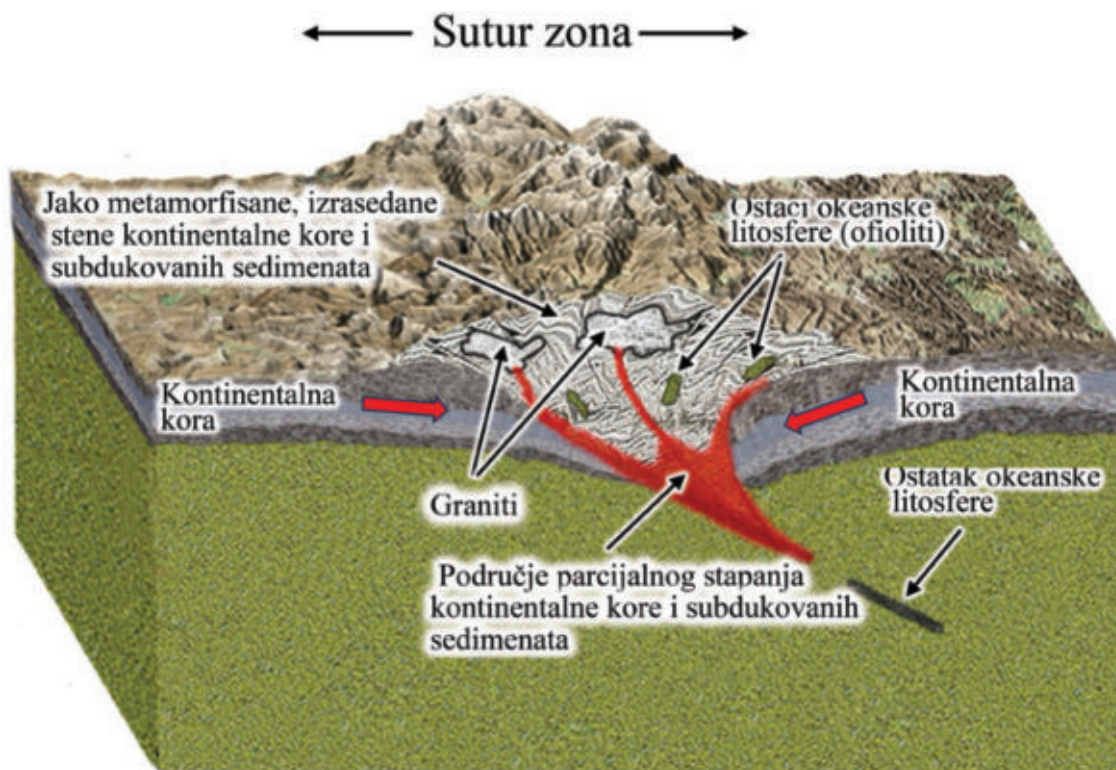
V.13.3 KONTINENTALNE KOLIZIONE ZONE

Krajnji proizvod (poslednja faza) subdukcije je sudar kontinenata, tzv. suturna zona, sa dramatičnim potiskivanjem, savijanjem i zadebljanjem kore. Ovo rezultira parcijalnim stapanjem pri kojem se formiraju granitoidi, koji se koriste za rekonstrukciju geoloških događaja. U suturnim zonama takođe se javljaju značajni metamorfni procesi. Drevni primeri sudara kontinent–kontinent su paleozojski hercinski orogeni u južnoj Evropi i proterozojski Grenvil (*Grenville*) orogeni u istočnoj Kanadi.

Klasičan lokalitet sutur zone su Himalaji, nastali sudarom indijskog potkontinenta i dela azijskog kontinenta pre oko 55 miliona godina (slika 644). Pretpostavlja se da je subdukcijom oko 1000–1500 km okeanske kore „pojeden” i da je dva puta „zadebljana” kontinentalna kora (na oko 80 km) tokom formiranja Himalaja, tibetanske visoravni i drugih oblasti. Plutonska aktivnost u ovom regionu je raspoređena u nekoliko pojaseva s ogromnim batolitima, koji čine lanac od brojnih plutona.

Vulkanski luk koji je postojao pre sudara pomenutih kontinenata je ugašen kada je subdukcija okeanske kore prestala, pa nema direktne vulkanske aktivnosti povezane s ovim procesom. Međutim, treba napomenuti da se u području Tibeta javljaju kalijske mafitske lave, a lokalni peraluminijски rioliti mogu biti povezani sa tektonikom rastezanja u gravitaciono nestabilnoj kori.

Rani miocenski magmatizam (oko 20 miliona godina) u Himalajskom orogenu uglavnom je predstavljen granitnim plutonima i velikim brojem manjih intruzivnih tela, dajkova itd., koji formiraju lanac intruzija dužine oko 2000 km. Po sastavu su uniformni, leukograniti S-tipa. Parcijalno stapanje, smatra se, uglavnom je izazvano oslobađanjem fluida iz zagrejanih okolnih stena, manje verovatno zbog smicanja ili dekompresije već vruće i debele kore.



Slika 644. Graniti u kolizionim zonama

Hausman (*Houseman i dr., 1981*) smatraju da se tokom sudara, orogeneze, zadebljani deo kontinentalne kore (litosfere) može odvojiti i potonuti. Tokom ovih procesa, on može biti zamenjen vrelim astenosferskim omotačem, koji se delimično stapa dok se diže, stvarajući postorogene magme nakon prestanka sudara.

Međutim, kolizionni procesi, smatra se, uglavnom se javljaju na relativno malim dubinama, pri čemu dolazi do parcijalnog stapanja i formiranja magmi bogatih SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O itd. Dominantne su plutonske stene graniti, uglavnom peraluminijski do metaaluminijski (poreklom uglavnom od sedimenata). U sutur zonama dominiraju S graniti. Od vulkanskih stena javljaju se rioliti, riodaciti, andeziti, šošoniti (nastaju najdalje od rova gde asimiliraju veću količinu K_2O i Na_2O dok se dižu kroz kontinentalnu litosferu do površine gde se izlivaju) i alkalni bazalti (nastaju usled stapanja stena gornjeg omotača).

Vulkanske erupcije su uglavnom eksplozivne, pri čemu se formiraju piroklastične stene, breče, aglomerati i tufovi, ponekad i staklaste (neiskristalisane) stene. Postoje i starije sutur zone, koje su uočene i u Kordiljerima, Alpima itd. Zone kretanja su prepoznate po zonama šavova, zonama raseda, koje razdvajaju terene različite geologije, paleofaune i/ili magnetizma.

Magmatizam je dodatni ključ za prepoznavanje sutur zona. Magmatizam kontinentalnog luka se morao dogoditi pre sudara, pa se može koristiti i za određivanje položaja i mesta sudara kontinenta (suturne) zone. Tu su i paleomagnetizam, stare tektonske strukture itd. Sudarom dve ploče (kolizionna zona) dolazi do sta-

panja, ali ovim procesom može se stvoriti nova subdukciona zona iza jednog od kontinenata ili globalno tektonsko preuređenje ploča.

V.13. 4 ANOROGENI GRANITOIDI

Anorogeni granitoidi se javljaju u velikim rasedima, pukotinama (riftovi unutar okeanske ili kontinentalne ploče) ili su povezani sa uzdizanjem magme iz omotača (toplom tačkom). Takođe postoje i „**prelazni**” granitoidi, koji se javljaju između orogenih i anorogenih magmatskih događaja. Ove stene su pomalo „enigmatične” jer se formiraju u orogenom pojasu između 10 i 100 miliona godina nakon prestanka pritiska i deformacije. Obično se javljaju tokom perioda sudara u područjima s debljom korom (sutur zone). Neki istraživači takođe izdvajaju **postorogene** granitoide, koji ne pružaju informacije o događaju koji ih je stvorio.

Anorogeni granitoidi se javljaju u sredinama koje nisu genetski povezane sa kompresivnim orogenima. U ovu grupu spadaju graniti koji se formiraju u srednjeokeanskim grebenima, okeanskim ostrvima, ekstenzionim kontinentalnim zonama itd. Prema sredini formiranja, mogu se podeliti na okeanske i anorogene kontinentalne granitoide.

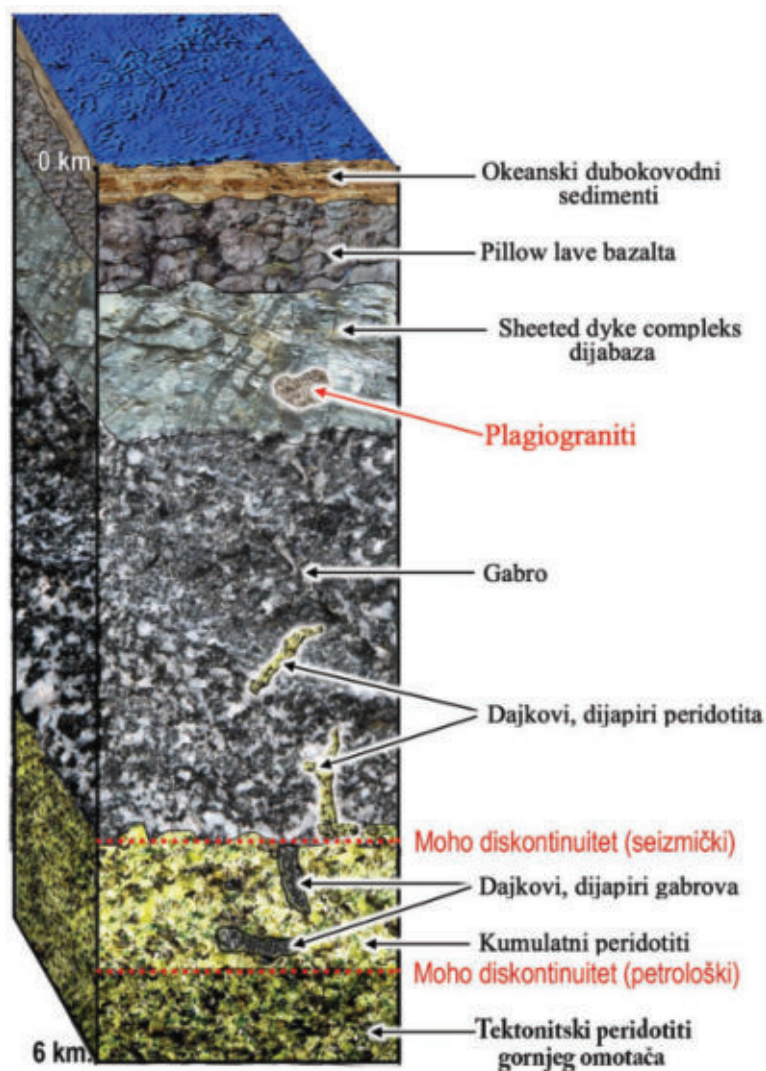
V.13.5. GRANITOIDI U OKEANSKIM GREBENIMA

Najčešći okeanski anorogeni granitoidi su **plagiograniti**, koji se formiraju u okeanskoj kori (slika 645), uglavnom u srednjeokeanskim grebenima. Nastanak granitne magme ekstremnom frakcionom kristalizacijom bazaltnih magmi odvija se lokalno, ali je njihov udeo (10%) premali da bi se dobila značajna količina, osim ako ne postoje gigantski „skriveni” volumeni komplementarnih mafičnih magmi. Ove stene su relativno retke.

Drugi primer su granitoidi okeanskih ostrva. Oba pomenuta tipa granita javljaju se u bazaltnoj okeanskoj sredini, gde je asimilacija sa silicijskim materijalom veoma mala ili nepostojeća. Smatra se da je poreklo granita „najjasnije” u srednjeokeanskim grebenima (riftovima) koji su udaljeni od kontinenata. Dominantan proces njihovog stvaranja je frakciona kristalizacija bazaltnih magmi, koje su delimično iskristalisale. Toleitski trend je najčešći u okeanskim „carstvima” unutar ploča, dok se alkalni tipovi javljaju u alkalnim provincijama, poput ostrva Asension i Reunion.

Plagiograniti (često se koristi i naziv *albitski graniti*) odlikuju se prisustvom kiselog plagioklasa – albita umesto ortoklasa, mikrokлина. Naziv stene su predložili Kolman i Piterman (*Coleman i Peterman, 1975*) i još uvek se široko koristi.

Ove stene su uglavnom srednje zrnaste do fino zrnaste strukture, izgrađene



Slika 645. Položaj plagiogranita u okeanskoj kori

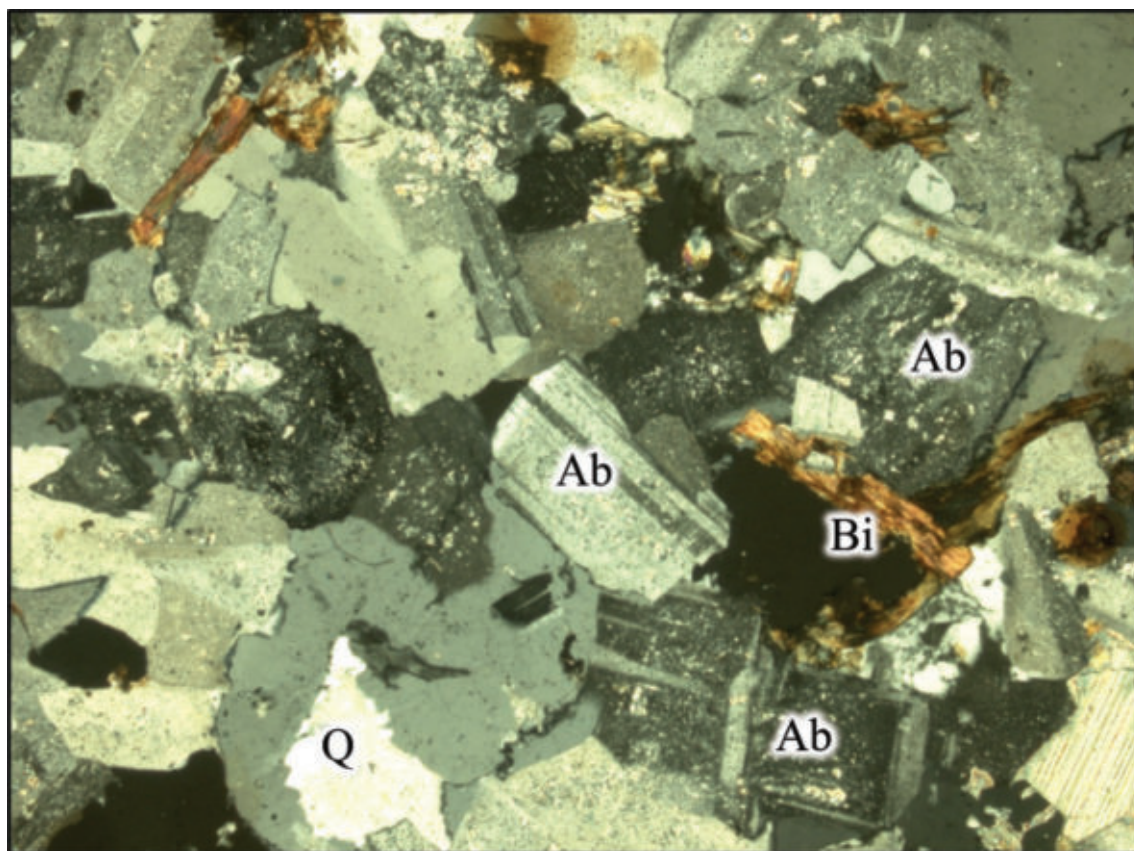
od albita, kvarca, hornblende, biotita i klinopiroksena (retko), sa zanemarljivom količinom **K**-feldspata, koji su uglavnom alterisani. Često sadrže i primarni epidot. Prema klasifikaciji **IUGS**-a, plagiograniti spadaju u tonalite i trondhemite.

Plagiograniti imaju nizak sadržaj **LIL** elemenata: **Rb**, **Ba** i **K**, što je u skladu sa sastavom bazalta srednjeokeanskih grebena (**MORB**). S druge strane, oni su obogaćeni u **Th**, **Nb** i lakim elementima retkih zemalja (**LREE**) u odnosu na teže elemente retkih zemalja (**HREE**). Takođe, imaju izraženu negativnu anomaliju za elemente **P** i **Ti**, nizak sadržaj **Sr** i nema nagoveštaja negativne anomalije za **Nb** (detaljnije o geohemiji granitoida u narednom poglavlju). Plagiograniti (slika 646) javljaju se kao manja tela, često i kao članovi ofiolitskih kompleksa, pri čemu su obično udruženi sa kumulatnim gabrima. U mikroskopu se „lako” prepoznaju po albitu (slika 647).

U ovoj tektonskoj sredini mogu javiti i kvarcdioriti, koji imaju „složeniju” genezu, iako sadržaji izotopa ukazuju na isti izvorni materijal.



Slika 646. Izdanak plagiogranita (označen strelicom) kod Sjenice; gore levo: uzorak stene



*Slika 647. Mikrosnimak plagiogranita kod Sjenice;
Ab = albit, Bi = biotit, Q = kvarc; N+, 50x*

V.13.6 KONTINENTALNI ANOROGENI GRANITOIDI

Jedna od pojava anorogenih granitoida je iznad tople tačke Jeloustonskog parka. Plume emituju toplotu potrebnu za anateksis (parcijalno stapanje) okolnih stena i lokalno stvaranje granitoidnih magmi, uključujući i njihove vulkanske ekvivalente. Na vrućim tačkama omotač „isporučuje” toplotu, kada se stvaraju, lokalno voluminozni rioliti, koji se obično nalaze iznad dublje smeštenih granitoida. Plume se takođe delimično stapaju stvarajući bazaltnu magmu i, na kraju, bimodalni bazalt-riolitski magmatizam.

Tipični anorogeni graniti su peralkalni, tipa **A**. Javljaju se u „širim” ekstenzi-onim prostorima, intrakontinentalnim rasedanjima (riftovima), koji kasnije prelaze u okeanske bazene, srednjeokeanske riftove. Ove stene su uglavnom bogatije SiO_2 , alkalijama, većim odnosom Fe/Mg , imaju povećan sadržaj halogenih elemenata (**F** i **Cl**), **HFS** elemenata, poput **Zr**, **Nb**, **Y** i **Ce** u odnosu na granitoide tipa **I**. Visoka temperatura i priroda anorogenih granitoida siromašnih sa H_2O presudni su za njihov nastanak. Dehidrirani izvor „zahteva” visoke temperature da bi se stvorila kritična masa rastopa koja je potrebno da postane mobilna.

Smatra se da su se najveći anorogeni magmatski događaji dogodili u proterozoiku, kada je ogromna količina granitoida smeštena duž 6000 km dugog pojasa, koji se proteže od južne Kalifornije do Labradora, preko Grenlanda do Baltičkog štita (u to vreme bio je jedan superkontinent). Felziti (kisele) stene su uglavnom krustalnog porekla, po sastavu idu od sijenita, granita do monconita. Paket intruzivnih stena anortozit–mangerit–čarnokit–granit, ili „**AMCG** paket”, jeste tipična proterozojska asocijacija. Mnoge bazične stene omotača su povezane s ovom asocijacijom, pa je pojedini autori smatraju bimodalnim magmatizmom.

Pomenimo da je ortopiroksen veoma čest u ovim „suvim” stenama (bez fluida), otuda pojmovi *čarnokit* (ortopiroksenski granit) i *mangerit* (ortopiroksen monconit).

Čarnokiti su visokotemperaturne, skoro „bezvodne” stene (ne sadrže minerale sa vodom) i mogu biti magmatske, ali, prema pojedinim autorima, i metamorfne stene nastale pod visokim **PT** uslovima. Ortopiroksen se obično vezuje za bazične stene, ali i u „suvim” granitoidima na visokoj temperaturi može biti prisutan hipersten. Peralkalni granitoidi obično imaju piroksene bogate **Na** i **Fe**, a neki čak sadrže i fajalitski (**Fe**) olivin. Iako se smatra da je olivin „nestabilan” (ne javlja se) sa kvarcom, to „nije tačno”. Na „ekstremnom” kraju sistema bogatog **Fe**, fajalit je stabilan sa kvarcom u nekim od ovih granitoida. Toplota potrebna za stapanje pripisuje se sakupljanju omotača, što je verovatno rezultat toplotnog efekta prekrivanja kore nakon formiranja superkontinenta blizu kraja arheana.

„Ponavljajuća” asocijacija **A**-granita sa toleitskim i blago alkalnim stenama je petrogenetski značajna. Mafički tipovi stena uključuju bazalte, trahiandesite, ha-

vajite, mugarite i benmoreite ili njihove intruzivne ekvivalente. Odnos bazičnih i kiselih stena varira. Na nekim lokalitetima postoji jasna kompoziciona praznina, bimodalna asocijacija bazalt–riolit ili bazalt–trahit.

Primeri stena tipa **A** obuhvataju mnoge granite srednjeg proterozoika (1,4–1,1 Ga) širom sveta, permske peralkalinske trahite („romb porfiri”) u norveškim grabenima Oslo, sijenitsko-granitne proboje „belih planina” Jure u Nju Hampširu (New Hampshire) i neke vulkanske stene u zapadnim Sjedinjenim Državama.

V.13.7 PODELA GRANITA PREMA VREMENU STVARANJA

Prema vremenu nastanka u kolizionim područjima (sučeljavanju kontinentalne litosfere), pojedini autori (*Pearce i dr., 1984*) dele granite na **prekolizione**, **sinkolizione** i **postkolizione** granite.

PREKOLIZIONI GRANITI se stvaraju pre početka kolizije kontinentalne litosfere i imaju sastav **I** granita. Nastaju parcijalnim stapanjem gornjeg omotača i stena donjeg dela kontinentalne kore. Sastav im varira od granodiorita do kvarcdiorita.

POSTKOLIZIONI GRANITI nastaju nakon prestanka kompresije (kolizije) kontinentalne litosfere i imaju sličan mineralni sastav, izotopske i geohemijske karakteristike kao i prekolizioni graniti.

SINKOLIZIONI GRANITI nastaju u fazi kompresije (kolizije) kontinentalne litosfere, tj. njenog parcijalnog stapanja. Ove stene su generalno leukograniti i imaju osobine **S**-tipa granita. Po hemijskom sastavu su peraluminijski, izgrađeni od alkalnog feldspata, muskovita, sa biotitom ili bez biotita. Sadržaj silicijuma prelazi 70% mase stene. Asocijacija mikroelemenata i izotopa u sinkolizionim granitima ukazuje na to da su ove stene nastale parcijalnim stapanjem dela kontinentalne kore bogate silicijumom, aluminijumom i alkalijama (gnajsevi, mikašisti, metasedimentne stene). U ovom procesu, voda je imala veliki uticaj na stepen parcijalnog stapanja i količinu stvorenog rastopa. Sinkolizioni graniti su često asociirani sa migmatitima.

U udžbenicima se sreće i još nekoliko termina:

SINKINEMATSKI GRANITI (plutoni) koji su „blisko” povezani sa orogenom i odražavaju tektonske sile koje su „kontrolisale” njihov nastanak i smeštaj. Pomenimo da tektonika može igrati značajnu ulogu u stvaranju prostora koji će „zauzeti” granit. On se može stvoriti i u lokalnim područjima dilatacije, u zonama

smicanja, produženim strukturama itd. Jedan od najpoznatijih kolizionih pojaseva je Himalajski pojas, koji se nalazi između Indije i Evroazije, i sadrži nekoliko tipova granitoida. Himalajski pojas je nastao, to znamo, sučeljavanjem Evroazijske i Indijske ploče. Tada su stvorene veće mase granita, zbog kojih je u ovom području kontinentalna litosfera zadebljana.

PRELAZNI (postorogeni) granitoidi su pomalo enigmatični. Stvaraju se u orogenom pojasu između 10 i 100 Ma, nakon prestanka pritiska kompresije i deformacija. Obično su smešteni tokom uzdizanja ili ekstenzivnog kolapsa orogeneze. Stvaraju se u područjima prethodno zadebljale kore, koja je odgovorna i za nastajanje prelaznih granitoida. Kompresivna orogeneza može dovesti do zadebljanja kore, ali i kontinentalni lukovi (bez sudara) takođe su neobično debeli u odnosu na prosečnu kontinentalnu koru.

Prisustvo postorogenih granitoida ukazuje na to da je zadebljanje kontinentalne kore „odgovorno” i za nastajanje prelaznih granitoida, za njihovo podizanje i/ili kolaps. Kada se kora usled pritiska „zgušnjava”, mogu nastati granitoidi bez dodatnog priliva toplote, smicanja i drugih tektonskih procesa. Pojedini autori smatraju da je za stapanje potreban priliv toplote, verovatno i iz omotača. Možda je najjednostavniji način da se poveća protok toplote površinska erozija i odgovarajućim izostatski porast kore. Ako je ovaj proces dovoljno brz, rastuća kora i omotač mogu fizički podići izotermu pre nego što se temperatura može prilagoditi. Ovo je slučaj jednostavne advekcije. Ako su stene u donjem delu blizu tačke topljenja, može doći i do parcijalnog stapanja usled adijabatske dekompresije. Ovaj proces može da funkcioniše u nekim postorogenim magmatskim procesima koji su obično vezani za kolaps orogeneze.

Sastav postorogenih granitoida kreće se od strogo krustalnih peraluminijumskih S-tipova, do metaaluminijumskih I-tipova i hibrida, pa sve do onih sa A-tipom hemijskih karakteristika.

ZAKLJUČIMO!

Granitoidi, kao i njihovi vulkanski ekvivalenti (stene), javljaju se u različitim geotektonskim sredinama, ali najčešće na konvergentnim granicama ploča, iznad zone subdukcije (kao što su Andi) i sutur zonama (kao što su Himalaji). Kristalizacijom granitoidnih magmi nastaju raznovrsne stene sa različitim strukturama i teksturama, koje se mogu pripisati „suptilnoj” interakciji između procesa nukleacije i brzine kristalizacije pojedinih minerala. Varijacije u geochemiji i mineralogiji granitoida podržavaju klasifikacije koje su u korelaciji sa pretpostavljenim izvorom regionom, stepenom frakcionisanja i tektonskim okruženjem.

V.14 HEMIJA I GEOHEMIJA GRANITOIDA

V.14.1 PLUTONSKE STENE

Hemijski sastav granitoida (granita sensu lato) je promenljiv. Tabela 16 ilustruje sastav granita različitog nastanka, porekla i naravno sastava, sa odabranim prosečnim analizama sa različitih lokaliteta, kao i prosečan sastav donjeg i gornjeg dela kontinentalne kore.

Tabela 16. Hemijske analize različitih vrsta granita

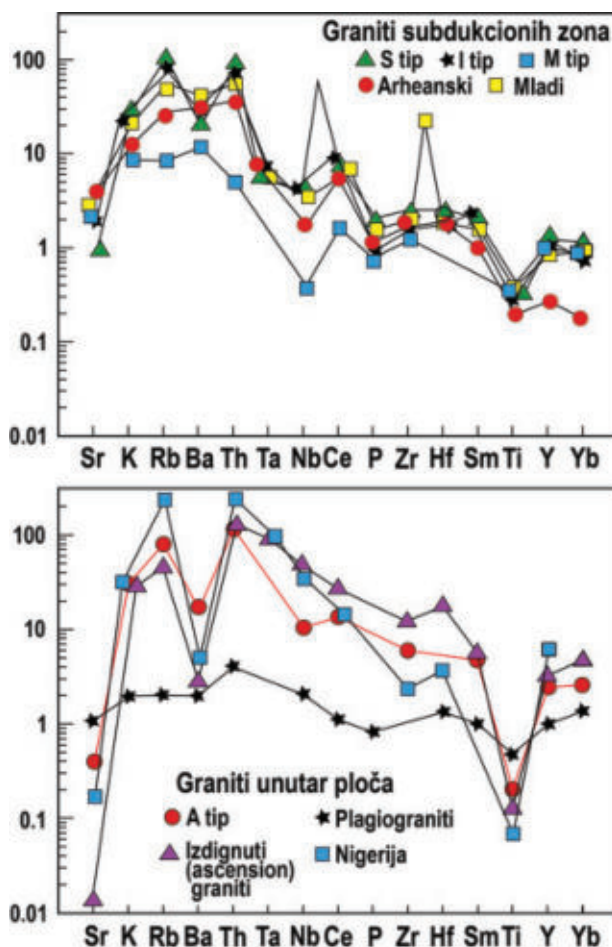
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Oksi- di	Pl.gr	Asc.	Nig.	M- tip	It-ip	S-tip	A-tip	Arh.	Mod	Aver Crust	Upp crust	Low crust
Glavni elementi	SiO ₂	68.0	71.6	75.6	67.2	69.5	70.9	73.8	69.8	68.1	57.3	66.0	54.4
	TiO ₂	0.7	0.2	0.1	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.5	0.9	0.5	1.0
	Al ₂ O ₃	14.1	11.7	13.0	15.2	14.2	14.0	12.4	15.6	15.1	15.9	15.2	16.1
	FeO*	6.6	4.0	1.3	4.1	3.1	3.0	2.7	2.8	3.9	9.1	4.5	10.6
	MnO	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.6	0.3	0.8
	MgO	1.6	0.2	0.1	1.7	1.4	1.2	0.2	1.2	1.6	5.3	2.2	6.3
	CaO	4.7	0.1	0.5	4.3	3.1	1.9	0.8	3.2	3.1	7.4	4.2	8.5
	Na ₂ O	3.5	5.5	3.9	4.0	3.2	2.5	4.1	4.9	3.7	3.1	3.9	2.8
	K ₂ O	0.3	5.7	4.7	1.3	3.5	4.1	4.7	1.8	3.4	1.1	3.4	0.3
	P ₂ O ₅	0.1		0-0	0.1	0.1	0.2	0.0	0.1	0.2			
	Total	99.6	98.1	99.3	98.4	98.5	98.3	98.9	99.7	99.6	100.7	100.2	100.8
CIPW norm.	q	31.9	23.1	31.7	25.5	27.5	33.7	28.6	24.0	22.8	8.2	16.8	5.5
	or	1.8	28.3	28.2	7.8	21.2	25.1	28.3	10.6	20.3	6.5	20.1	1.8
	ab	29.6	36.8	35.6	36.6	29.4	23.2	37.5	44.0	33.5	27.8	35.0	25.1
	an	21.9	0.0	2.5	20.1	14.4	8.4	1.6	15.2	14.2	26.2	13.9	30.5
	cor	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
	di	0.7	0.4	0.0	0.8	0.6	0.0	1.4	0.0	0.0	8.4	5.5	9.4
	hy	9.4	4.1	0.3	6.0	4.1	3.7	0.0	3.6	5.8	19.2	5.9	23.8
	wo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	ac	0.0	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	mt	3.2	0.0	0.0	2.1	2.0	2.1	1.9	1.9	2.1	2.5	2.1	2.6
	Il	1.3	0.3	0.0	0.7	0.6	0.6	0.4	0.4	0.7	1.3	0.7	1.4
	hem	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	ns	0.0	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Inkompatibilni	Ni	12			3*	8	11	1	14	11	128	44	156
	Co	9			16*	10	10	3			29	17	33
	Cr	8			7*	20	30	2	29	23	185	83	219
	Cu	4		45	8*	9	9	2			75	25	90
	Zn	13		99	31*	48	59	120			80	71	83
	V	0		3	71*	57	49	6	35	76	230	107	271
REE elementi	La	4	91	116	9*	31	27	55	32	31	16	30	11
	Ce	11	274	166	22*	66	61	137	56	67	33	64	23
	Nd	0	122		13*	30	28	67	21	27	16	26	13
	Sm	3	17		3*	6	6	16	3	5	4	5	3
	Eu	1	2		1*	1	1	2	1	1	1	1	1
	Gd	4	0		4*			14	2	6	3	4	3
	Tb	1	4		1*			2	0	1	1	1	1
	Dy	0	0		5*				1	5	4	4	4
	Yb	5	17		3*	3	3	9	1	3	2	2	2
LIL elem.	Lu	1	0		1*	1	1	1	0	1	0	0	0
	Rb	4	94	471	30*	164	245	169	55	110	32	112	5
	Ba	38	53	94	232*	519	440	352	690	715	250	550	150
	Sr	124	1	20	154*	235	112	48	454	316	260	350	230
HFS elementi	Pb	0	0	42	5	19	27	24			8	20	4
	Zr	97	1089	202	131*	157	157	528	152	171	100	190	70
	Hf	3	42	9				8	5	5	3	6	2
	Th	1	24	52	1	20	19	23	7	12	4	11	2
	Nb	7	168	124	3*	11	13	37	6	12	8	12	7
	Ta	1	16						1	1	1	1	1
	U	0	0		0	5	5	5	2	3	1	3	1
	Y	30	92	191	34*	31	32	75	8	25	20	22	19

1. Prosečan sastav 6 ofiolitskih plagiogranita Omana i Trodosa (Coleman i Donato, 1979)
 2. Graniti sa ostrva Asension (Pearce i dr. 1984)
 3. Prosečan sastav 11 Nigerijskih biot. granita (Bowden i dr. 1987)
 4. Prosečan sastav 17 M-tip granitoida luka New Britain (Whalen i drugi, 1987; za mikroelemente Saito i dr., 2004), centralni Japan.
 5. Prosečan sastav 1074 I-tip granitoida Lahlan pojasa, Australija (Chappell i White, 1982)
 6. Prosečan sastav 704 S-tipa granitoida, pojasa Lahlan, Australija (Chappell i White, 1992)
 7. Prosečan sastav A-tip granitoida (Whalen i dr. 1987; za REE Collins i dr. 1982)
 8. Prosečan sastav 355 arhajskih gnajseva (Martin, 1994)
 9. Prosečan sastav 250 do 200 mil. starih M-tip granitoida (Martin, 1994)
 - 10-12. Procenjeni prosečni sastav gornje i donje kontinentalne kore (Taylor i McLennan, 1985 i McLennan i dr., 2005)
- (Preuzeto iz *An Introduction to Igneous and Metamorphic petrology*, J.D. Winter, second edition, 2010)

Pomenimo da još uvek ne postoji standardna asocijacija mikroelemenata za poređenje, verovatno i zbog različitosti analitičkih metoda kojima je određen sastav ovih stena, ali i velikog broja podataka smeštenih u ogromnom broju publikacija i udžbenika. Prema poređenju sastava, može se zaključiti da su granitoidi sličnog sastava u odnosu na prosečni sastav gornjeg dela kontinentalne kore (**Taylor i McLennan, 1985**). Hemijski sastav granitoida kontrolisan je i hemijskim sastavom izvora: pritisak, temperatura i stepen parcijalnog stapanja, priroda i opseg naknadnih procesa asimilacije i diferencijacije. Ukratko smo ih opisali i u prethodnom

tekstu. Predlažemo da o geohemijskim svojstvima pojedinih vrsta granitoida, pročitate detaljnije u velikom broju klasifikacija. Ovde smo izdvojili „standardne” kriterijume sa opštim razmatranjima. Evo detalja. Kada se crtaju i upoređuju na **MORB** normalizovanom spajder dijagramu (slika 648), granitoidi različitog nastanka, kao što su I, S, A itd., pokazuju značajno obogaćenje i visok odnos sadržaja **LILE/HFS** mikroelemenata, dok plagiograniti imaju „ravan” trend, sličan **MORB**-u. Geohemijska proučavanja, posebno asocijacije pojedinih mikroelemenata, jesu česte metode za određivanje tektonske sredine stvaranja granitoida i veoma su korisne u kombinaciji sa terenskim istraživanjima, pod uslovom da nisu metamorfisani ili hidrotermalno alterisani, uključujući i uticaj atmosferilija.



Slika 648. Analize granita normalizovane na **MORB** (preuzeto iz Winter 2010, *An introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*)

V.14.1 VULKANSKE STENE

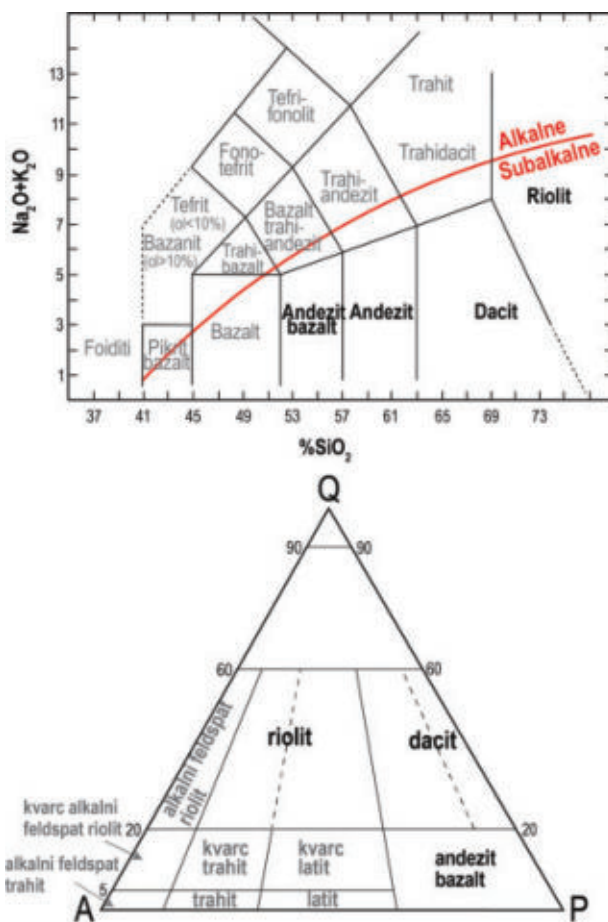
Imena: andeziti, daciti i rioliti se klasifikuju na različite načine. Petrolozi pre svega koriste sadržaj i međusobni odnos alkalnih feldspata i prelaznih (intermedijarnih) plagioklasa. Kada imamo modalni sastav, dacit i riolit mogu se definisati prema relativnim odnosima kvarca, alkalnih feldspata i plagioklasa korišćenjem **QAP** dijagrama (slika 649, donji deo). Jedna od „slabosti” ovog načina klasifikacije je što andezit i bazalt padaju u isto polje.

Međutim, važno je da nas ne zbunjuje. Andezit, dacit i riolit su „proizvoljne” podele onoga što je u suštini kontinuum mogućih sastava magme. S obzirom na različite vrste podataka koji se koriste, uzorci koji su blizu granica mogu „završiti” sa različitim imenima.

Kada je dostupna hemijska analiza sveže vulkanske stene, nazive stena ko-

ristimo u skladu sa poljima Međunarodne unije geoloških nauka (IUGS) na TAS dijagramu (slika 649, gornji deo). Većina dacita sadrži 63–68% SiO_2 , a prema sadržaju odnosa silicijuma i alkalija, ove stene se mogu „protezati” do 77% SiO_2 . Mnogi andeziti i daciti ukazuju na polibarnu kristalizaciju zbog prisustva fluida. Za magmu bogatu fluidima, što naravno znamo, smanjuje se solidus temperatura, a oni ulaze u sastav glavnih minerala (hornblenda, biotit). Prilikom kretanja magme ka površini, fluidi se u jednom trenutku izdvajaju menjajući sastav i odnos pojedinih minerala koji kristališu, a na kraju, uzrokuju eksplozivnu erupciju. Zonarna građa, posebno plagioklasa, specifično je svojstvo kod ovih intermedijarnih stena. Nastaje usled razlike u sastavu unutar kristala plagioklasa, uzrokovanog neravnotežom kristala njegovih spoljašnjih delova sa rastopom iz kojeg kristališe. Pomenimo da postoje dve vrste **zonarne građe**: **normalna**, kada sadržaj anortitske komponente opada od jezgra kristala plagioklasa ka njegovom obodu, i **reversna**, kada sadržaj anortita raste od oboda ka njegovom centru. Prva je odraz kontinuiranog rasta kristala tokom normalne kristalizacije (hlađenje rastopa), dok reversna zonalnost nastaje usled porasta temperature rastopa. Sreće se i kod metamornih stena usled povećanja stepena metamorfizma. Pad pritiska usled gubitka fluida ($\text{P}_{\text{H}_2\text{O}}$) može promeniti polje stabilnosti jednog fenokristala na račun drugog. Tu su i mešanja magmi, asimilacija, kontaminacija, koje utiču na vrstu i redosled kristalizacije minerala.

Rioliti imaju $>69\%$ SiO_2 , a riodaciti ($\sim 68\text{--}73\%$ SiO_2) (kod „nas” su to kvarc-latiti) i često nastaju eksplozivnim erupcijama, zbog čega su praćeni piroklastitima istog sastava. Osim silicije (SiO_2), ove stene pokazuju i značajne razlike u sadržaju K_2O , koji je u korelaciji sa debljinom gornjeg dela kontinentalne kore. Imajmo na umu da ne postoji „jednostavan” kriterijum (na primer, sadržaj SiO_2) za razdvajanje dacita i riolita. Granica koju prepoznaje klasifikacija IUGS-a je dijagonalna, a ne vertikalna. Granice između andezita, dacita i riolita su „slobodne”, što je u suštini posledica kontinuuma mogućih sastava magme.

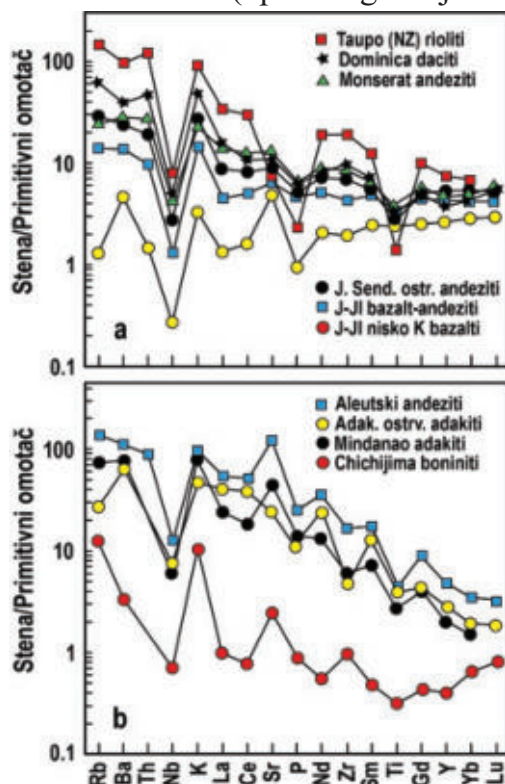


Slika 649. Poređenje *QAPF* i *TAS* klasifikacije najčešćih granitoidnih vulkanskih stena

ZAKLJUČIMO!

Daciti, andeziti i rioliti dominiraju u zrelih (starijim) ostrvskim i kontinentalnim vulkanskim lukovima više nego u nezrelim (mlađim) intraokeanskim ostrvskim lukovima. Pomenuto svojstvo ukazuje na to da je silicijska kontinentalna kora uticala na stvaranje ovih magmi. Andeziti, daciti i rioliti su karakteristične stene iz suprasubdukcione zone (SSZ), ali nisu ograničene samo na ovu tektonsku sredinu. Oni se formiraju u značajnim količinama u nekim kontinentalnim sredinama. Teksture su masivne, uglavnom grade vulkanske kupe, a kada su piroklastičnog karaktera (eksplozivne), mogu biti opasne za ljude.

Trahiandezit (često nazvan i latit) sadrži oko 66–69% SiO_2 , iako donja granica u TAS dijagramu počinje od 57% SiO_2 . Ima porfirsku strukturu, sastoji se od fenokristala andezina do oligoklasa i alkalnog feldspata, sanidina, koji leže u sitnozrnoj osnovnoj masi. Ne sadrži slobodni kvarc. Trahiandezit (latit) jeste vulkanski ekvivalent monconita. Ove stene se često javljaju u kasnim fazama subdukcije i bogate su alkalijama. Generalno, lave aktivnih kontinentalnih margina pokazuju veći stepen obogaćivanja čitavog niza inkompatibilnih elemenata u tragovima u odnosu na bazalte okeanskih ostrva i lukova, što odražava kombinovane efekte osiromašenja iz obogaćenog izvora omotača i kontaminacije kontinentalnom korom. Lave subdukcionijske zone imaju prepoznatljiv sastav, sadrže inkompatibilne mikroelemente (npr. obogaćenje inkompatibilnim elementima, visok odnos **Rb/Yb**), negativne anomalije za pojedine HFS elemente, negativnu anomaliju **Nb** koja ostaje približno jednaka za sve tipove stena itd. (slika 650).



Ove lave imaju veće sadržaje odnosa **LILE/REE** i **LILE/HFSE** u odnosu na druge tektonske sredine stvaranja. Slika 650 (gornja slika) jesu tipični andeziti, daciti, rioliti sa Južnih Sendvičkih ostrva, dok su na donjoj slici 650 prikazani andeziti, daciti, bazalti iz centralne zone Anda, uključujući i boninite. Pomenuta svojstva su važna za razumevanje nastanka magmi u različitim tektonskim sredinama.

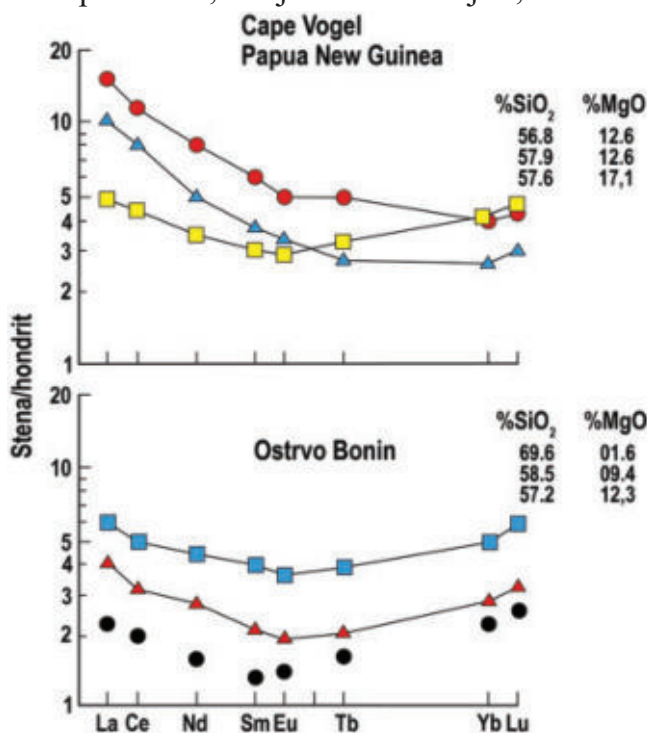
Slika 650. Sadržaji mikroelemenata vulkanita ostrvskih lukova svedenih na primitivni omotač (Sun i McDonough 1989, uprošćeno)

V.14.2 BONINITI

Većina andezita, sadrži ispod 5% **MgO**. Izuzetak je podgrupa (vrsta) poznata kao visoko magnezijски andezit, koji se naziva i **boninit** (*Crawford, 1989*). Naziv stene je dat po lokalitetu Boninska ostrva u Japanu (prikazana je i petrografija ovih stena). Njen sastav treba da „ispunjava” sledeće geohemijske kriterijume:

- a) $\text{SiO}_2 > 52\%$;
- b) $\text{MgO} > 8\%$;
- c) $\text{TiO}_2 < 0,5\%$.

Najviše i najčešće prihvaćena definicija boninita obuhvata i petrografske i geohemijske kriterijume koji su prilagođeni Lemetru (*Le Maitre, 2002*). Ove stene imaju visok sadržaj **SiO₂** (> 55%), **MgO** (> 9%) i kompatibilnih mikroelemenata (**Ni** = 70–450 ppm, **Cr** = 200–1800 ppm) i vrlo nizak sadržaj **TiO₂** (< 0,3%), visok sadržaj **LREE**, kao i **Zr**, **Ba**, **Sr** itd., a osiromašeni su u **HREE** i **HFS** (*Crawford i dr., 1981; Hickey & Frei, 1982*). Kada se normalizuju na hondrite, boniniti imaju neuobičajeno široke 'V' oblike (slika 651), koji se retko primećuju kod drugih tipova vulkanskih stena. To se objašnjava metasomatizmom jako osiromašenog izvora **REE** sa fluidima. Boniniti, kao što smo pomenuli, imaju veći sadržaj **K**, **Rb** i **Ba**, ali značajno manje sadržaje teških **REE** od bazalta **MORB**. Sličan sastav imaju i bazalti ostrvskih lukova, što ukazuje na to da fluidi iz subdukcione zone igraju značajnu ulogu u nastanku ovih stena. Za nastanak boninita potrebna je visoka temperatura da bi se stopio refraktorni ostatak peridotita nakon stvaranja bazalta **MORB** i visok stepen parcijalnog stapanja, kao i „uvođenje” (obogaćivanje) elemenata **LILE** kroz prisustvo fluida iz subdukcije ili blizine plume (tople tačke). Međutim, treba napomenuti da su eksperimentalne studije (*Green, 1973, 1976*) pokazale da boniniti nastaju pri visokom stepenu parcijalnog stapanja



Slika 651. Sadržaj REE u boninitima i drugim stenama normalizovanih na hondrite (*Hickey i Frey 1982*)

(> 30%), ostavljajući refraktorni ostatak (nestopljeni deo) olivina i ortopiroksena. Navedena geohemijska svojstva ukazuju i na izdvajanje iz jako osiromašenih izvora omotača u prisustvu fluida. Iako imaju visok sadržaj SiO_2 , smatra se da predstavljaju primitivne magme zbog „nedostatka” plagioklasa, visokog sadržaja MgO i niskog sadržaja Al_2O_3 , TiO_2 i alkalija. Većina boninita ima **Mg**-brojeve unutar opsega za ravnotežu sa olivinom iz omotača. Nisu frakcionisane magme poput andezita iz ostrvskog luka, već skoro primarni parcijalni rastopi nastali u „neuobičajenim” uslovima.

Boniniti sa ostrva Bonin imaju mnogo širi raspon izotopskih sastava i obuhvataju i polja bazalta okeanskih ostrva (**OIB**) te se mogu uporediti s izotopskim sastavima lertzolita iz subkontinentalne litosfere.

„Neuobičajene” geohemijske karakteristike boninita ukazuju na to da su oni nastali iz jako osiromašenih harzburgitskih izvora, možda čak i iz okeanske litosfere, koja je metasomatski promenjena inkompatibilnim elementima pre stvaranja magme.

Obogaćenje u **K**, **Ba** i **Rb** sugerise da je metasomatizam povezan s subdukcijom. No, sadržaji izotopa **Nd** u boninitima (*Hickey i Frey, 1982*) otkrivaju širok raspon odnosa sadržaja $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, što može odražavati događaje obogaćivanja tokom dužeg vremenskog razdoblja (100 Ma?). Obično se ne očekuje da refraktorni harzburgiti učestvuju u kasnijim događajima stvaranja magme zbog njihove visoke temperature solidusa.

Metasomatizam fluida povezanog sa subdukcijom smanjuje solidus (temperaturu topljenja), ali se smatra da je na manjim dubinama unutar okeanske litosfere još uvek nedovoljno visok za intenzivnije parcijalno stapanje. Kraford i dr. (*Crawford i dr., 1981*) sugerisu da parcijalno stapanje refraktornog metasomatiziranog harzburgita može biti rezultat toplotnog impulsa povezanog s ranim fazama luka, što bi značajno povećalo temperature u okeanskoj litosferi.

Eksperimentalne studije (*Green, 1973; Tatsumi, 1981*) potvrdile su da relativno visoki stepeni (> 30%) parcijalnog stapanja peridotita (s fluidima) na dubinama od 30–60 km mogu proizvesti rastope s visokim sadržajem SiO_2 i visokim sadržajem MgO , koji su karakteristični za boninite, ostavljajući refraktorni ostatak olivina i ortopiroksena.

Treba napomenuti da se boninitske lave takođe nalaze u brojnim ofiolitskim kompleksima različitih starosti, što ukazuje na to da nisu svi uslovi potrebni za stvaranje boninitnih magmi prisutni. Postoje mišljenja da boniniti nastaju kada se H_2O i **LILE** dodaju osiromašenom klinu i delu omotača smeštenom iznad zone subdukcije.

Boniniti su interesantni za petrologe jer su slične stene pronađene u ranim arhejskim provincijama na kontinentima, kao i u brojnim ofiolitskim kompleksima raznih starosnih doba, što ukazuje na to da pomenuti uslovi potrebni za stvaranje takvih rastopa nisu bili ograničeni samo na zapadni Pacifik tokom eocena.

V.14.3 SADRŽAJI IZOTOPA U GRANITOIDIMA

Razmotrimo sadržaje **izotopa** u granitoidima. Kontinentalna ploča (kora) jeste stara, pa su izotopi stena uticali na magme. Ako su stene kontinentalne kore mlađe, teže je razlikovati izotopske izvore i poreklo granitoidnih stena. Izotopski sastavi **Sr**, **Nd** i **Pb** pružaju važne informacije za rasvetljavanje magmatskih procesa, posebno na granicama konvergentnih ploča (subdukcionih zona), jer uključuju različite izvorne komponente s određenim izotopskim sastavom. Određivanje izvora granitoida na osnovu međusobnog odnosa sadržaja izotopa $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ bazira se na sledećim pretpostavkama (*Faure, 1977*):

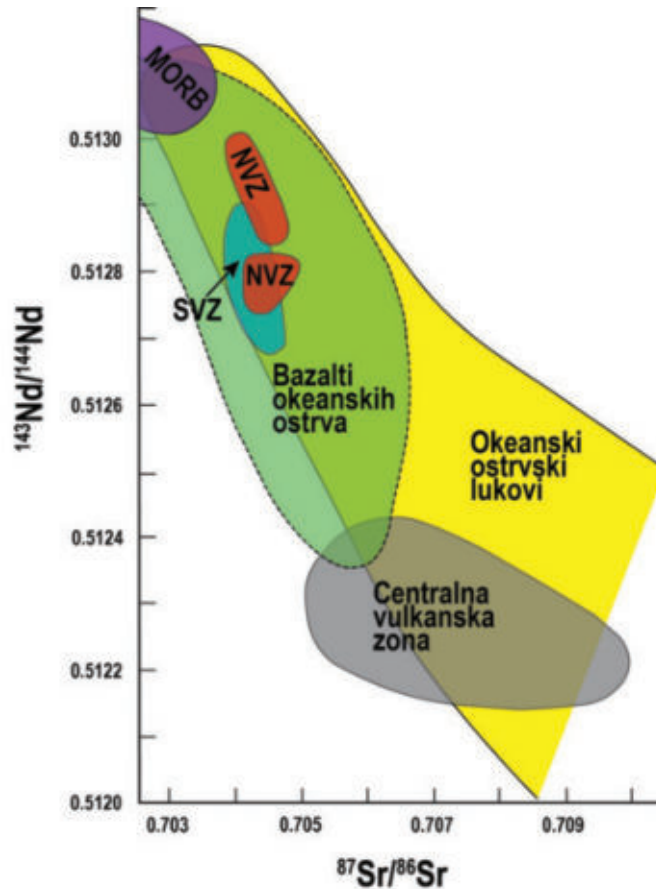
1. odnos sadržaja $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ stena iz omotača je manji od stena kore, pre svega kontinentalne, i
2. ne postoji značajna frakcionacija izotopa u magmi.

Mnoge stene iz kore imaju današnji odnos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ približno $0,704 \pm 0,002$ (*Faure, 1977*). Idealna situacija ukazuje na to da granitoidi s nižim sadržajem izotopa **Sr** nisu samo izvedeni iz omotača ili iz mafične donje kore. Tokom poslednjih godina, brojna istraživanja ukazala su na izotopsku neravnotežu u procesu stapanja stena (*Harris i dr., 1997, 2000; Harris i Aires, 1998; Sallet i dr., 2000*). To znači da, ako se izotopska ravnoteža ne postigne za vreme stapanja stena kore, sadašnji geo-hemijski modeli magmatskih procesa otvorenih sistema treba da budu modifikovani.

Hemijski sastav i mineraloške varijacije odnosa sadržaja **Rb/Sr** i karakteristike distribucije **REE** granita odražavaju unutrašnju evoluciju sistema granitoidne magme i nisu nužno vezane uz izvore magme:

1. Petrogeohemijske karakteristike granitoida formiranih parcijalnim stapanjem in situ odnose se na sastav protolita uključenog u pomenuti proces, ali i na hlađenje magme i
2. Kristalizacija granitoida in situ dovodi do diferencijacije pojedinih mikroelemenata, kao i frakcioniranja izotopa **Sr**, **H**, **O** i **REE**. Generalno, sa porastom dubine, trebalo bi da magme budu relativno siromašnije silicijom i alkalijama, **HREE** i odnosom $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ itd. Ovo ukazuje na mogućnost da andeziti, posebno kada su asocirani s riolitom, mogu biti izvedeni iz donjeg dela sloja kore magme, a ne iz omotača.

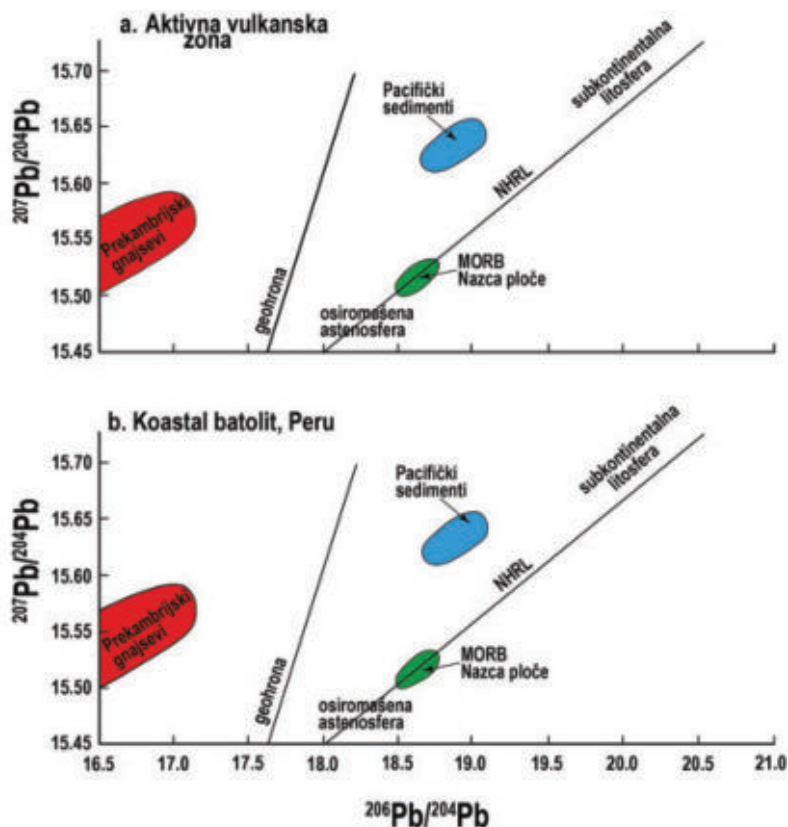
Na slici 652 prikazan je odnos sadržaja $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ i $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ za vulkanske stene iz severnog, centralnog i južnog dela vulkanskih zona Anda (*Hawkesworth, 1982; James, 1982; Thorpe i dr., 1984; Hickey i dr., 1986*) u poređenju sa poljima za **MORB**, **OIB** i okeanske ostrvske lukove. Dobijeni položaji ne mogu se objasniti jednostavnim parcijalnim stapanjem osiromašenog astenosferskog omotača



Slika 652. Sadržaji izotopa Sr i Nd za vulkanske stene severne (NVZ), južne (SVZ) i (CVZ) zone Anda (Hawkesworth i dr., 1982, James, 1982, Thorpe i dr., 1984 i Hickey i dr.1986); MORB, bazalti srednjeokeanskih ostrva

(MORB izvorni omotač), obogaćenog radiogenim Sr od fluida dobijenih iz ploča, kao što je slučaj kod mnogih okeanskih ostrva (Hawkesworth i Powell, 1980; Wilson i Davidson, 1984). Umesto toga, petrogenetski modeli treba da uključe i parcijalno stapanje obogaćenog izvora (subkontinentalne litosfere) ili kontaminaciju primarnih magmi izvedenih iz MORB izvornog omotača s kontinentalnom komponentom. Velika kontaminacija andskih lava iz NVZ-a i SVZ-a je dobar pokazatelj izotopskih karakteristika subdukovanog omotača. Nasuprot tome, lave u CVZ-u imaju raznolik izotopski sastav s nižim odnosima sadržaja $^{87}Sr/^{86}Sr$ i višim odnosima $^{143}Nd/^{144}Nd$. Ovi podaci nedvosmisleno zahtevaju kontaminaciju magme s kontinentalnom korom (Hawkesworth i dr., 1982; James, 1982; Harmon i dr., 1984; Thorpe i dr., 1984). Podsetimo se da u područjima gde magme prolaze kroz mlade stene, sadržaji izotopa Sr , Nd i Pb mogu dovesti u zabludu da su magme nekontaminirane. Razlog je što mlade stene obično imaju karakteristike bliske stvorenoj magmi izvedenoj iz omotača. U tektonskom okruženju Anda verovatno kontaminacija doprinosi ukupnom kontinentalnom hemizmu, zbog čega nam izotopski podaci i sadržaji pojedinih mikroelemenata „ne dozvoljavaju” da jasno razdvojimo neke procese. Na dijagramu (slika 653) prikazan je odnos sadr-

žaja izotopa, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ i $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ za vulkanske stene iz severne, centralne i južne vulkanske zone Anda (a) i za plutonske stene iz batolita u Peru (b). Sadržaji definišu široke linearne trendove koji se razlikuju od bazalta **MORB+OIB** i pokazuju široko preklapanje za vulkanske i plutonske stene, koje su verovatno koreni bivših aktivnih vulkana. Deo raspršenja podataka verovatno je posledica mešanja osiromašenog omotača, okeanskih sedimenata, subkontinentalne litosfere itd.

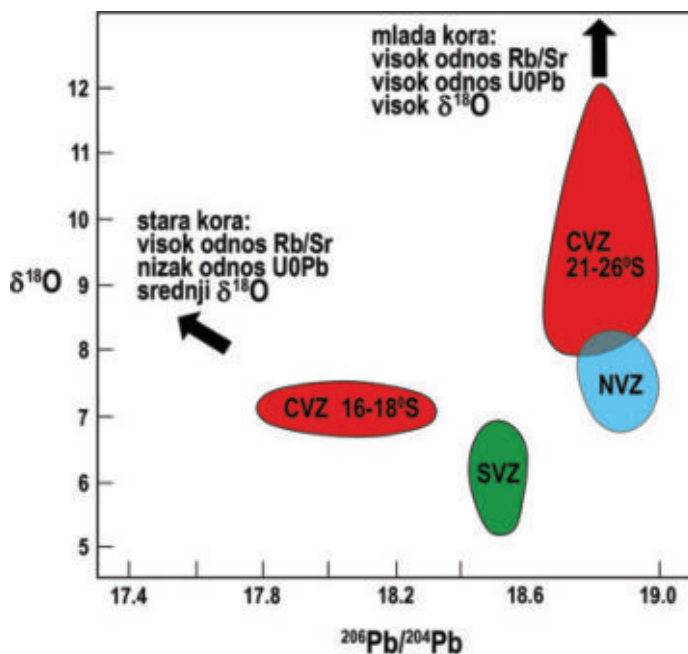


Slika 653. Odnosi sadržaja izotopa Pb za vulkanske stene južnih, severnih i centralnih zona Anda (a) i plutonske stene u Peru (b) (James, 1982), Harmon i dr. (1984) i Hickey i dr. (1986); za granite Mukasa (1986); za prekambrijske gnajseve, pacifičke sedimente i Naska bazalte Harmon i dr. (1984); NHRL – akronim od engl. Northern Hemisphere Reference Line, po Hart (1984)

Izotopi kiseonika su moćno oružje za praćenje uključivanja kontinentalnih stena u stvaranju magmi zbog velikih razlika u ^{18}O između stena kore i stena iz omotača (James, 1981). Na slici 654 prikazana je varijacija ^{18}O i $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ za vulkanske stene iz severnih, centralnih i južnih vulkanskih zona Anda (James, 1982; Harmon i dr., 1984). Sadržaj ^{18}O je najniži u stenama u SVZ-u, u rasponu od 5,2% do 6,8%, i ne razlikuje se od izotopskog sastava kiseonika svežeg MORB i OIB (Kyser i dr., 1982). Stoga se čini razumnim pretpostaviti da lave u SVZ-u predstavljaju suštinski nekontaminirane sastave magme, čije izotopske karakteristike (Sr, Nd, Pb, O) odražavaju uticaj subdukovanih sedimenata (klina).

Lave u NVZ-u su relativno homogene u sadržaju ^{18}O i preklapaju se sa sadržajem ^{18}O za stene u CVZ-u koje pokazuju dokaze kontaminacije s komponentom

kore. Deo stena u **CVZ**-u ima drugačiji trend s umerenim sadržajem ^{18}O . Različiti trendovi sa različitih prostora podržavaju uključivanje različitih „zagađivača” uz visoke sadržaje odnosa **Rb/Sr**, niske **U/Pb** i umerene sadržaje ^{18}O . Smatra se da su lave u **NVZ**-u podvrgnute blagoj kontaminaciji koja je slična lavama u **CVZ**-u.



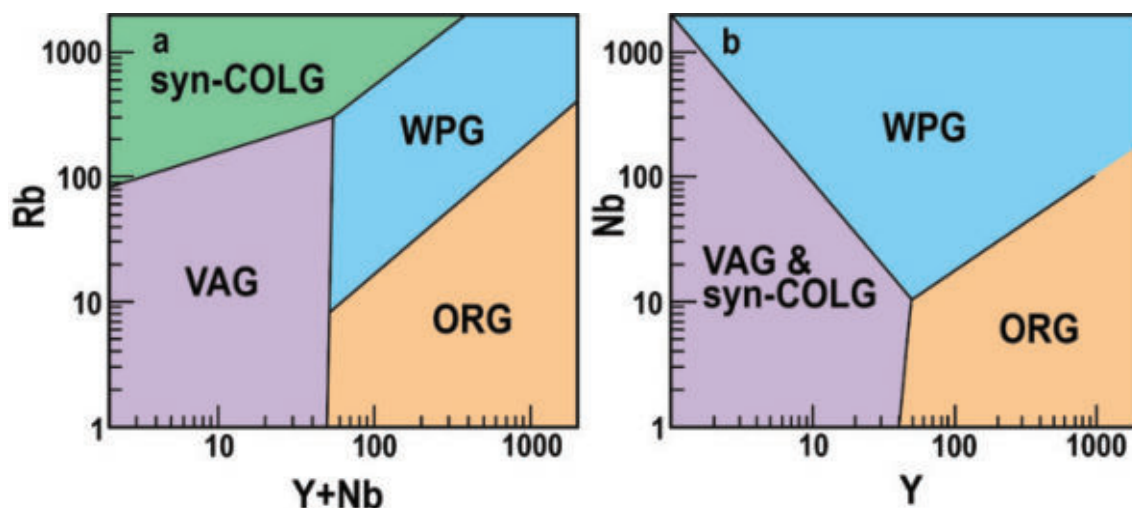
Slika 654. Odnosi sadržaja izotopa **O** i **Pb** u vulkanitima severne vulkanske zone (**NVZ**), centralne vulkanske zone (**CVZ**) i južne vulkanske zone (**SVZ**) Anda (*Harmon i dr., 1984*)

V.15 HEMIJSKI SASTAV GRANITOIDA I TEKTONSKA SREDINA STVARANJA

Mnogi petrolozi su pokušali da mineraloška i hemijska svojstva granita vežu za određene tektonske sredine stvaranja, ali ona ne moraju biti „jedinствена” jer mogu nastati na različite načine. Kao rezultat toga, napravljen je veliki broj diskriminacionih dijagrama koji su korisni za izvođenje zaključaka o tektonskoj sredini stvaranja granita.

Na osnovu odnosa sadržaja pojedinih pomenutih mikroelemenata, prikazaćemo najčešće korišćene dvokomponentne i trokomponentne dijagrame sa različitim geotektonskim sredinama stvaranja granita. Oni mogu „naglasiti” paleotektonsku postavku granitoidnog magmatizma. Najčešće se koristi dijagram klasifikacije granitoida koji je dao Pirs (*Pearce i dr., 1984*).

Na osnovu velikog broja odabranih analiza granita, Pirs i dr. (*Pearce i dr., 1984*) izdvojili su **Y**, **Yb**, **Rb**, **Ba**, **K**, **Nb**, **Ta**, **Ce**, **Sm**, **Zr** i **Hf** kao najbolje diskriminacione mikroelemente za određivanje njihove tektonske sredine stvaranja. Granice na dvokomponentnom dijagramu su dobijene na osnovu 600 analiza granitoida gde se geohemijski razlikuju 4 geotektonske sredine: **synkolizioni (Syn-COLG)**, **granitoidi vulkanskog luka (VAG)**, **granitoidi unutar kontinentalnih ploča (WPG)** i **oceanski graniti u riftnim zonama (ORG)** (slika 655).



Slika 655. Diskriminacioni dijagram za tektonske sredine stvaranja (*Pearce i dr., 1984*); **VAG** – graniti vulkanskih lukova, **syn-COLG** – sinkolizioni graniti, **WPG** – graniti unutar kontinentalne litosfere i **ORG** – graniti okeanskih grebena (plagiograniti)

Isti autori, sa sličnim, do identičnim granicama tektonskih sredina stvaranja granita, izdvajaju i na osnovu odnosa sadržaja **Ta** i **Yb** i **Yb+Ta** i **Rb**.

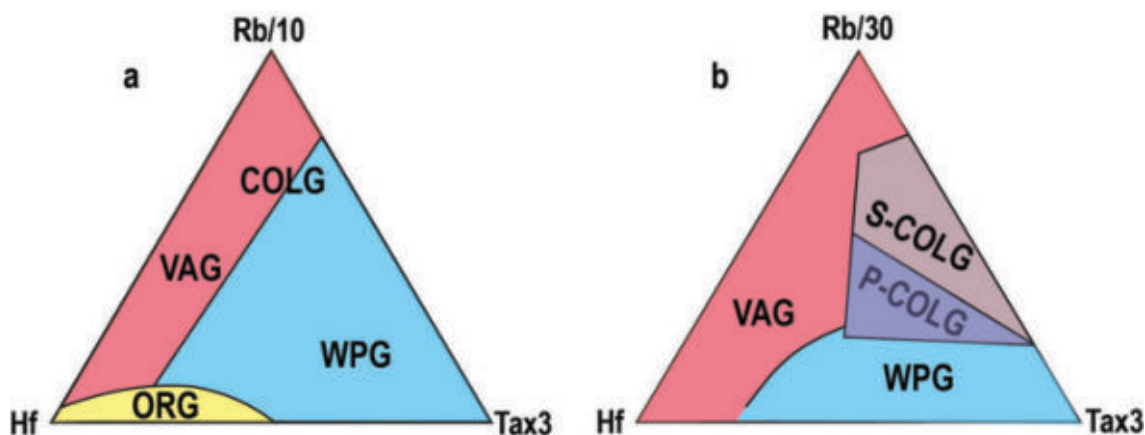
Granice na diskriminacionim dijagramima treba da se korelišu sa ostalim

geološkim informacijama na proučavanom području. Ovo se, pre svega, odnosi na granitoide koji su „pretrpeli” asimilaciju, kontaminaciju, frakcionu kristalizaciju.

Posebno treba biti oprezan ako su granitoidi veoma stari (paleozoik i stariji), jer je rekonstrukcija geoloških događaja složenija. U pojedinim slučajevima, to može biti jedini dostupan način za rekonstrukciju geoloških događaja koji su omogućili njihovo stvaranje i smeštaj. Zato treba koristiti što više kriterijuma, parametara diskriminacije jer je Zemlja bila (i ostala) mnogo složenija da bi se koristili relativno jednostavni i brojno „mali” parametri diskriminacije.

Hf-Rb-Ta DISKRIMINACIONI DIJAGRAMI

Na ovim trokomponentnom diskriminacionom dijagramima (*Harris i dr., 1986.* slika 656a), graniti se, prema geotektonskoj sredini stvaranja, dele na: **granite okeanskih grebena** (plagiogranite), **granite vulkanskih lukova**, **graniti unutar kontinentalne litosfere** itd. Na osnovu odabranih drugih mikroelemenata: **Hf**, **Rb/30** i **Tax10** (*Harris i dr., 1986.* slika 656b) podela kolizionih granita je „bolje” definisana na sinkolizione i postkolizione.



Slika 656. Hf-Rb-Ta diskriminacioni dijagram za granite (*Harris i dr., 1986*) sa sledećim geotektonskim sredinama stvaranja (poljima): **VAG** – graniti vulkanskih lukova, **ORG** – graniti okeanskih riftova (plagiograniti), **WPG** – graniti unutar kontinentalnih ploča, **SCOLG** – sinkolizioni graniti, **P-COLG** – postkolizioni graniti

Zaključimo da diskriminacione dijagrame za granite treba primeniti, interpretirati sa oprezom, jer pomenuti elementi mogu biti mobilni sa fluidima ili frakciono iskristalisali u pojedinim glavnim ili sporednim mineralima.

Pirs i dr. (*Pearce i dr., 1984*) naglasili su da kristalizacija i akumulacija kiselijeg plagioklasa „pomera” granicu između granita unutar kontinentalnih ploča i granita vulkanskih lukova. Slično je i sa sinkolizionim granitima i granitima unutar kontinentalne litosfere itd.

MINERALIZACIJA U GRANITIMA

Stvaranjem granitne magme dolazi do „reorganizacije” i „redistribucije” inkompatibilnih makroelemenata i, posebno, mikroelemenata, koji se izdvajaju i

koncentrišu (akumuliraju) u završnoj fazi kristalizacije glavnih minerala, a kasnije i u pegmatitskoj i hidrotermalnoj fazi. Glavna kontrola razdvajanja rudnih metala je njihova inkompatibilnost, tj. nemogućnost da uđu u sastav glavnih minerala, silikata, pre svega feldspata, liskuna, amfibola, piroksena i delom kvarca. Zbog toga se u završnoj fazi kristalizacije akumuliraju, nagomilavaju i stvaraju rudna ležišta, obično u fluidima koji ih prate: H_2O , CO_2 , H_2S , HF , HCl itd.

Granitne magme obično sadrže 3–6% H_2O . Parcijalni pritisci fluida u magmi mogu dostići nekoliko stotina bara. Usled toplotnog gradijenta i razlike u pritisku, fluidi sa metalima kao inkompatibilnim elementima migriraju prema područjima niskih pritisaka gde se akumuliraju kao kasne fluidne faze. Sa vremenom, temperatura granitne magme i fluida opada uz „izdašnu” pomoć „hladnih” okolnih stena. Kretanje fluida sa metalima je uglavnom duž fraktura, raseda, pukotina unutar matičnog intruziva ili izliva, ali i u okolne stene. Obično grade žice debljine od nekoliko centimetara do više desetina metara, uglavnom od pola metra do par metara. Za vreme kretanja hidrotermalnih rastvora nagore, većina elemenata se taloži na različitim nivoima pod različitim fizičko-hemijskim uslovima. Evo detalja:

1. Elementi koji formiraju rudu imaju tendenciju da se koncentrišu u gasnoj fazi i akumuliraju u masi granita kada se temperatura smanji na oko 400 °C.
2. Za vreme kretanja hidrotermalnih rastvora, različiti rudonosni elementi se talože u različitim temperaturnim intervalima prilikom formiranja rudnih tela uglavnom blizu matične stene. To su **Mo, W, Cu, Zn, Pb, Ag, Au, Hg, Sb**.

Najviša koncentracija elemenata ne mora nužno rezultirati formiranjem rudnog tela, jer to zavisi i od drugih faktora. Pojava ruda predstavlja „optimalni” fizičko-hemijski režim za taloženje elemenata koji stvaraju rude iz fluida mobilisanih u stenama.

Pri kretanju, hidrotermalni rastvori menjaju, alterišu okolne stene uz „čuvenu” alkalnu metasomatozu, sericitizaciju, kaolinitizaciju, silifikaciju itd., koje se obično javljaju zajedno sa mineralizacijom u fazi vremenskih intervala. Opisali smo i prikazali „klasičan” lokalitet hidrotermalno promenjenih stena Lipa na Crnom vrhu.

Za stvaranje pomenutih metala značajnu ulogu imaju i fluidi koji sadrže fluor, bor, hlor itd., koji ih nose i transportuju. Oni se kreću (cirkulišu) kroz granitoidnu magmu, intruzive i efuzive, ponekad reaguju sa okolnim stenama uz obaranje pojedinih metala. U nekim slučajevima, čak i meteorska voda može doprineti, „pomoći” stvaranju i obaranju pojedinih metala, simulirajući hidrotermalne rastvore, jer se sa dubinom zagreva. Mineralizacija se obično javlja u obliku žica, koje su uglavnom izgrađene od kvarca, kalcita, barita i nekog vodećeg metala u obliku oksida ili sulfida. Žice se javljaju u matičnom plutonu, ali i po obodu, u okolnim stenama. Mineralizacija može biti i „raspršena” unutar vulkanskih i drugih stena. Obaranje metala je obično višefazno. Prema mestu deponovanja, pojedini autori izdvajaju endogenu i egzogenu mineralizaciju.

Endogena mineralizacija je vezana za hidrotermalne fluide koji cirkulišu unu-

tar granitoida, metali se deponuju u krovnom delu plutona. Naveli smo najznačajnije, ponovimo, važno je: **Mo, Sn, W**, retke zemlje, tu su **Li**, drago kamenje (pegmatiti) itd.

Egzogena mineralizacija se obično javlja van matične stene odakle potiču hidrotermalni rastvori. Mineralizacija je drugačija po asocijaciji i načinu pojavljivanja.

PORFIRSKA LEŽIŠTA BAKRA

Glavna ekonomska karakteristika magmatizma vulkanskog i ostrvskog luka je pojava porfirskih ležišta bakra koja daju skoro tri četvrtine svetskog bakra, polovinu molibdena i oko jedne petine zlata (*Sillitoe, 2010*). Ležišta su najvećim delom vezana za plitke intruzije ili efuzije u vulkanskom luku, sastava andezita, dacita, alkalnih vulkanskih stena itd. Mala dubina utiskivanja znači da su tokom kristalizacije fluidi „izvukli” inkompatibilne elemente, pomenute metale (otišli zbog manjeg pritiska) i deponovali ih u neposrednoj blizini.

Za granitoide mezozojske i kenozojske starosti genetski su vezana hidrotermalna ležišta velikog broja metala. Jugoistočna Kina je jedno od mesta gde se javljaju velika ležišta **Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Sb, V, Sn, Mo, Bi, Li, Be, Ta, Nb, REE** itd. Tu su i naša porfirsk ležišta bakra, Bor i Majdanpek, sa rudnim mineralima halkopirit, bornit, enargit, halkozin itd.

Mineralizacija **REE** je takođe vezana za granitoide, koji su u najčešće u kontaktu sa paleozojskim stenama. Mineralizacija se javlja i u masi ovih stena pa je zaključeno da su „došli” iznutra (iz matične stene). Većina volframa je prostorno vezana za mezozojske granitoide, koji se javljaju unutar kambrijskih/proterozoj-skih slabo metamorfoziranih sedimentnih stena.

V.16 VULKANSKA STAKLA

Kada se magma (lava) izlije na površinu, a nije započela kristalizacija minerala, temperatura naglo opada i ona brzo očvrstne kao staklo. Gubitkom toplote u izlivenoj lavi, atomi nemaju vremena i mogućnost da se „organizuju” u pravilne geometrijske nizove stvarajući kristale. Umesto toga, ona brzo očvršćava kao veoma viskozno amorfno staklo, tj. polimerizovani silikatni superpothlađeni rastvor izgrađen od **O, Si, Al, Ca, K** itd.

Drugi mehanizam nastanka vulkanskog stakla je vezan sa brzim gubitkom fluida iz magme (lave) kada se snižava unutrašnji pritisak (P_{H_2O}). Nagli gubitak rastvorene vodene pare, koji se obično dešava istovremeno sa izlivanjem, omogućava da se tetraedri silicijum-dioksida povežu zajedno, što uzrokuje naglo povećanje viskoznosti rastopa, koja sprečava stvaranje nuklearnih zametaka kristala i njihov rast. Rezultat je vulkansko staklo, produkt gotovo trenutnog očvršćivanja magme gubitkom rastvorenog gasa.



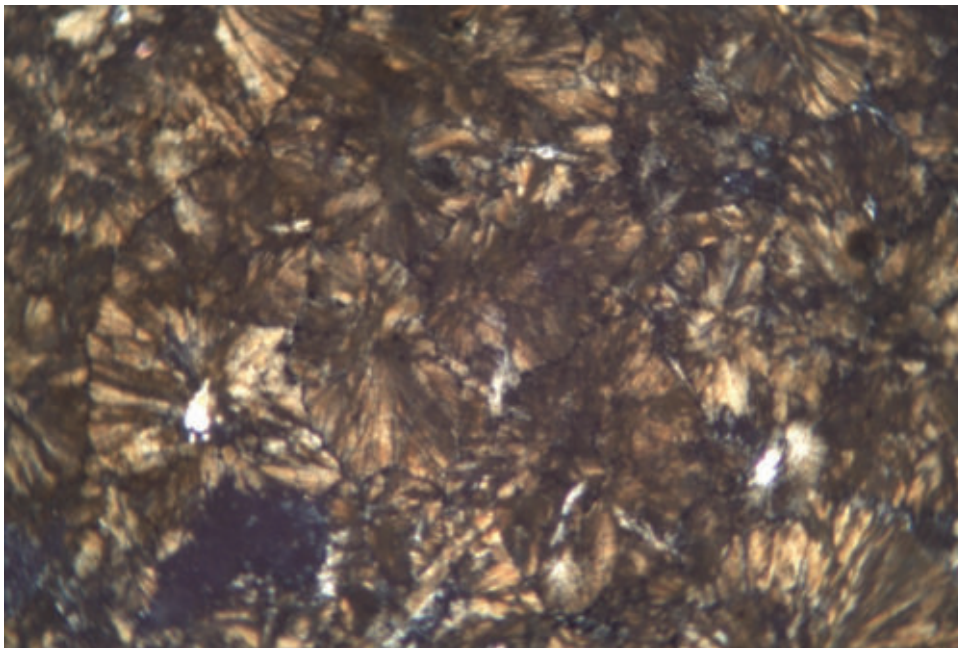
Slika 657. Bazaltno staklo po površini pillow lave, Pacifik



Slika 658. Bazaltno staklo iz tankog toka, Pacifik

Pomenuti proces objašnjava zašto su stakla poput opsidijana mnogo češća u silicijskim (kiselim) nego u bazičnim stenama. Bazične magme obično ne sadrže dovoljno vode (fluida) ni pomenutih tetraedara da brzo očvrstnu zbog gubitka rastvorenih gasova. Bazaltna magma (lava) je mnogo manje viskozna (pokretnija) od riolitske, ali kada se naglo ohladi, takođe bude staklo, bazaltno. Često se javlja, po obodu *pillow* lava izlivenih na okeanskom dnu, gde voda brzo apsorbuje toplotu iz rastopa (lave), uzrokujući da očvrstne pre nego što kristali počnu da rastu (slika 657).

Staklo se javlja i u tankim tokovima (slike 658 i 659), slivovima lave na površini koji su ohlađeni u kontaktu sa atmosferom. Bazaltne lave izbačene iz fontana na Havajima, na primer, imaju staklo. Staklo se javlja i po obodima dajkova male debljine smeštenih u plićim nivoima, kao i u područjima frikcije, smicanja u zonama raseda kada nastaju pseudotahiliti.



Slika 659. Mikrosnimak bazalnog stakla iz Pacifika. N+, 60x

Staklo se stvara i pod udarom velikih meteorita na površinu Zemlje, kao i sagorevanjem podzemnog uglja.

RIOLITSKO STAKLO

Riolitsko staklo je u tankom preseku poluprovodno, bezbojno do sivo, ili tamno crveno do smeđe, zbog prisustva sitnih kristala tamnih minerala ili povećanog sadržaja gvožđa. Kada se posmatra pod velikim uvećanjem (u petrografskom preparatu), uočavaju se submikronski kristali, minerali, koji su ograničeno rasli u lavi koja se naglo hladila. Mikroliti i kriptokristalasta zrna predstavljaju početna jezgra (embrione, nukleuse) kristala u gotovo čvrstoj magmi ekstremno visoke viskoznosti. Veći kristali mogu se formirati delimičnom kristalizacijom magme pre njenog brzog „skrucivanja” (hlađenja) ili gubitkom gasa. Ovo može proizvesti porfirsko-staklaste stene koje nazivamo **vitrofiri** (slika 660 i slika 661).

Oni sadrže prepoznatljive fenokristale u staklenoj osnovnoj masi, a za njih se kaže da imaju vitrofirsku strukturu (slika 661). Vulkan-ska stakla su metastabilna od trenutka formiranja, ali alteracija može trajati veoma dugo, naročito u suvim klimatskim



Slika 660. Riolitski vitrofir



Slika 661. Vitrofirska struktura; N+, 50x

uslovima. Staklo izliveno u moru ili slanim jezerima može se transformisati u zeolite za samo „nekoliko hiljada” godina. Tonjenjem dna na kojem su izliveni, povećava se pritisak i temperatura, što dovodi do alteracije stakla i nastanka zeolita, hlorita, heulandita, klinoptilolita, pumpelita, epidota itd., što se smatra početkom metamorfizma tonjenja. Sva stakla su podložna sekundar-

noj hidrataciji, devitrifikaciji i drugim vrstama alteracije, koje napreduju tokom vremena da bi se postiglo stabilnije stanje.

Devitrifikacija i hidratacija su kinetički procesi koji uglavnom zavise od difuzije molekula vode ili $(OH)^-$ i H^+ jona. Hidratacija i devitrifikacija bazalnog stakla imaju tendenciju da budu istovremeni procesi, kada nastaje **palagonit**, koji je mešavina minerala gline i zeolita, i hidroksida gvožđa.

Većina vulkanskog stakla stvorena je i sačuvana tokom kasnog kenozoika (neogena), veoma retko se javljaju starija stakla.

Vulkanska stakla mogu imati različit hemijski sastav i strukturno-tekstur- ne karakteristike. Najčešće prihvaćena klasifikacija ovih stena je prema sadržaju vode, gde se kisela (granitskog sastava) vulkanska stakla dele na **opsidijane**, **peh- štajne** i **perlite**.

OPSIDIJAN (LIPARIT)

Opsidijan (liparit) naziv je za vulkanska stakla, sastava od riolita do andezita sa sadržajem do 1% vode (slika 662). Obično sadrži samo oko 1% H_2O , koja je magmatskog porekla. Ona je deo atomske strukture i čvrsto se drži u staklu i može se osloboditi samo na visokoj temperaturi od nekoliko stotina stepeni. Stena je karakteristične crne boje i ima glatki školjkasti prelom, dok je na tankim ivicama prozirna. Ponekad se u opsidijanu primeti i smer tečenja lave, naročito kada sadrži veoma retke fenokristale kvarca ili feldspata. Od dispergovanog hematita, opsidijan može imati crvenkastu boju.

Hidratacijom (alteracijom atmosferskom vodom) nastaje perlitska struktura. Javlja se na površinama loma koje su izložene vlazi u atmosferi ili meteorskoj vodi (podzemnoj vodi). Tada se spoljašnja kora alteriše (prima vodu) i širi, razdvajajući se od dela koji nije promenjen (hidratisan). Ponavljanjem procesa hidratacije stvara se niz koncentričnih perlitskih pukotina koje reflektuju svetlost, stvarajući karakterističnu bisernosivu boju. Brzina alteracije, utvrđeno je, zavisi i od klime, intenzivnija je u vrućim i vlažnim uslovima (bogatim vodom).



Slika 662. Izdanak opsidijana (liparita) na Liparskim ostrvima; gore levo: detalj stene

PEHŠTAJN

Pehštajn je vulkansko staklo **riolitskog sastava** i ima smolasti sjaj (slika 663). Dok opsidijan u svom sastavu sadrži do 1% vode, u pehštajnu ta količina može biti i do 10%. Boje pehštajna su različite: tamnosive, mrke, crvene i zelene. U tankim presecima je prozračan.



Slika 663. Pehštajn, uzorak veličine oko 15 cm

PERLITI

Perliti su „staklaste” vulkanske stene bogate SiO_2 i imaju veći sadržaj vode u odnosu na opsidijan (opisali smo ih). Obično se javljaju u subaerskim sredinama. Najčešće su sive boje, ponekad zelene, crvene ili smeđe (slika 664). Smatra se da je voda apsorbirana uglavnom iz atmosfere i može se ukloniti zagrevanjem na samo 110 °C. Njihov izotopski sastav ukazuje na to da je voda meteorskog, a ne magmatiskog porekla. Imaju perlitsku teksturu, koju karakteriše zamućen izgled i zakrivljene ili subsferične pukotine hlađenja, koje se nazivaju perlitske pukotine. Ako vulkanska stakla sadrže malu količinu fenokristala, tada čine prelaz prema normalnim lavama i nazivaju se **vitrofirima**. Prema tehničkoj klasifikaciji, stene sa najviše 5% fenokristala smatraju se staklom. Navedimo još neke stene iz ove grupe: pitchstone i plovućac.



Slika 664 Perlit; veličina uzorka 10 cm

PITCHSTONE

Pitchstone (ime stene napisano na engleskom, bez prevoda) jeste vrsta staklaste vulkanske stene koja se razlikuje od opsidijana po većem broju mikro fenokristala, zbog čega ima manje staklastog sjaja (slika 665). Po sastavu su od andezita do riolita i često imaju voštani izgled, braon do smeđu boju, i mogu da sadrže 6–16 mas.% vode.



Slika 665 Pitchstone, uzorak veličine 10 cm

PLOVUĆAC

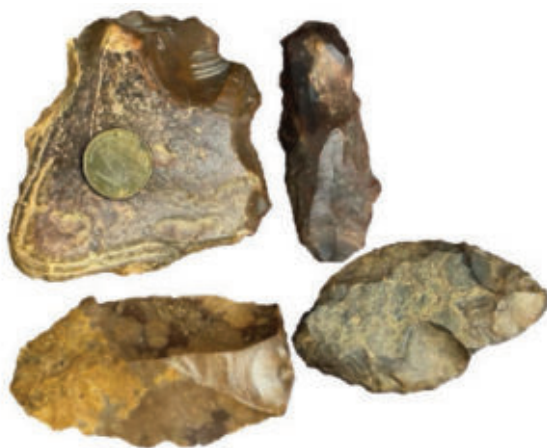
Plovućac (pumice) jeste glavni i najistaknutiji „proizvod” gasovitih erupcija. To je vezikularna (šupljikava) forma vulkanskog stakla (opisali smo ga; slika 666.) Proučavanjem u petrografskom preparatu ili elektronskim mikroskopom uočavaju se šupljine veličine od mikrometra do nekoliko milimetara, ponekad i centimetara. Krupnije vezikule (šupljine) nastale su usled difuzije prezasićenog gasa dok je magma (lava) bila tečna. One sitnije su stvarane kasnije. Pumice obično sadrže do 80% šupljina, dovoljno da mogu da plivaju po vodi. Plovućac može da sadrži



Slika 666. Plovuće, veličina uzorka 10 cm



Slika 667. Uzorak opsidijana, prečnika 12 cm, sa Liparskih ostrva



Slika 668 Neogene alatke od vulkanskog stakla; novčić (jedan dinar) na jednoj od alatki je radi razmere

fenokristale koji su nastali u dubini, sa čestim mikrolitima koji su stvarani u kasnoj fazi. Sličan pepeo formira matricu mnogih ignimbrita, mada je retko sačuvan. Plovuće obično ne pokazuje slojevitost.

ZAKLJUČIMO! Vulkanska stakla su veoma rasprostranjena. Klasični primeri opsidijana su na Liparskim ostrvima (Sicilija, Italija), po kojima se ova stena naziva i liparit (slika 667). U Jeloustounskom parku izlivi vulkanskog stakla zauzimaju površinu od 260 km². U našoj zemlji, pojava vulkanskog stakla ima u okolini Vrnja. Stakla su stvarana u mezozoiku (neogenu), dok su u paleozoiku veoma retka jer su rekristalisala. Opsidijan je cenjen i „u svoje vreme” roba kojom se trgovalo širom Evrope. U neolitu je bio osnovna sirovina za pravljenje alatki (noževa; slika 668). Danas se koriste za izradu specijalnih opeka za gradnju jer su dobri termo i zvučni izolatori i lako se obrađuju itd.

Perliti, plovući i stakla sa velikom količinom vode koriste se u građevinarstvu kao ekspanzirajući materijali za proizvodnju elemenata male specifične težine, sa dobrim akustičnim, toplotnim i mehaničkim izolacionim svojstvima. Takođe se koriste u industriji papira, gume i boja. Za kvalitetna stakla se smatraju ona koja se pri zagrevanju odlikuju sposobnošću višestrukog povećanja zapremine, do 30 puta. Procenat kristala u staklu smanjuje sposobnost ekspanzije.

V.17 ALKALNE STENE

UVOD

Alkalne magmatske stene su, po „opštoj” definiciji, bogate alkalijama, Na_2O i K_2O . Neke od njih su prezasićene, a neke nezasićene silicijom (SiO_2) ili imaju čak i „višak” Al_2O_3 . Kada se formiraju, nastaju alkalni pirokseni i amfiboli. Većina alkalnih stena je vulkanska. To su obično tokovi lava koji su slični „normalnim” bazaltnim erupcijama. Peralkalni rioliti i fonoliti mogu imati i eksplozivne erupcije, kao daciti i andeziti, vezani za subdukciju. Ako su degazirani (nemaju fluida), formiraju vulkanske kupe. Alkalne stene se javljaju i kao žice, dajkovi, silovi, proboji ili mala intruzivna, plitko smeštena tela. Imaju različiti hemijski sastav i specifična svojstva. Pomenimo neka od njih:

1. Zbog **nedovoljne količine silicije**, umesto „normalnog” alkalnog feldspata (albit, ortoklas), mogu da **sadrže nefelin i leucit**.

2. Ako imaju feldspatoide, ali i **višak aluminijuma** (Al_2O_3) i „dovoljno” **alkalija** (peralkalna grupa), **formiraju se alkalni** (natrijumski) **pirokseni** (aegirin-augit, koji je polihroičan) i **amfiboli** (ribekit, „prepoznatljiv” po indigoplavom polihroizmu).

3. Alkalne stene **mogu da sadrže i slobodan kvarc**.

4. Obogaćene su **inkompatibilnim mikroelementima**.

5. Leucit i nefelinitske lave (i natrokarbonatiti) imaju izuzetno **nisku viskoznost**, jako su pokretljive.

6. Alkalne stene (magne) petrološki su važne jer **sadrže ultramafitske ksenolite** lerzolitita, ksenokristale olivina, granata, pa čak i dijamante, koji dolaze iz donjih delova gornjeg omotača. Oni omogućavaju „direktno” ispitivanje ovog dubokog dela naše planete, gde su alkalne magme nastale, probijale se, izdizale i izlivala na površinu.

NASTANAK

Većina petrogenetskih modela pretpostavlja da su alkalne magme nastale niskim (malim) stepenom parcijalnog stapanja obogaćenog lerzolitita unutar gornjeg omotača i da su drugačijeg sastava od „klasičnih” bazaltnih magmi.

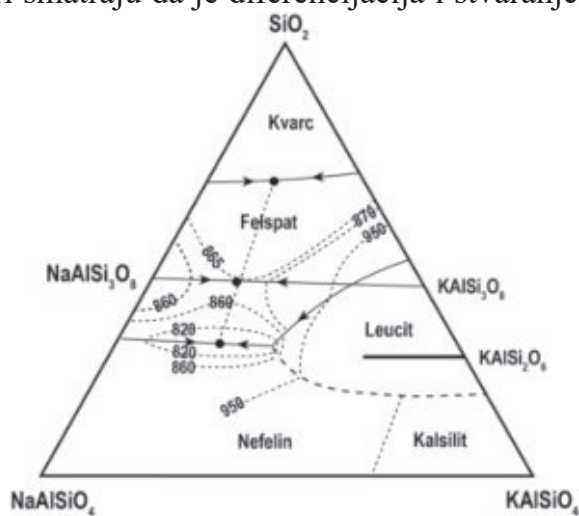
Stepen parcijalnog stapanja i dubina segregacije magme smatraju se glavnim varijablama u kontroli nastanka i sastava alkalnih rastopa, magmi. Značajan uticaj imaju i sadržaj volatila i mineralogija izvornog omotača, stepen frakcione kristalizacije, kontaminacija korom, kada se stvaraju magme „širokog” alkalnog sastava.

Sistem nefelin–kalsilit–silicijum (slika 669) značajno doprinosi razumevanju uslova stvaranja i sagledavanju uslova i stepena diferencijacije silicijumom zasićenih i silicijumom nezasićenih alkalnih magmi. Hamilton i Makenzi (*Hamilton i McKenzie, 1965*) u pomenuti sistem „dodali” su vodu (fluide) uz pritisak od 0,1 GPa, jer se u tim magmama, tj. lavama, javljaju flogopit, biotit, amfiboli itd.

Diferencijacija alkalnih bazaltnih magmi nastaje prvo u trahitskom delu, dok je iz toleitske magme ostatak rastopa riolitiskog sastava. U prirodi magme ne dostižu idealne (potpune) sastave niti diferencijaciju, zbog čega se javlja „mešavina” pomenutih uslova i stena. Pojedini autori smatraju da je diferencijacija i stvaranje alkalnih magmi „uslovljeno” i kontaminacijom kore, kada su početni rastopi prešli „preko” feldspatskog dela (granita, peščara) u „silicijske” diferencijate. U nekim područjima, alkalne stene su asocirane sa bazaltnim i ultrabaznim stenama sa različitim odnosima alkalija, što ukazuje na to da ih treba smatrati „krajnjim” članom kontinuuma (diferencijata). Foli i dr. (*Foley i dr., 1987*) predložili su da se stene koje su jako bogate kalijumom ($K_2O > 3$ tež.%) nazivaju ultrakalijske (detaljnije u poglavlju Hemijski sastav alkalnih magmi). „Dodatni” uslov je da imaju i veliki **Mg** broj (odnos **Mg**/**(Mg+Fe)**), i visoke sadržaje **Ni** i **Cr**. Ovi kriterijumi su neophodni da bi se definicija „ograničila” na relativno primitivne sastave, jer se frakcionisanjem plagioklasa iz osnovnih bazaltnih magmi može značajno povećati odnos K_2O/Na_2O u ostatku rastopa. U grupu alkalnih stena spada i većina kimberlita. Karakteristika alkalnih magmi je obogaćenje mikroelemenata u odnosu na subalkalne i ostale stene.

Navedena svojstva, visoki sadržaji alkalija, **Mg** broja, inkompatibilnih mikroelemenata itd., ukazuju, prema pojedinim autorima, na to da alkalne magme nastaju niskim stepenom parcijalnog stapanja (manje od 1%) granatskog ili spinel lerzolitiskog „neosiromašenog” omotača, koji se nalazi, kako znamo, na velikim dubinama. Međutim, male količine fluida, oko 0,06% do 0,4%, koje se javljaju u ovom delu omotača (*Wendlandt i Eggler, 1980 a i b*), nisu dovoljne za stvaranje flogopita ili amfibola, koji se „redovno” javljaju u ovim stenama, zbog čega je tumačenje njihovog nastanka na ovaj način „nerealno”.

Druga mogućnost stvaranja alkalnih magmi je iz metasomatski promenjenog, obogaćenog dela izvora omotača na „manjim” dubinama. Glavni procesi su frakciona kristalizacija i diferencijacija bazaltnih magmi, njihova asimilacija i kontaminacija sa stenama kontinentalne kore (litosfere). Pojedini autori smatraju da



Slika 669. Sistem nefeli, kalsilit, silicijum na PH20 na 0,1 GPa
(Hamilton i MacKenzie, 1965; uprošćeno)

fluidi dolaze subdukcijom, iz sedimenata, ili „oslobađanjem” u toku metamorfnih reakcija itd. Pomenuti procesi u omotaču mogu da obezbede izvorne komponente za nastanak kalijskih i ultrakalijskih magmi, uključujući fluide i povećane sadržaje pojedinih makro i mikro elemenata.

Eksperimentalne studije (*Wendlandt i Eggler, 1980a i b*) ukazuju na to da su roditeljske magme nastale na različitim dubinama u izvoru omotača koji sadrži flogopit bogat **K**. Ove primarne magme su zatim prošle složen proces evolucije u kori, uključujući **AFC** (asimilaciju i frakcionu kristalizaciju), kao i mešanje magmi.

Rimska provincija je jedna od „klasičnih” pojava alkalnog magmatizma i detaljno je proučavana. Visoki sadržaji inkompatibilnih elemenata i pojedinih izotopa, na primer $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dolaze iz obogaćenih izvora omotača, uključujući i kontaminaciju sa korom. Neki od procesa moraju biti (zapravo treba da budu) vezani i za subdukcione zone, jer ukazuju i na „jasne” geohemijske afinitete sa vulkanskim stenama vezanim za subdukciju.

Pomenimo i hipotezu pojedinih autora da alkalne magme nastaju i adijabat-skom dekompresijom ili u dijapirima plume, kada se, osim bazalta, javljaju i alkalne stene (okeanska ostrva, Havaji).

Zanimljiv je nastanak lava Vezuva (Italija), koje su bogate leucitom, na osnovu čega se smatra da alkalne stene mogu nastati i asimilacijom sa krečnjacima. Ove stene nose brojne karbonatne ksenolite, koji su „sakupljeni” tokom njihovog uspona kroz oko 3 km debele mezozojske stene. Ova teorija nije „uspela” da objasni mnoge aspekte generisanja alkalnih magmi na globalnoj osnovi, kao i odsustvo „dovoljno” krečnjaka u okeanskoj kori za nastanak rasprostranjenih alkalnih stena vulkanskih ostrva.

Za većinu petrologa, metasomatski obogaćen omotač je „najrazumniji” izvor za alkalne magme i verovatno „jedini” za visoko alkalne kimberlite, lamproite i kamafugite. Ksenoliti ultrabazičnog sastava sa granatima, piroksenima, flogopitom itd., koji se javljaju u alkalnim stenama, potvrđuju pomenuto. Sadržaji i međusobni odnosi pojedinih izotopa **Rb**, **Sr**, **Nd** su u saglasnosti sa ovom hipotezom.

Alkalne magme prolaze kroz različite procese kristalizacije i diferencijacije, zbog čega imaju i različiti mineralni sastav i sklop (teksturu i strukturu). Javljaju se uglavnom kao izlivi, dajkovi, silovi, a retko kao manje, plitko smeštene intruzije.

Vulkanske stene imaju porfirsku strukturu, što odražava i istoriju kristalizacije magme. Dominantni alkalni feldspat je triklinični sanidin koji je obično euhedralan sa resorbovanim ivicama nastalim verovatno tokom uzdizanja magme „potpomognutih” fluidima (vodom). U njemu se nalaze inkluzije stakla, lokalno uklapanje rastopa. U intruzivima je uglavnom ortoklas, sa čestim pertitskim izdvajanjima.

Od feldspatoida javljaju se leucit i nefelin. Leucit je obično „višestruko” bližnjen, kao i perovskit. Krajnji članovi sodalita (svi su izotropni) ne mogu se razlikovati samo optičkim metodama (posmatranjem u mikroskopu). Nefelin je u nekim alkalnim stenama dominantan, često praćen alkalnim piroksenima i amfibolima.

U plagioklasima je česta zonarnost, ponekada i reversna, koja se javlja i kod piroksena i amfibola.

Alkalne stene variraju prema hemijskom sastavu, od kiselih do bazičnih. Izraz i naziv „kisele” je manje „prigodan” za stene kao što su fonoliti, koji pripadaju „intermedijarnim” stenama. U praktičnom smislu, bolje je primeniti izraz *felzitski* ili *salski* za opis diferencijacije među alkalnim stenama. Kao primer navedimo alkalne i nefelinske bazalte, koji „obično” sadrže bazični plagioklas, olivin i augit, bogat titanom i natrijumom. Odsustvo ortopiroksena u osnovnoj masi omogućava razlikovanje alkalnog bazalta od toleita. Mnogi alkalni bazalti ne sadrže nefelin kao „slobodan” mineral (fenokristale), već je on „skriven” u osnovnoj, često staklastoj masi, ali je prisutan kao normativni mineral! Ove stene uključuju basanite, gde je olivin prisutan sa nefelinom, i tefrit, koji nema olivina.

Klasifikacija alkalnih stena, prema pojedinim istraživačima, slična je Pandorinoj kutiji. Petrološki su fascinantne i „prepoznatljive” po širokoj raznovrsnosti mineralnog i hemijskog sastava, od ultrabazičnih do kiselih stena. Nedovoljan sadržaj silicije (SiO_2), visok sadržaj alkalija i inkompatibilnih elemenata uzrokuje stvaranje „neobičnih” minerala kao što su sodalit, eudijalit itd., zbog čega ove stene, po sastavu, obično padaju „daleko” od dobro poznatih (i opisanih) subalkalnih stena.

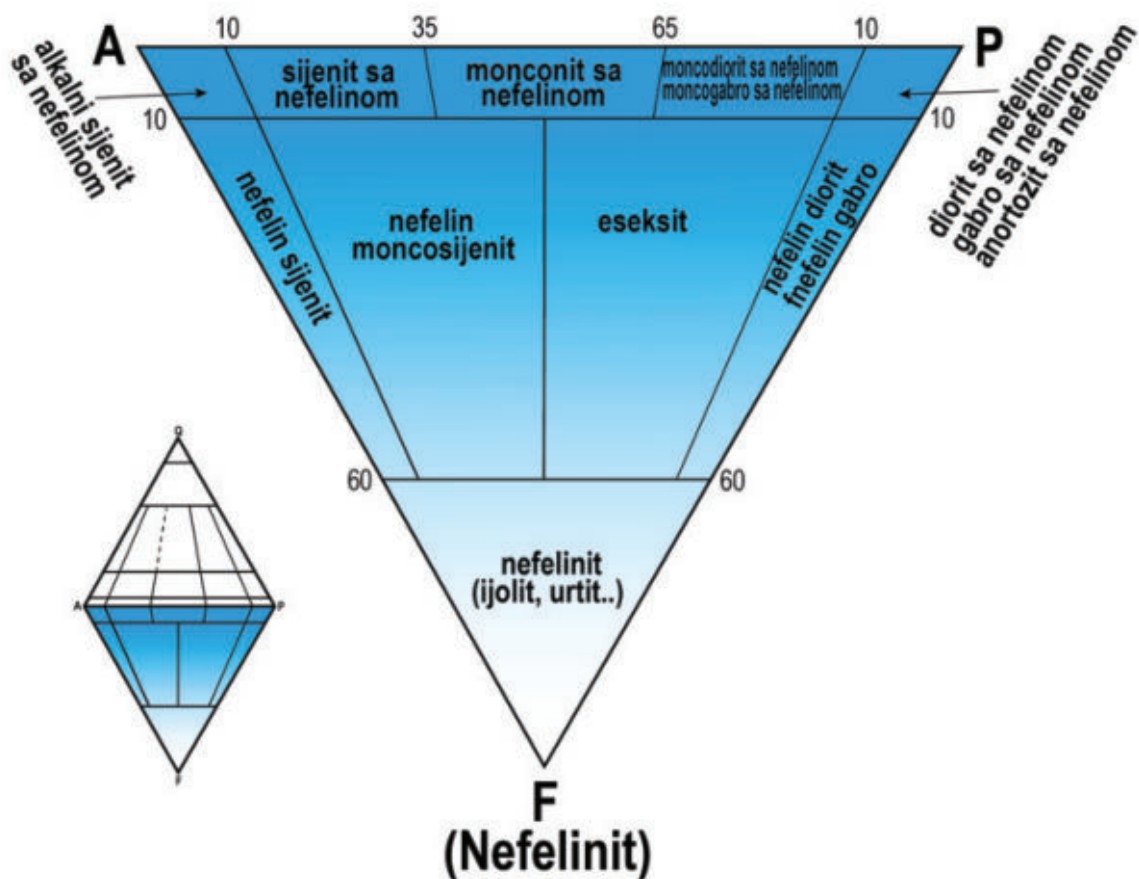
Raznovrstan mineralni sastav alkalnih stena čini nomenklaturu „nepotrebno” složenom, što dovodi do mnogo imena, koja često „zbunjuju” i teško ih je zapamtiti. Skoro polovina naziva magmatskih stena u postojećoj literaturi, udžbenicima vezana je za alkalne stene, koje čine manje od 1% svih magmatskih stena. Zbog toga ćemo, iz racionalnih razloga, prikazati i selektovati „najvažnije”, zapravo najčešće vrste i varijetete ovih stena. Za detaljnije podele alkalnih stena pogledajte *Le Maitre (2002)*.

V.17.1 DUBINSKE ALKALNE STENE

Alkalne intruzije su retke i manje zastupljene u poređenju sa vulkanskim stenama. Obično sadrže „neuobičajene” minerale i „ukrašene” su egzotičnim imenima. Najveći deo „svakodnevnih” elektronike (mobilni telefoni, televizori itd.), koja zahteva elemente retkih zemalja (REE), „obiluje” upravo alkalnim intruzivnim stenama, zbog čega se one sve više istražuju i proučavaju širom planete.

Nomenklatura zrnastih alkalnih stena često je opterećena geografskim poreklom. Klasifikacija IUGS-a za ove stene je nejasna do neupotrebljiva, posebno za početnike sa malo iskustva, jer je „zabranjeno” korišćenje imena poput „foid moncodiorit”. Predložena nomenklatura biće tačnija, racionalnija i jasnija ako se fokusiramo na najmanje modalne sastave ispitanih stena. Imena se dodeljuju prema odnosima alkalnog feldspata, feldspatoida i plagioklasa, korišćenjem trougla APF (slika 670).

Evo imena nekih alkalnih zrnastih stena dobijenih na osnovu pomenute klasifikacije IUGS-a, kao i nazivi stena koji se sreću u pojedinim udžbenicima:



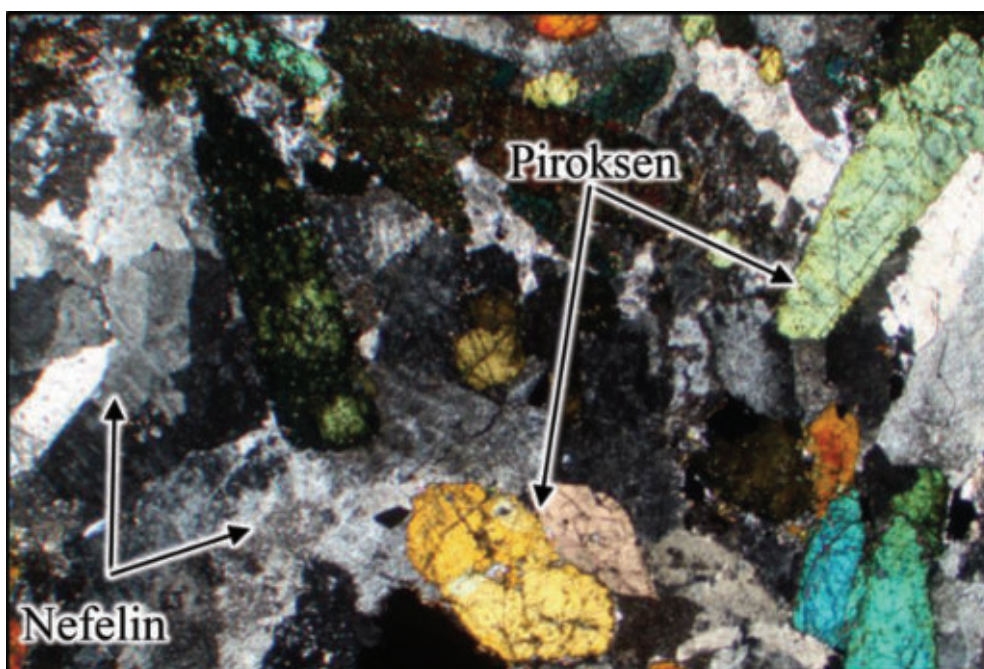
Slika 670. QAPF dijagram alkalnih dubinskih stena u kojima je nefelin dominantan feldspatoid

IJOLIT

Ijolit je grubozrnasta, mezokratna magmatska stena koja se sastoji uglavnom od nefelina i klinoproksena (diopsida, egirin-augita; slike 671 i 672). Često sadrži „zanimljive” minerale poput sfena, apatita, granata sodalita, melanita, pa čak i karbonata, kada su tesno povezani sa karbonatitima.



*Slika 671. Ijolit, Kanada; uzorak veličine oko 15 cm:
nefelin je sivo-zelen, piroksen crn*



*Slika 672. Mikroskopski snimak ijolita, Kanarska
ostrva; N+, duža strana fotografije: 2 mm*

TERALIT

Teralit je grubozrnasta melanokratna stena sastavljena od kalcijских plagioklasa (labradorita, bitovnita) i augita (titanoaugita) ili zonarnog egirina i nefelina (slika 673). U suštini, to je gabro s nefelinom. Često sadrži olivin, dok je biotit redak. Magnetit je dominantan među pratećim mineralima.



Slika 673. Teralit, uzorak veličine 10 cm

ESEKSIT

Eseksit je grubozrnasta melanokratna stena koja odgovara moncodioritu (slika 674). Bitni minerali su prelazni plagioklasi (oligoklas, andezin), nefelin i alkalni feldspat. Od bojenih minerala, najčešći je augit, dok se olivin, hornblenda i biotit povremeno javljaju, odnosno nisu redovni sastojci ovih stena. Prisustvo nefelina nije obavezno. „Pravi” ortoklasnefelinski gabrovi nazivaju se **šonkinitima**.



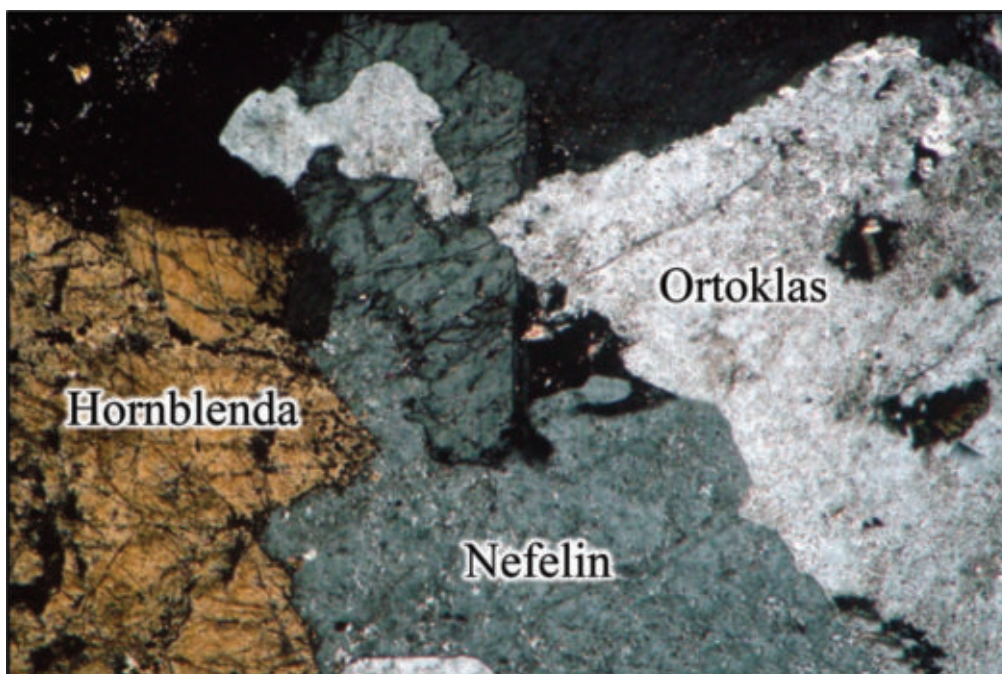
Slika 674. Eseksit, Škotska; veličina uzorka oko 12 cm

NEFELIN SIJENIT

Nefelin sijenit je zrnasta, leukokratna magmatska stena koja se sastoji uglavnom od alkalnih feldspata, nefelina i bojenih minerala, poput sovita, s prisustvom karbonata (slika 675 i slika 676).



Slika 675. Nefelin sijenit, Brazil; veličina uzorka 15 cm



Slika 676. Mikrosnimak nefelin sijenita iz Brazila. N+, duža strana fotografije 2 mm

FOID SIJENIT

Foid sijenit je zajednički naziv i za nefelin moncosijenit. Ove plutonske stene imaju alkalne feldspate i nefelin. Pertiti i antipertiti su uobičajeni. Mogu se javiti alkalni pirokseni (aegirin-augit, egirin) i amfiboli (ribekit, arfvedsonit) i liskun.

URTIT

Urtit je vrsta (varijetet) ijolita, s više od 70% nefelina i bojenih minerala, s dominantno prisutnim klinopiroksenom.

MELTEIGIT ima više klinopiroksena od nefelina.

FERGUSIT

Fergusit je karakterističan po pseudoleucitu. Sadrži ortoklas, nefelin i zeolite. Ove stene obično se javljaju kao blokovi izbačeni iz vulkana.

ALKALNI GABRO

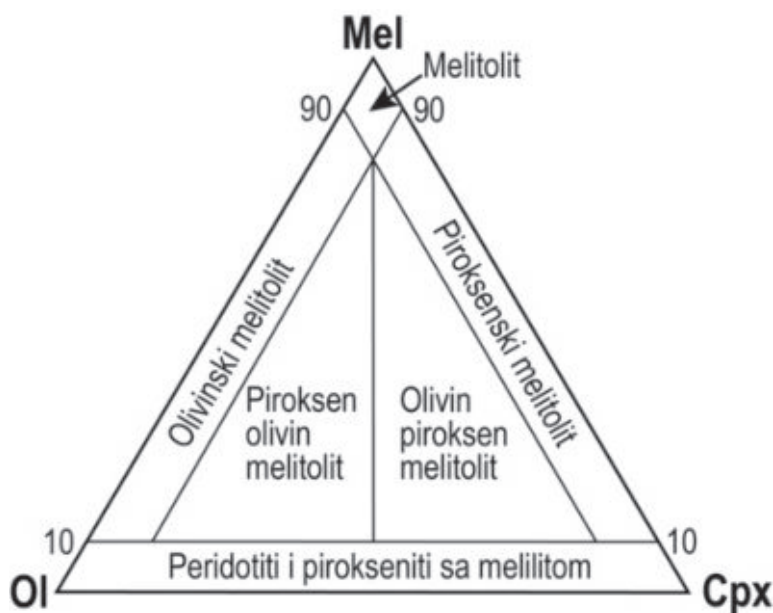
Alkalni gablo je bogat alkalijama, odnosno, kao bitne minerale sadrži, osim bazičnog plagioklasa i bojenih minerala, feldspatoide, leucit i nefelin. U prirodi su ove stene retke.

STENE S MELILITOM

Stene s melilitom sadrže više od 10% modalnog melilita. Opšti pojam za plutonske stene koje sadrže melilit je melitolit, a za vulkanske je melilit.

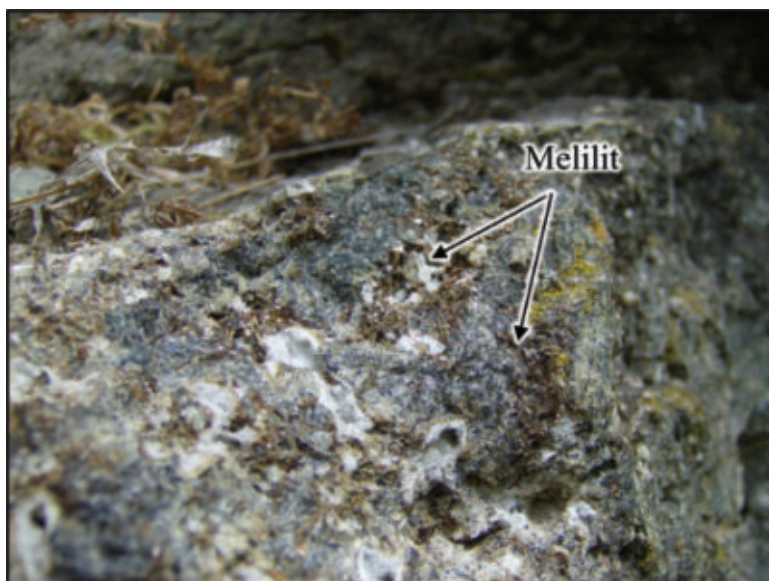
MELITOLIT

Melitolit je plutonska melititska stena klasifikovana prema odnosu sadržaja melilita i piroksena i olivina (slika 677).



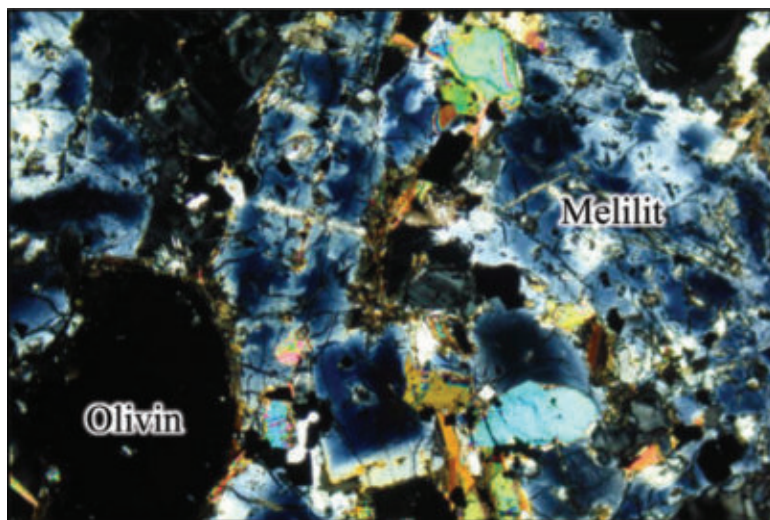
Slika 677. Klasifikacija melitolita (*Dunworth i Bell, 1998*)

Većina melitolita ima $M > 90$ i može se klasifikovati prema sadržaju bojenih minerala, na primer, piroksen melilit. Danvort i Bel (*Dunworth i Bell, 1998*) stene sa više od 65% melilita nazivaju *ultramelitolitima*. U njima se, osim melilita, javljaju perovskit, olivin, hauin, nefelin i piroksen (slike 678 i 679). Ako su ovi minerali zastupljeni s više od 10% u steni, mogu se koristiti sledeći nazivi za stene: 1) ako perovskita ima više od 10%, naziv je **afrikandit**; 2) ako olivina ima više



Slika 678. Melitolit, Italija; veličina (dužina) snimljenog izdanka oko 1 m

od 10%, naziv je **kugdit**; 3) ako hainita ima više od 10% i melilita više od hainita, naziv je **okait**; 4) ako nefelina ima više od 10% i melilita ima više od nefelina, naziv je **turjait**; 5) ako piroksena ima više od 10%, naziv je **nekompargrit**. Ako je treći mineral prisutan u količinama većim od 10%, onda se može primeniti kao modifikator, npr. magnetit-piroksen melilitolit itd.



Slika 679. Mikrosnimak melilita, Italija; N+, 40 x

Vratimo se „normalnoj” petrologiji s „opšteprihvaćenim” i, verujem, jasnijim i manjim brojem naziva za alkalne stene koji se „lako” pamte.

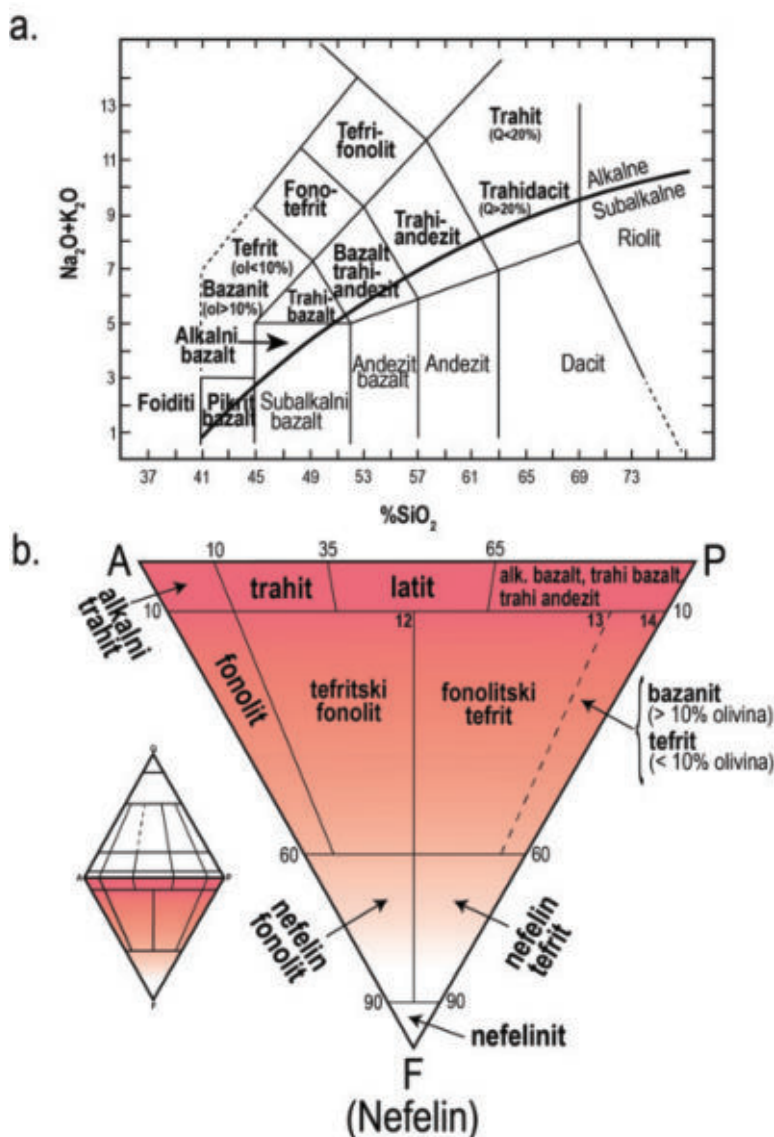
Kao i kod drugih plutonskih stena, gde su male razlike u odnosima sadržaja minerala, prefiks *leuko* ili *mela* može se dodati na ime stene kako bi se označio njen naziv. U velikom broju udžbenika, nažalost, specifična imena se ponekad koriste umesto ovih prefiksa stena sa istim mineralnim sastavom, ali drugačijim veličinama zrna. Tako je leukokratna varijanta ijolita poznata kao **urtit**, dok se melanokratna varijanta naziva **melteigit**.

NEFELIN SIJENIT bogat egirin-augitinom naziva se, ako je mezokratni, **malignit** ili **šonkinit**, ako je melanokratni. Pomenuta imena se odnose na grubozrnaste alkalne stene.

Prefiks *mikro* se može koristiti da označi analogne srednjoznaste stene: npr. *mikrosijenit* označava sitnozrnu stenu istog sastava kao sijenit, ali sitnog zrna. Srednjozrni **sovit** ponekad se naziva i **alvikit** itd.

V.17.2 VULKANKSKE ALKALNE STENE

„Isprepletene” petrografske i genetske sličnosti predstavljaju poseban problem pri klasifikaciji kalijumskih lamprofirsko-lamproit-kimberlitskih stena, kao i niza bazičnih do ultrabazičnih stena sa visokim sadržajem fluida. Sadržaj i odnos **Na/K** u alkalnim serijama variraju, posebno u kontinentalnim magmatskim stenama. U tipičnim okeanskim alkalnim stenama, on je mali, a natrijum (**Na**) je obično više zastupljen (slika 680a i b). Postoje i pojave ovih stena u okeanskom okruženju koje su bogate kalijumom, poput Tristan da Cunje.



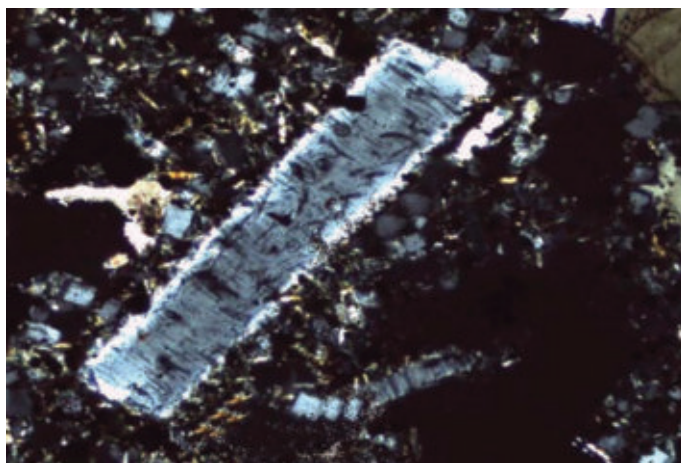
Slika 680a. *TAS* dijagram za vulkanske alkalne stene (*Le Maitre, 2002*);
680b. *QAPF* dijagram za alkalne vulkanske stene bogate nefelinom

U kontinentalnim alkalnim stenama, kalijum (**K**) uglavnom je više zastupljen od natrijuma (**Na**). Za klasifikaciju alkalnih vulkanskih stena „najbolje” je imati modalni, a naročito hemijski sastav ovih stena. Na slici 680 je prikazana klasifikacija **IUGS**-a za vulkanske stene prema **TAS** dijagramu (odnos ukupnih alkalija i silicije), sa „širokim” poljem alkalnih stena, koje obuhvata bazalte do fonolita, a te stene najviše se javljaju u kontinentalnim područjima. Takođe je prikazano i polje alkalnih do ultraalkalnih lava koje se javljaju u Istočnoafričkom riftu. Kao i kod subalkalnih stena, odgovarajući prefiksi mogu se dodati osnovnom nazivu stene. Izračunavanje normativnih minerala takođe je korisno za klasifikaciju ovih stena. Osim navedenih podela alkalnih stena, u udžbenicima se sreću i druge klasifikacije. Među njima je i podela Mičela i Bergmana (*Mitchell i Bergman, 1991*), koja na osnovu mineralnog sastava, strukture i sredine formiranja izdvaja sledeće grupe alkalnih stena:

1. lamproite;
 2. kimberlite;
 3. kalijske lamprofire;
 4. leucit, plagioklas i alkalne stene koje su povezane sa subdukcijom;
 5. mafitske lave koje nose kalsilit, melilit i leucit (zapadni ogranak Istočnoafričkog rifta);
 6. šošonite: alkalne stene povezane sa subdukcijom, uglavnom nastaju u basenima iza luka;
 7. kalijske do ultrakalijske leucitite i leucitske bazalte, poput onih u centralnom Novom Južnom Velsu i
 8. intruzivne stene bogate kalijom.
- „Jednostavne” definicije alkalnih vulkanskih stena su sledeće:

MELILIT

Melilit je finozrna melanokratna vulkanska stena izgrađena uglavnom od melilita i klinopiroksena (slika 681). Kada odnosi sadržaja melilita (Mel), olivina (Ol)



Slika 681. Fenokristal melilita
u vulkanskoj steni melilitu. N+, 50x.

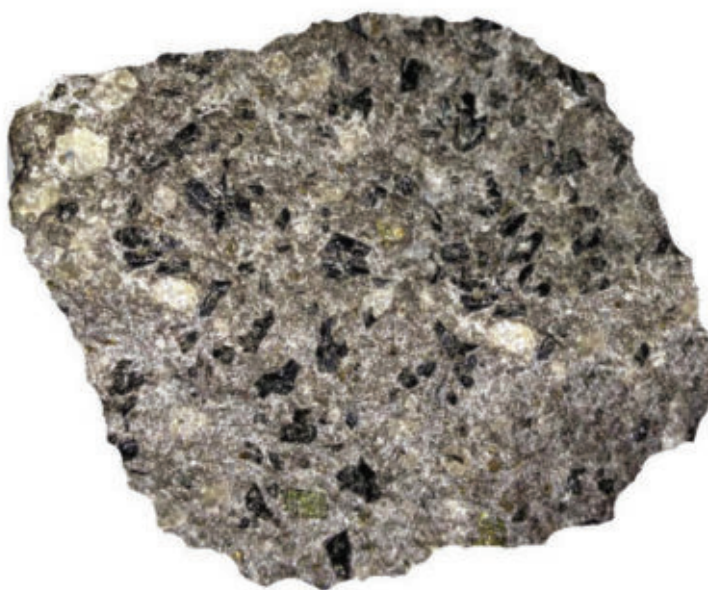
i klinopiroksena (Cpx) padnu u polje foidita na **QAPF** klasifikaciji (slika 682), na ime stene treba dodati prefiks prema odgovarajućem mineralu: *nefelin melilit*, ako je dominantan nefelin itd. Ako je dostupna hemijska analiza, treba koristiti **TAS** klasifikaciju.



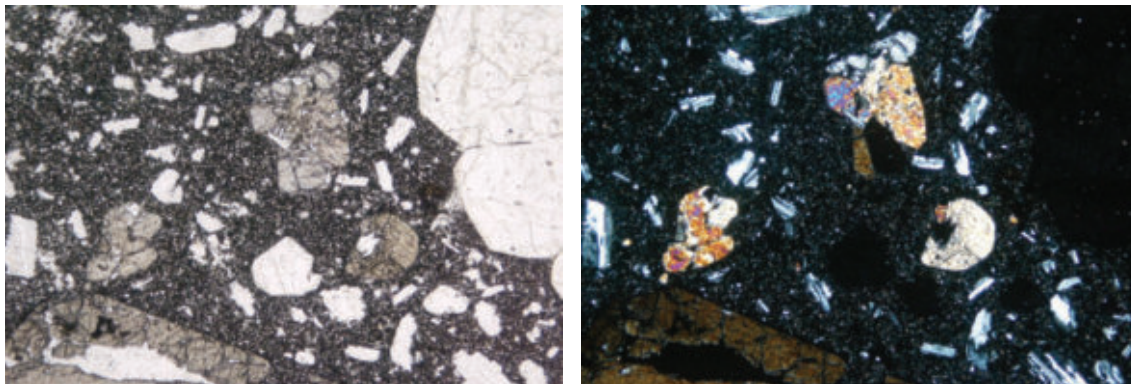
Slika 682. **QAPF** klasifikacija za alkalne stene
(*Streckeisen, 1980*)

BAZANIT

Bazanit je sitnozrna alkalna bazaltoidna stena izgrađena od kalcijuskog (bazičnog) plagioklasa, augita, nefelina i olivina (> 10%). Razlikuje se od alkalnog bazalta po većem sadržaju nefelina (> 5%) (slike 683 i 684).



Slika 683. Uzorak bazanita sa Vezuva, veličine 15cm



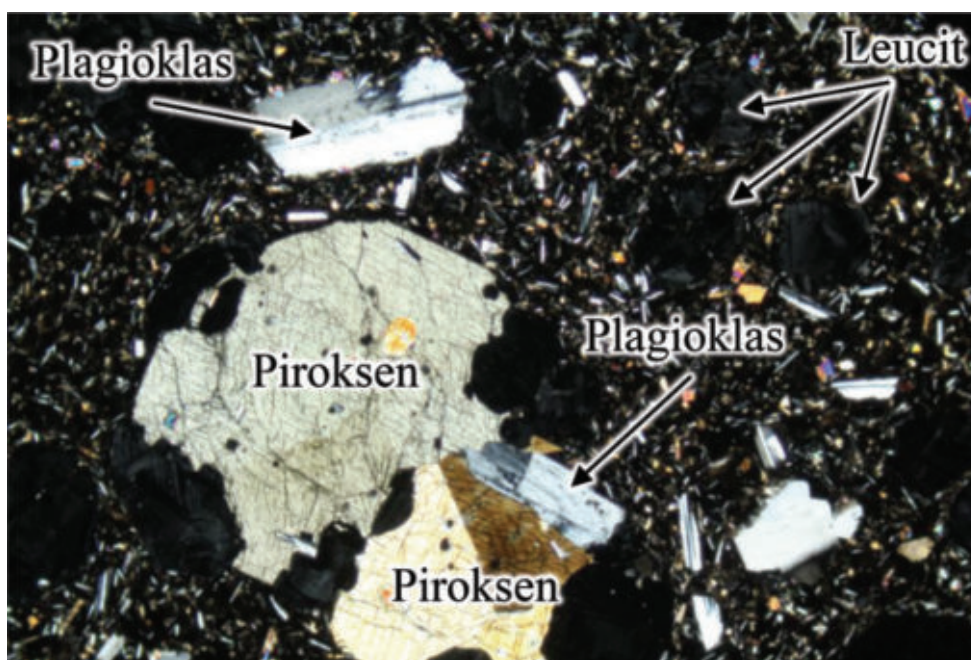
Slika 684. Mikrosnimci bazanita, levo sa paralelnim i desno sa ukrštenim nikolima. 50x

TEFRIT

Tefrit je zrnasta melanokratna magmatska stena izgrađena od kalcijuskog plagioklasa, augita i nefelina (slika 685). Ako je prisutan, olivina ima <10%. Bazaniti su tamnosive boje, dok su tefriti sivi. Obe stene su holokristalasto porfirske do vitrofirske strukture (slika 686). Fluidalne su tekture, a vrlo često su mehuraste, katkad i šljakaste.



*Slika 685. Tefrit, Vezuv;
veličina uzorka 15 cm*



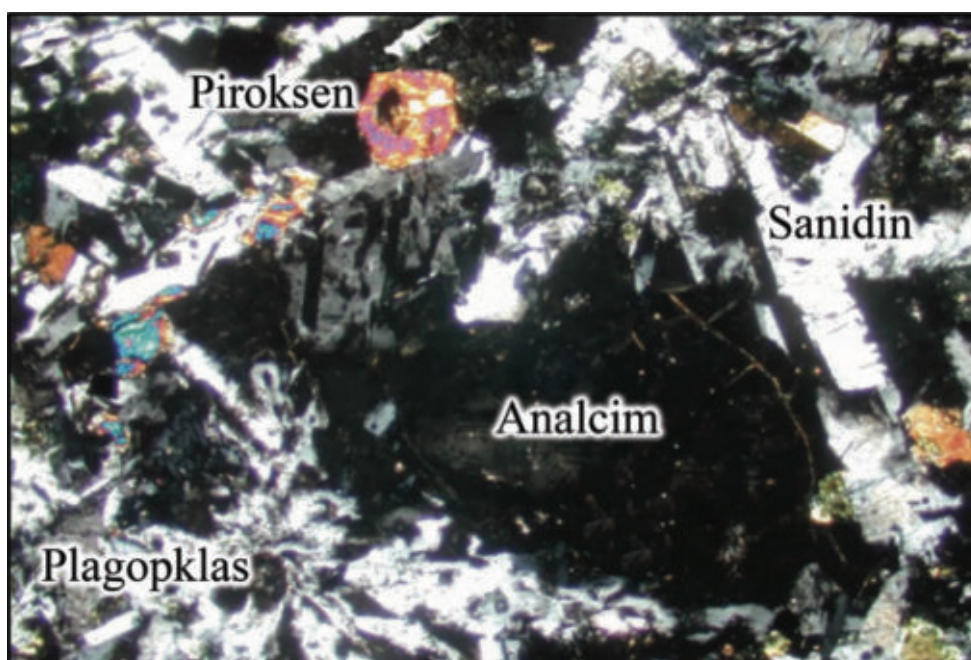
Slika 686. Mikrosnimak tefrita, Vezuv, N+, 50x

ŠOŠONIT

Šošonit je vulkanska stena, porfirske strukture (slika 687), izgrađena od fenokristala olivina, augita, plagioklasa i sanidina, koji leže uglavnom u sitnozrnoj, mikrokristalnoj do hipokristalnoj osnovnoj masi. Ponekad se u njima sreće i analcim (slika 688).



Slika 687. Šošonitska lava, Kolorado; gore desno: uzorak stene



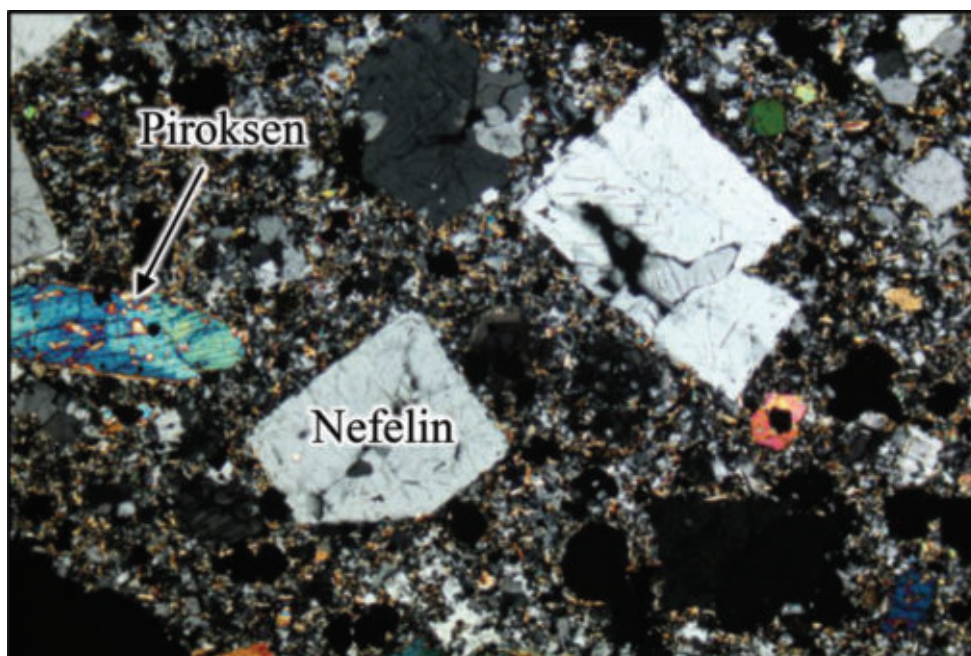
Slika 688. Mikrosnimak šošonita, Iran; N+, 40x

NEFELIN BAZALT I LEUCIT BAZALT

Nefelin bazalti i leucit bazalti su bez feldspata. Izgrađeni su od nefelina, odnosno, leucita, piroksena i olivina (slika 689). Strukture su holokristalasto porfirske do vitrofirske. Kao fenokristali najčešći su pirokseni, olivini, nefelin (slika 690). Većina feldspatoida je „povučena u osnovnu masu. Boje su tamnosive do crne.



Slika 689. Nefelin bazalt, Tanzanija; veličina uzorka 15 cm



Slika 690. Mikrosnimak nefelin bazalta. N+, 50x

FONOLIT

Fonolit je vulkanski ekvivalent alkalnog sijenita i može biti nefelinski fonolit ili leucit fonolit. Stene su porfirske strukture sa fenokristalima sanidina i anortoklasa, nefelina (leucita), natrijuskog piroksena, titano-augita i olivina bogatog **Fe**. U osnovnoj masi prisutni su alkalni feldspati, pirokseni i amfiboli. Orijentisane pritke alkalnih feldspata u osnovnoj masi su česte, kada stena dobija trahitsku teksturu. U peralkalnim fonolitima, pirokseni i amfiboli su bogati **Na** (aegirin ili ribekit/arfvedsonit). Pojedini autori fonolite svrstavaju u kisele stene. Fonoliti (kao i trahiti) više su zastupljeni u kontinentalnim vulkanskim provincijama nego u okeanskim. Kontinentalna kora verovatno deluje kao filter za uspon težih bazaltnih magmi, ali dozvoljava „prolaz“ kiselijim, lakšim diferencijatima (*Gill, 1981*). U kontinentalnim područjima javljaju se zajedno s ijolitima i karbonatitima, dok su u okeanskim područjima prisutni sa alkalnim bazaltima. Postoji više hipoteza o

poreklu magme i mestu stvaranja fonolita i trahita:

- zbog male zastupljenosti ovih stena smatra se da ne postoji primarna magma, već da trahiti i fonoliti predstavljaju ostatke diferencijata alkalnih bazalta ili nefelinita. U nekim provincijama, međutim, fonoliti nisu praćeni bazaltima, pa se pretpostavlja da ove stene mogu kristalisati i iz primarnih magmi.

Pojave ovih stena na poluostrvu Kola u Rusiji i u Istočnoj Africi, gde se trahiti, fonoliti i njihovi intruzivni ekvivalenti javljaju u većim masama nego obližnji gabro i bazalti, mogu biti dokaz da su ove stene kristalisale iz fonolitskotoleitskih magmi.

- postoji hipoteza da su ove stene nastale kontaminacijom kiselih magmi sa krečnjacima, tj. desilifikacijom, ali ona nije prihvaćena jer se smatra da krečnjaci ne mogu izvršiti toliku desilifikaciju magme, uprkos prisustvu karbonatnih stena kao uklopaka u nekim trahitima i fonolitima.

- vrlo niskim stepenom parcijalnog stapanja primarnog peridotita, koji ima manje od 1% $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, može se dobiti alkalna magma sa $>10\%$ $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, ali je tako malu količinu rastopa teško izdvojiti iz čvrstog ostatka.

Nastanak trahita i fonolita može se vezati i za kontinentalnu koru. Da bi rastop imao sastav nefelin-sijenita, „početni materijal” mora imati hemijski sastav u kojem je odnos $\text{Si}/(\text{Na} + \text{K})$ manji od 3:1. Većina sedimentnih stena uglavnom ne zadovoljava ovaj kriterijum. Jedino stapanjem karbonatnih glina i nekih evaporata mogu se dobiti rastopi trahitskog i fonolitskog sastava. Podsetimo se da fonolita ima i kod nas, na Banjici (periferija Beograda). Stene su sveže sa retkim, svežim izdancima.

Tinguit je natrijski fonolit. Javlja se i kao manja intruzija ili margina na nefelinskim sijenitskim plutonima.

Peralkalni rioliti sadrže alkalni feldspat i kvarc kao „glavne” fenokristale (najviše su zastupljeni). Prisustvo natrijskih piroksena i amfibola razlikuje peralkalne od metaluminijskih riolita.

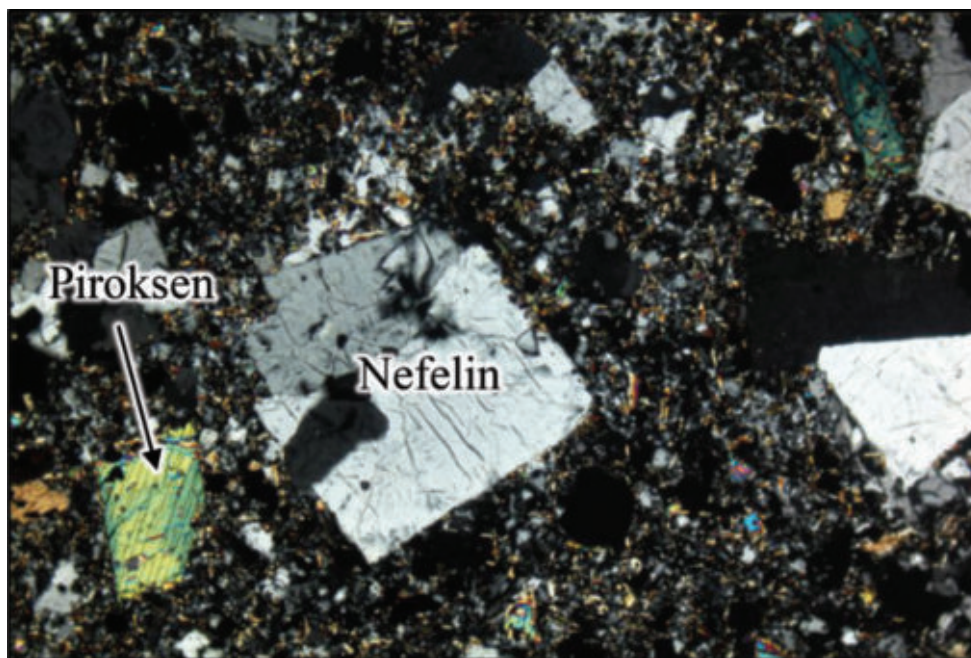
NEFELINITI

Nefeliniti su najčešći tip alkalnih (i ultraalkalnih) lava sa dominantno normativnim nefelinom i klinopiroksenom (slike 691 i 692), i ne uvek prisutnim olivinom, leucitom ili melilitom. Nefeliniti imaju više od 90% ukupnog nefelina+plagioklasa. Plutonski ekvivalenti nefelinita su varijabilnijeg sastava od vulkanita. U nekim područjima, nefeliniti su asocirani sa trahibazaltima, fonolitima, nefelin-sijenitima ili ultramafiti-



*Slika 691. Nefelinit, Nemačka;
veličina uzorka 15 cm*

ma. Ove stene se javljaju u različitim tektonskim sredinama, od okeanskih ostrva (Havaji) do kontinentalnih riftova. Često sadrže ksenolite iz kore i omotača. Plutonska stena se, pomenuli smo, „obično” naziva ijolit. Najveće pojave nefelinita na kontinentima su u Istočnoj Africi, gde su ove stene asocirane sa karbonatitima. Nefelinita ima i u Francuskoj, Nemačkoj i Češkoj. Nefeliniti se takođe javljaju i u izolovanim vulkanima, nastalim daleko od osa riftova (Havajska ostrva). U Atlantskom okeanu, nefelinitske lave su asocirane sa alkalnim bazaltima i fonoitima. Le Bas (*Le Bas, 1987*) opisao je karbonatit-nefelinitsku asocijaciju u kojoj su osnovni članovi karbonatiti, nefeliniti, ijoliti, pirokseniti i feniti. Magme bogate natrijom (Na_2O) i siromašne silicijom (SiO_2) mogu se formirati „kristalnom flotacijom” (penjanjem kristala ka površini), akumulacijom volatila blizu krovine magmatiskog rezervoara ili frakcionom kristalizacijom olivin bazanita. Bejli i Šejrer (*Bailey i Schairer, 1966*) smatraju melilisku magmu primarnim izvorom stena bogatih nefelinom.



Slika 692. Mikrosnimak nefelinita, N+, 50x

Eksperimentalna proučavanja, vršena na stenama iz omotača, ukazuju na to da nefeliniti mogu nastati niskim stepenom parcijalnog stapanja omotača, na visokom pritisku i temperaturi i visokom P_{CO_2} . Ako je nefelinit prvi produkt parcijalnog stapanja omotača koji će daljim stapanjem dati bazalte, tada su nefelinitske magme prvo izlučene. Ovakva veza je uočena u Karo provinciji u Južnoj Africi.

U tabeli 17 dati su opisi najčešćih vulkanskih i plitkih plutonskih (hipoabisalnih) alkalnih stena. Prikaz je petrološki i genetski raznolik, pa ga treba, radi boljeg razumevanja, „razumno” pojednostaviti uz neke nove kriterijume. U tekstu koji sledi prikazaćemo „najvažnije” ultraalkalne vulkanske stene sa aspekta mineralogije i, naravno, hemije (geochemije).

*Tabela 17. Nomenklatura pojedinih alkalnih vulkanskih i dubinskih stena
(prema Sorensen, 1974, Streckeisen i dr., 1979, i Le Maitre, 2002; uprošćeno)*

Bazanit	bazalt sa feldspatoidima; obično sadrži nefelin, često ima leucita i olivina
Tefrit	bazanit bez olivina
Leucitit	vulkanska stena sa leucitom i klinopiroksenom ± olivin; ne sadrži feldspate
Nefelinit	vulkanska stena sa nefelinom i klinopiroksenom ± olivin; ne sadrži feldspate
Urtit	plutonska nefelinska stena sa piroksenom (egirin-augit); sadrži > 50% nefelina i nema feldspata
Ijolit	plutonska nefelin piroksenska stena, sa 30-70% olivina
Melilitit	dominantno melilitsko piroksenska vulkanska stena (ako ima <10% olivina naziva se olivin melilitit)
Šošonit	bazalt bogat K sa K-feldspatom ± leucit
Fonolit	felzitska (leukokratna) vulkanska stena sa alk. feldspatom + nefelin; (plutonska stena je nefelin sijenit)
Komendit	peralkalni riolit sa molarnim $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 > 1$; može da sadrži Na-piroksen ili Na-amfibol
Pantelerit	peralkalni riolit sa molarnim $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.6-1.8$; sadrži Na-piroksen ili Na-amfibol
Lamproit	grupa peralkalnih, volatilima bogatih ultrabazičnih vulkanskih ili hipoabisalnih stena; mineralogija varira, ali uglavnom sadrže fenokristale olivina + piroksena ± leucita ± K-riherita ± klinopiroksena ± sanidina
Lamprofiri	različita grupa tamnih porfirskih bazičnih i ultrabazičnih stena hipoabisalnih (ili vulkanskih), obično jako alkalnih ($\text{K} > \text{Al}$) stena; obično su bogate alkalijama, volatilima, Sr, Ba i Ti, sa biotitom-flogopitom i/ili amfibolom kao fenokristalima; obično se javljaju kao plitki dajkovi, silovi ili štokovi
Kimberliti	složena grupa mešanih, volatilima bogatih (dominantan CO_2); kalijksa ultrabazičnima stena sa fino-zrnim matriksom i makrokristalima olivina, podređeno ilmenita, granata diopsida, flogopita, enstatita, hromita; ksenokristali i ksenoliti su česti
Grupa I kimberliti	stena bogata CO_2 ; ima manje kalijuma nego grupa II kimberlita
Grupa II kimberliti (oranžeriti)	stena bogata CO_2 ; ima matriks bogat liskunima (takođe sa kalcitom, diopsidom i apatitom)
Karbonatiti	magmatska stena izgrađena od karbonata (kalcita, ankerita, i/ili dolomita, obično sa klinopiroksenom, alkalnim amfibolom, biotitom, apatitom i/ili magnetitom; karbonatiti bogatiji Ca-Mg; nisu alkalni ali su obično asocirani (prate) alkalne stene

V.17.2.1 ULTRAKALIJSKE STENE

U prirodi se javljaju (retko). Ove stene su veoma bogate kalijumom (K_2O). **Ultrakalijske** stene (detaljnije u poglavlju Hemijski sastav) javljaju se sa velikim brojem „neobičnih” naziva. „Dobro” je znati neke od njih.

KAMAFUGIT

Kamafugit je vulkanska kalijumska ultrabazična stena sa modalnim ili normativnim kalsilitom. Ima visok sadržaj K_2O (2,0–8,5%), kao i visok sadržaj MgO i nizak sadržaj silicijuma (8–18% MgO , 33–44% SiO_2). Od bojenih minerala javlja se klinopiroksen i/ili olivin, a od silikatnih minerala kalsilit ili leucit. Mogu da sadrže i melilit.

ORENDIT

Orendit je vulkanska stena izgrađena od fenokristala flogopita i diopsida, kao i mikro fenokristala (u osnovnoj masi), olivina ($\sim Fo_{90}$), leucita, sanidina, flogopita, rihterita i diopsida. Nemaju nefelina.

MADUPIT

Madupit je sitnozrna vulkanska stena sa flogopitom i diopsidom kao retkim fenokristalima, koji leže u staklastoj osnovnoj masi u kojoj ima flogopita, perovskita i povremeno leucita.

LAMPROITI

Lamproiti su grupa peralkalnih ultrabazičnih stena različitog mineralnog sastava. Izgrađene su od 34–58% SiO_2 (retko do 68%) i 5–25% MgO , sadrže $K_2O/Na_2O > 5$ (*Bergman, 1987*). Stene koje prema mineralnom sastavu pripadaju grupi lamproita, „ranije” su imale različita imena: madupit, orendit, viomingit, katungit, mafurit, fortunit, jumilit itd. Sada su, u „savremenom” petrogenetskom okviru, ona „suvišna” jer su u većini slučajeva „lokalnog” tipa.

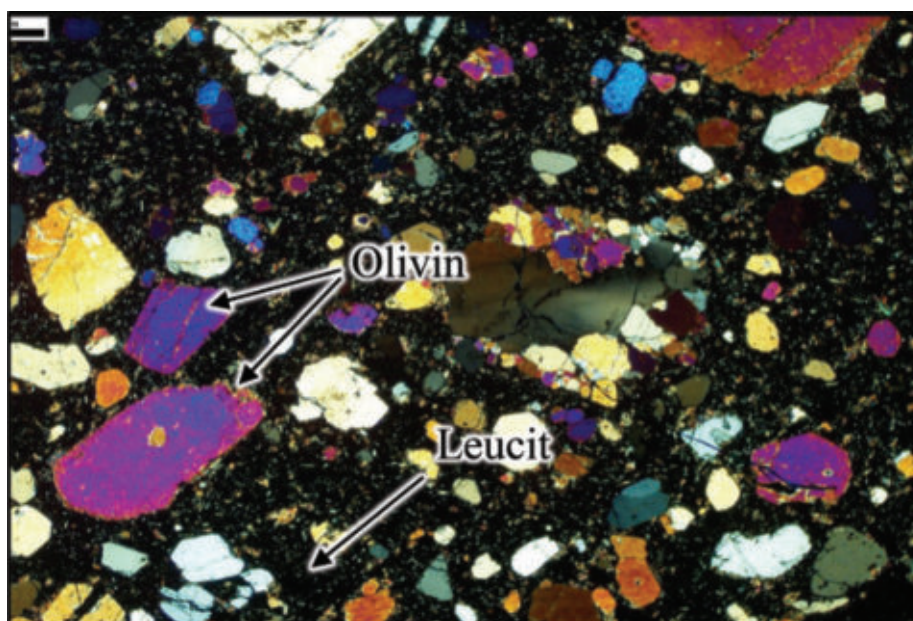
Lamproiti su izgrađeni od velikog broja minerala: titanom bogatog aluminijum siromašnog flogopita, titanom-tetraferiflogopita, kalijum-titan-rihterita, kalijumom bogatog amfibola, forsteritskog olivina (Fo_{94-87}), koji je uglavnom zamenjen serpentinom, indiksitom, karbonatom ili kvarcom. Ima i diopsida, sanidina, leucita (obično zamenjen analcimom), zeolita itd. (slike 693 i 694).



Slika 693. Lamproit (USA);
uzorak veličine 15 cm

Neki od lamproita imaju i **K-Ba** titanit, **K-Zr-Ti** silikate, perovskit, spinel i mnoštvo drugih „korisnih” minerala. Od sporednih minerala javljaju se vadeit, apatit, magnezijum hromit, ilmenit i perovskit. Dijamant je važan akcesorni mineral u nekim lamproitima i smatra se da je ksenolit iz omotača. Minerali Ca i Na (plagioklasi, nefelini i melilit) uglavnom su odsutni.

Lamproiti su u stvari leucitske stene i prema mineralnom sastavu se dele na veliki broj varijeteta (tabela 18). Prisustvo minerala sa vodom ukazuje na visok sadržaj fluida u magmi iz koje su kristalisali (nastali). Lamproitima naročito „nedostaju” primarni plagioklas, natrijumski feldspat, melilit, monticelit, kalsilit, nefelin i sodalit. Uglavnom su vulkanski, ali se javljaju i kao manje intruzije, dajkovi, žice, silovi, ponekad i u dijatremama i pajpovima. Veliki broj lamproita stvoren je u relativno kratkoj magmatskoj aktivnosti (3 do 10 Ma) i slabo su diferencirani. Uglavnom ih ima u kontinentalnim sredinama sa gustom i debelom korom (>40 do 55 km), tj. litosferom (>150 do 200 km). Smešteni su i na ivicama kratona koji su doživeli jednu ili više kompresivnih faza orogeneze, riftovanja, kolapsiranja. Španski lamproiti, međutim, vezani su za mlađe subdukcione magmatske procese.



Slika 694. Mikrosnimak lamproita, južna Afrika, N+, 50x

U lamproitima se, pomenuli smo, javljaju i ksenokristali dijamanta, zbog čega su postali i „važne” stene šezdesetih godina prošlog veka. Neki od klasičnih lamproitskih pojava uključuju Leucite Hills, Vajoming (Wyoming); Smoky Buttes, Montanu u SAD, ima ih i na Antarktiku, u južnoj Španiji, zapadnoj Australiji, na Korzici, u Zambiji, zapadnoj i južnoj Africi, Indiji itd. Većina lamproita su kenozojske starosti, za razliku od kimberlita, koji su uglavnom prekenozojski.

Sličan geohemijski sastav olivinskih lamproita i nekih tipova kimberlita sa liskunima (flogopitom) ukazuje na to da ove dve grupe stena vode poreklo iz istog izvora u omotaču (*Dawson, 1987*).

Tabela 18. Nomenklatura lamproita (Mitchell i Bergman, 1991; napomena: imena stena su na engleskom jeziku)

Nomenklatura lamproita	
Stari nazivi	Preporuka IUGS-a
wyomingite	diopsid-leucit-flogopit lamproite
orendite	diopsid-sanidin-flogopit lamproite
madupite	diopsid-madupidski lamproite
cedricite	diopsid-leucit lamproite
mamilite	leucit-rihterit lamproite
wolgitite	diopsid-leuc.-rihter.-madupidski lamproit
fritzroyite	leucit-flogopit lamproit
verite	hijalo-ol.-diopsid-flogopit lamproit lamproit
jumillite	olivin-diopsid-rihterit-madupidski lamproit
fortunite	hijalo-enstatit-flogopit lamproit
cancalite	enstatit-sanidin-flogopit lamproit

Od kraja prve decenije 19. veka verovalo se da je jedini primarni izvor dijamanta bio kimberlit. Sekundarni su bili aluvioni nastali raspadanjem ove stene. Ali, krajem sedamdesetih godina prošlog veka u zapadnoj Australiji otkrivene su pojave dijamanta u vulkanoklastičnim stenama, lamproitima.

Ove stene imaju niske sadržaje Al_2O_3 u odnosu na alkalije, pa je većina peralkalna sa visokim sadržajem inkompatibilnih elemenata. Takođe, bogate su kompatibilnim mikroelementima, **Cr** i **Ni** itd., koji su uglavnom u ksenokristalima olivina.

Dijamant u ovim stenama je akcesorni mineral (i nije redovno prisutan). Obično sadrži inkluzije različitih minerala, koji se mogu videti u polarizacionom mikroskopu. Hemijski sastav inkluzija ukazuje na to da su dijamanti kristalisali i sačuvani na dubinama od 120 km do 200 km i temperaturama od 1200 °C do 1500 °C (*Hemstaedt i Gurney, 1995; Gurney i Zweistra, 1995*). To podrazumeva neuobičajeno nizak geotermalni gradijent (8–10 °C/km), posebno za postojeće hipoteze da je naša planeta bila toplija tokom prekambrijuma. Smatra se da su dijamanti nakon dugog „skladištenja” u relativno hladnom, verovatno nekonvektivnom omotaču, bili zahvaćeni uzlaznim, mlađim magmama. Delovi stene u kojima su se dijamanti prvobitno nalazili sada su ksenoliti eklogita i peridotita (uglavnom osiromašeni harcburgit) u steni domaćinu lamproitima, oranžeritima i kimberlitima. Zaključujemo da dijamant daje značajne podatke o poreklu i uslovima stvaranja magme domaćina, a po pojedinim autorima i tektonsku istoriju planete (*Haggerty, 1999*).

Lamproiti se javljaju i u arhejskim i proterozojskim terenima. Izotopske starosti **Sm-Nd** i **Rb-Sr** granatskih i piroksenskih inkluzija su 900 miliona godina do čak 3,3 Ga.

Skot-Smit i Skinner (*Scott-Smith & Skinner, 1984b*) i Mičel (*Mitchell, 1986*) predložili su klasifikaciju lamproita na osnovu prisutnih flogopita, olivina, diopsida, sanidina i leucita. Stene sa fenokristalima flogopita nazivaju se *flogopitskim lamproitima*, dok se one sa pojkilitskim flogopitom nazivaju *madupitski lamproiti*. Pomenimo da je Doson (*Dawson, 1987*) ukazao na razliku u mineralnom sastavu između lamproita i kimberlita:

1. Lamproiti sadrže staklo.
2. Lamproitska osnovna masa sadrži **K**-rihterit.
3. U kimberlitima, liskuni su bogatiji **Ti**, **Fe** i **Na**, ali siromašniji u **Al**.
4. Diopsid u osnovnoj masi lamproita ima veći sadržaj **Ti** nego oni u kimberlitima.
5. Kalcit je praktično odsutan u lamproitima.

Međutim, u prirodi postoje i mineraloške „sličnosti” između olivinskih lamproita i kimberlita grupe II. Javljaju se u različitim geološkim oblicima, najčešće kao dajkovi i vulkanski tokovi, ali i u dijatremama, silovima, probojima itd. Generalno su vezani za postorogene faze u područjima koja su „doživela” kontinentalni sudar (sutur zone).

V.17.2.2 LAMPROFIRI

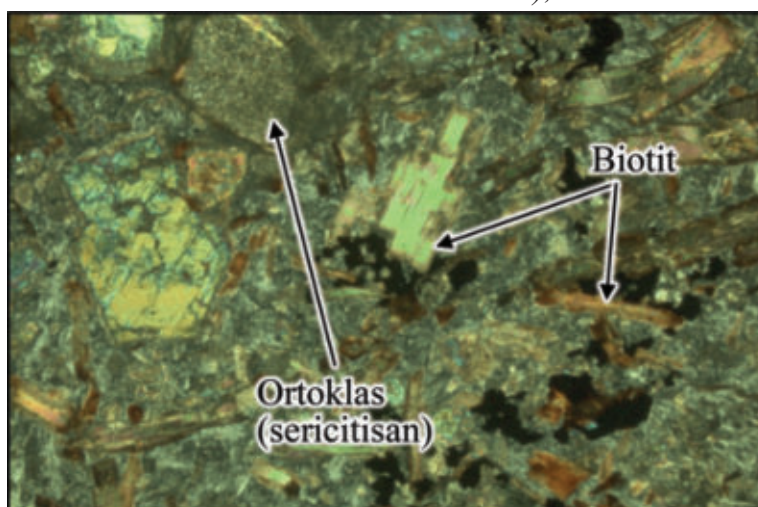
Naziv za ovu grupu stena dao je nemački istraživač Fon Gumbel (von Gumbel) krajem devetnaestog veka, koji je „skovao” termin da bi opisao sjajne porfirske stene bogate biotitom iz Fihtelgebirgea u Nemačkoj. *Lampros porphyryus* na grčkom jeziku znači „blistavi porfir”, što čini *lamprofir* jednim od pogodnijih i deskriptivnijih pojmova u magmatskom leksikonu. Od tada se naziv stene proširio i „degradirao” na široku lepezu hipoabisalnih stena koje sadrže mafitske fenokristale, pre svega biotit, zbog čega su ove stene postale izuzetno raznolike sa velikim brojem imena, naziva koji nisu imali ništa zajedničko osim porfirske strukture. Stoga se naziv *lamprofir* upotrebljava samo kao terenski termin, a posebna imena su „poželjna” kada su poznati mineralni sastav i struktura. Vratimo se detaljnijem prikazu ovih stena.

Lamprofiri su porfirske, ali i **zrnaste** (često **porfiroidne**) **strukture**, tamne bazične do ultrabazne stene, izgrađene od fenokristala biotita, olivina, amfibola, ponekad i klinopiroksena koji leže u sitnozrnoj osnovnoj masi izgrađenoj od kalijskog feldspata, plagioklasa, feldspatoida, kalcita, **Fe-Ti** oksida i različitih feromagnezijskih silikata (slike 695 i 696). Imaju visok sadržaj **H₂O**, a ponekad sadrže vrlo malo **SiO₂** (ispod 15%), kada prelaze u karbonatite. Najčešća vrsta je mineta (prikazana u okviru sijenita), izgrađena od ortoklasa i **Fe-Mg** liskuna (biotita). Lamprofiri su među najrasprostranjenijim alkalnim stenama. Raznoliki mineralni i

hemijski sastav su „problem” za generacije geologa, koji su pokušali da ih klasifikuju na neki smislen način. Tradicionalno, lamprofiri su smatrani isključivo dijatremama, dajkovima, silovima, ali se ove stene javljaju i kao lokalni tokovi lave, veoma retko i kao „umereni” (plitki) plutoni, kada su krupnijeg zrna. Petrolozi su počeli „ozbiljno” da proučavaju lamprofire, koji



Slika 695. Lamprofir (mineta sa Rudnika); veličina uzorka 10 cm



Slika 696. Mikrosnimak minete sa Rudnika; N+, 40x

se hemijski „teško” odvajaju od drugih „normalnih” stena i imaju sledeća „opšta” svojstva:

1. Obično se javljaju kao dajkovi i imaju strukture dubinskih ili vulkanskih stena (zrnaste i porfirske, ponekad i prelazne, porfiroidne).
2. Lamprofiri su mezokratne do melanokratne stene ($M=35-90\%$), retko holomelanokratne stene ($M>90$).
3. Feldspati i/ili feldspatoidi, kada su prisutni, ograničeni su na osnovnu masu.
4. Od bojenih minerala sadrže biotit (ili Fe-flogopit) i/ili amfibol, a ponekad i klinopiroksen.
5. Hidrotermalna promena olivina, piroksena, biotita i plagioklasa je česta.
6. Kalcit, zeoliti i drugi hidrotermalni minerali mogu se pojaviti kao primarne faze.
7. Obično imaju visoke sadržaje K_2O i/ili Na_2O , H_2O , CO_2 , S, P_2O_5 i Ba u poređenju sa drugim stenama sličnog sastava.

8. Slojevitost ili zonska unutrašnja struktura unutar dajka ukazuje na diferencijaciju, mada se ponekad javljaju i kao „kapljice” koje se ne mešaju sa ostalom magmom.
9. Dokaz o visokom sadržaju volatila je prisustvo primarnog kalcita, zeolita ili drugih vodenih minerala, za koje se normalno smatra da imaju hidrotermalno poreklo.

Potkomisija **IUGS**-a više ne odobrava pojmove *lamprofirske stene* ili *lamprofirski klan*, koje su koristili Lemetr (*Le Maitre i dr., 1989*) i Rok (*Rock, 1991*) da bi obuhvatili lamprofire, lamproite i kimberlite jer se lamproiti i kimberliti posmatraju nezavisno. Preporučena mineraloška klasifikacija ovih stena je data u tabeli 19. Rok (*Rock, 1987*) smatra da kimberlite i lamproite treba smatrati podgrupama klana lamprofira, budući da ih karakteriše i prisustvo biotita. Lamprofiri se javljaju u širokom spektru tektonskih okruženja, uključujući kontinentalne riftne zone, okeanska ostrva, ostrvske lukove, aktivne kontinentalne margine i kontinentalne zone sudara.

Lamprofiri se relativno „lako” prepoznaju na terenu. Imaju fenokristale isključivo mafičnih minerala (obično biotita ili amfibola), sa feldspatima i/ili feldspatoidima koji su ograničeni na osnovnu masu. U najširem smislu, to je „porodica” lamprofira holomelanokratnog do mezokratnog sastava. Obično se javljaju u kasnijim fazama magmatskog ciklusa i često se hemijski preklapaju sa drugim tipovima stena.

Visok sadržaj fluida (posebno H_2O) i „obilni” fenokristali liskuna i amfibola su karakteristike lamprofira. Smatra se da ove stene nastaju usled „zadržavanja” fluida i kristalizacijom na visokom pritisku ili „dugotrajnim” procesima diferencijacije (*Mitchell, 1994 a*). Zbog toga lamprofiri mogu biti i „proizvodi” kristali-

Tabela 19. Klasifikacija i nomenklatura lamprofira
(*Streckeisen i dr., 1979, modifikovano*)

Lamprofiri				
Sadržaj salskih minerala		Dominantni femski minerali		
Feldspati	Feldspatoidi	biotit > hornblende, ±diopsid augite, (±olivin)	hornblenda, diopsid augite, (±olivin)	braon hornblenda, Ti- augite, olivin biotit
or > pl	nema	mineta	vogezit	-
pl > or	nema	kersantit	spesartit	-
or > pl	feld > foid	-	-	sanait
pl > or	feld > foid	-	-	kamtonit
-	staklo ili foidi	-	-	mončikit

or = alkalni feldspat; pl=plagioklas; feld=feldspati; foid=feldspatoidi

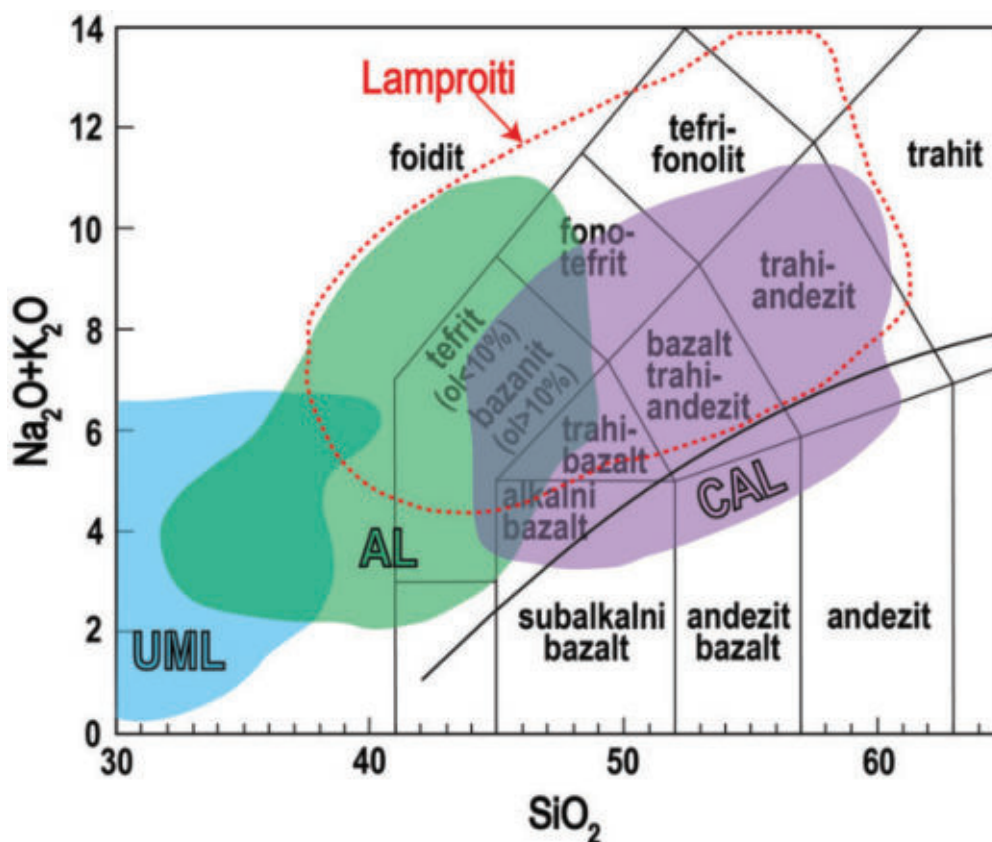
zacije uobičajenih vrsta magme koji se javljaju u neobičnim uslovima, pre svega velikom sadržaju H_2O . Međutim, treba biti obazriv i imati što više podataka za „pravi” odgovor o nastanku ovih stena.

Na osnovu mineralnog sastava, strukture i tektonske sredine stvaranja, Rok (**Rock, 1987**) izdvaja tri grupe lamprofira (slika 697):

1. **Kalk-alkalni lamprofiri (CAL)**, koji sadrže fenokristale biotita ili hornblende sa alkalnim feldspatom ili plagioklasom u sitnozrnoj osnovnoj masi, nastaju u subdukcionim zonama, obično su asocirani sa kalk-alkalnim granitoidima ili sa više alkalnih šošonita u vulkanskom frontu. Ove stene su takođe povezane i sa granitoidnim plutonima u orogenim pojasevima.

2. **Alkalni lamprofiri (AL)** sadrže fenokristale kaersutita ili zonarnog Ti-augita u osnovnoj masi, izgrađenoj od feldspata i feldspatoida. Obično se javljaju u unutrašnjim delovima ploča i riftova, prateći druge alkalne magme, od blago alkalnih gabra do visoko alkalnih kompleksa stena. Ove stene su takođe udružene (asocirane) i sa sijenit-gabrovima ili alkalnim stenama, karbonatitima u kontinentalnim sredinama.

3. **Ultrabazični** (sinonim je *ultramafični*) **lamprofiri (UML)** imaju fenokristale flogopita, olivina i/ili augita u osnovnoj masi, izgrađenoj od perovskita, karbonata i/ili melilita. Kada je sadržaj SiO_2 niži od 20%, prelaze u karbonatite.



Slika 697. Sastav lamprofira (**Rock, 1987**) i lamproita na TAS dijagramu

Ove stene su retke i povezane su sa alkalnim ultramafičnim-karbonatskim centrima ili sijenitima u kontinentalnim područjima. Većina ovih stena ima sadržaj SiO₂ manji od 36%, dok većina CAL-ova ima sadržaj SiO₂ iznad 46%, kada se znatno „preklapa” sa drugim vrstama stena. Rok (**Rock, 1987**) uključio je lamprofire i kimberlite unutar šireg „lamprofirskog klana”, ali ova veza nije prepoznata od strane IUGS (**Le Maitre, 2002**). Nomenklatura lamprofira „pati” od velikog broja naziva stena (tabela 20). Lamprofiri imaju visoke sadržaje inkompatibilnih mikroelemenata, što ukazuje na to da su nastali niskim stepenom parcijalnog stapanja metasomatskog omotača. Pojedini autori smatraju da je flogopit nastao unosom fluida u klinasti omotač iznad subdukovane ploče. Lamprofiri, kako smo pomenu-li, imaju visoke i promenljive sadržaje H₂O, CO₂, F, Cl, SO₃, K, Na, Sr, Th, P, Ba i LREE itd.

Tabela 20. Nazivi stena iz grupe lamprofira (Rock, 1987)

Grupa	Naziv stene	Glavni fenokristali	Salski min. u osnovnoj masi
CAL	mineta	biotit > hornblenda	alkalni feldspat > plag
	vogezit	hornblenda > biotit	alkalni feldspat > plag
	kersantit	biotit > hornblenda	plag > alkalni feldspat
	spesartit	hornblenda > biotit	plag > alkalni feldspat
AL	sanait	kersutit ± Ti-augit	(alkalni feldspat > plag) > foid
	kamtonit	kersutit ± Ti-augit	(plag > alkalni feldspat) > foid
	mončikit	kersutit ± Ti-augit	analcim ± staklo
UML	alnoit	flogopit ± olivin ± augit	melilit ± perovskit ± kalcit
	ailikit	olivin ± HCP ± amfibol ± flog.	kalcit ± perovskit
	damkjernit	biotit ± Ti-augit	nefelin ± kalcit ± alkalni feldspat

V.17.2.3 STENE SA LEUCITOM

Stene sa leucitom, nakon „eliminacije” lamproita i kamafugita, treba nazvati prema QAPF klasifikaciji vulkanita, dodajući prefiks *leucit* ili *stena sa leucitom*. Stene koji sadrže malo ili su bez feldspata su leucititi i padaju u polje 15 – foidit, podeljeno na tri potpolja:

- 1) QAPF potpolje 15a, fonolitski leucitit u kojem je 60–90% salskih sastojaka i alkalni feldspati > plagioklasa;
- 2) QAPF potpolje 15b, tefritski leucitit u kojem je 60–90% salskih sastojaka i plagioklasi > alkalni feldspat;
- 3) KAPF potpolje 15c, leucitit sensu stricto, u kojem su 90–100% salski minerali i leucit je jedini feldspatoid.

Pomenimo, na kraju, da „nije lako utvrditi nedvosmislen” hemijski kriterijum za razlikovanje ove grupe stena.

Na **TAS** dijagramu, leucititi značajno prelaze iza polja foidita u susedna polja. Oni se bolje razlikuju od lamproita drugim parametrima sastava, mada se i ovde pojavljuje „preklapanje”.

Hemijske karakteristike kalijskih stena i pokušaji da se lamproiti razlikuju od određenih leucitnih stena uz korišćenje različitih kriterijuma dali su Foli i dr. (**Foley i dr., 1987**) i Mičel i Bergman (**Mitchell i Bergman, 1991**).

V.17.2.4 STENE SA KALSILITOM

Glavni minerali stena koje sadrže kalsilit uključuju klinopiroksen, kalsilit, leucit, melilit, olivin i flogopit. Stene sa kalsilitom, ali bez leucita ili melilita, mogu se nazvati *kalsilitit*. Ako je stena plutonska, pojam *piroksenit* se može bolje primeniti. Stene mafurit i katungit, zajedno sa tesno povezanom leucitskom stenom – uganditom, klasifikovane su kao olivinski leucititi i glavni su članovi kamafugit-ske serije (**Sahama, 1974**).

Na osnovu klasifikacije **IUGS**-a, prisustvo esencijalnog melilita i/ili leucita ukazuje na to da treba primeniti i klasifikaciju stena koje nose melilit ili leucit.

Prisustvo kalsilita i leucita smatra se značajnim petrogenetskim indikatorom i naziva se kamafugit. Plutonske stene sa kalsilitom javljaju se u Italiji i na severnom Bajkalu.

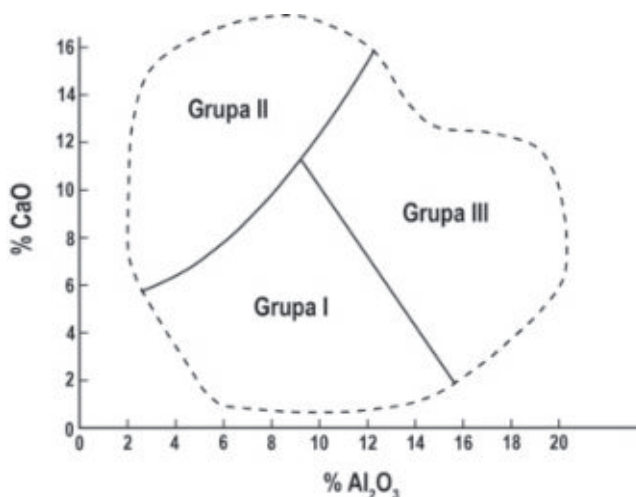
V.18 HEMIJSKI SASTAV ALKALNIH I ULTRAALKALNIH STENA

Alkalne stene, prema hemijskom sastavu, kako smo naveli, pripadaju kalijskoj ili natrijskoj grupi koje su u prirodi češće. Klasifikacija IUGS-a (*Le Bas i dr., 1986; Le Maitre, 2002*) preporučuje da se termin *natrijski* primenjuje kada je $\text{Na}_2\text{O} > 4$ u odnosu na K_2O , a *kalijski* kada je $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$. Kao što znamo, alkalne stene sadrže visoke sadržaje inkompatibilnih elemenata u odnosu na druge magmatske stene.

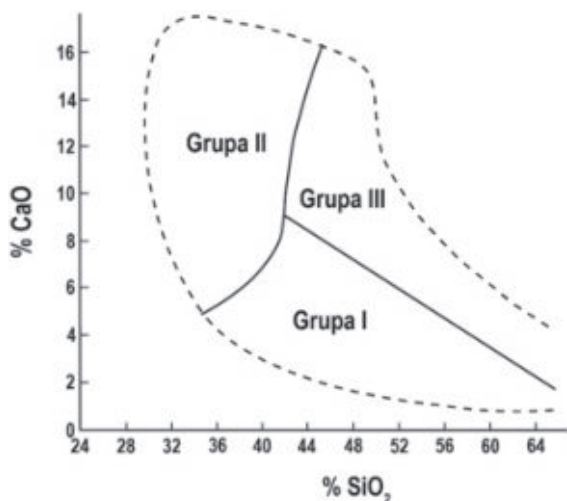
Kalijske stene su definisane odnosom $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, ali pomenuti kriterijum za razdvajanje nije dovoljan. Kalijske stene se dalje dele na „kalijske” i „ultrakalijske”. Druga navedena grupa, „ultrakalijske”, najčešće se definiše molarnim odnosom K/Na koji je veći od 3 (*Mitchell i Bergman, 1991*). Budući da se odnos K/Na u magmatskoj seriji povećava sa diferencijacijom, bazične stene sa visokim odnosom K/Na su veće nego kod silicijskih (kiselih) stena. Foli i dr. (*Foley i dr., 1987*) definišu „ultrakalijske” stene kada je $\text{K}_2\text{O} > 3$ tež.%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 2$ i $\text{MgO} > 3$ tež.%.

V.18.1 ULTRAKALIJSKE I KALIJSKE STENE

Ultrakalijske stene su hemijski heterogene, sa velikom varijacijom većine makro i mikro elemenata i visokim sadržajem fluida (H_2O , CO_2 , F , Cl i SO_2). Prema „preporuci” Foli i dr. (*Foley i dr., 1987*), koristimo termin *ultrakalijski* da bismo opisali magmatske stene sa visokim sadržajem K_2O ($> 3\%$) i inkompatibilnih mikroelemenata. Visoki su i sadržaji MgO (visok Mg broj), Ni , Cr i drugih mikroelemenata koji su karakteristični za relativno primitivne bazaltne magme. Na slikama 698 i 699 dati su odnosi CaO , Al_2O_3 i SiO_2 za ultrakalijske stene. Stene grupe I, lamproiti, odlikuju se niskim sadržajem Al_2O_3 , CaO i Na_2O . Silicijum-dioksid (SiO_2) varira između 36% i 60%, a takođe imaju i visok MgO broj. Stene grupe II imaju nizak sadržaj SiO_2 ($< 46\%$), ali visok CaO i relativno nizak sadržaj Al_2O_3 . Na istim slikama prikazani su i kimberli-

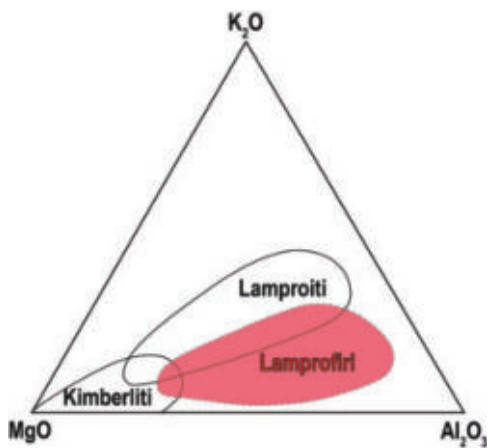


Slika 698. Klasifikacija ultrakalijskih stena na osnovu sadržaja Al_2O_3 i CaO (*Foley i dr., 1987*)



Slika 699. Klasifikacija ultrakalijskih stena na osnovu sadržaja SiO_2 i CaO (Foley i dr., 1987)

u tektonski aktivnim područjima. Stene grupe II prisutne su i u kontinentalnim riftnim zonama, dok se stene grupe III javljaju u aktivnim orogenim zonama. Hemijska svojstva ultrakalijskih stena grupe I (nizak sadržaj CaO , Al_2O_3 i Na_2O) ukazuju na to da su one „izvedene” iz osiromašenog izvora omotača koji je kasnije bio metasomatski obogaćen K_2O i inkompatibilnim elementima (Foley i dr., 1987). Stene grupe II takođe imaju nizak sadržaj Al_2O_3 i Na_2O , što takođe ukazuje na osiromašeni izvor. Ove stene, međutim, imaju visok sadržaj CaO , što zahteva nepotpunu eliminaciju klinopiroksena tokom procesa depletiranja (osiromašenja) ili naknadno uvođenje CaO tokom kasnijeg metasomatskog događaja. Stene grupe III imaju visok sadržaj CaO , Al_2O_3 i Na_2O , te stoga nema dokaza za prethodni „događaj osiromašenja” u njihovom izvoru. Slika 700 je trokomponentni dijagram K_2O - MgO - Al_2O_3 (tež.%) koji prikazuje glavne razlike u sastavu između kimberlita, lamproita i lamprofira. Dawson (Dawson, 1987) pokazao je da kimberliti grupe II imaju hemijske sličnosti sa olivinskim lamproitima više nego kimberliti grupe I. Preklapajuća polja odražavaju nastanak iz sličnih izvora omotača. To je potvrđeno i sastavom izotopa.



Slika 700. Trokomponentni dijagram za kimberlite, lamproite i lamprofire (Bergman, 1987)

SADRŽAJI MIKROELEMENTATA

Ultraalkalne i alkalne stene su obogaćene inkompatibilnim mikroelementima, koji odražavaju i hemijski sastav njihovog izvora omotača, procese parcijalnog stapanja, asimilaciju itd., koji su uključeni u njihovo formiranje.

Sadržaji kompatibilnih elemenata, kao što su **Ni**, **Cr**, **Sc** i **V**, takođe su važni u određivanju sastava primarne magme. Sećamo se, magme sa više od 500 ppm **Ni** i 1000 ppm **Cr** mogu se smatrati primarnim. Međutim, za ove alkalne stene to ne važi uvek jer metasomatozom lerzolitkog izvora u omotaču mogu se eliminisati olivin i ortopiroksen, a nastati klinopiroksen+flogopit+granat. Parcijalnim stapanjem tako „modifikovanog” omotača više se ne mogu ograničiti vrednosti **Mg**, sadržaji **Ni** i **Cr**, koji tradicionalno karakterišu primarne magme u ravnoteži sa harcбургitskim (olivin+ortopiroksen) ostatkom (rezidumom).

Određivanje sastava primarne magme je neophodno da bi se pokazalo (i dokazalo) da ultrakalijske stene grupe I, II i III potiču od različitih roditeljskih magmi, umesto da budu povezane jedna s drugom procesima kao što su frakciona kristalizacija ili kontaminacija kore.

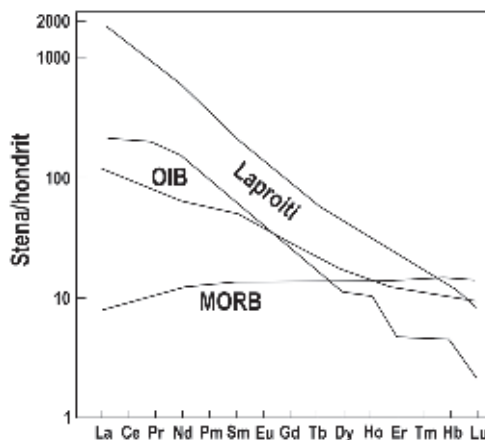
Poređenje sadržaja pojedinih mikroelemenata kimberlita i ultrakalijskih stena kada se normalizuju na hondrite, pokazuje ekstremno obogaćivanje inkompatibilnih mikroelemenata uz karakterističan „mali” negativan pik **Sr**, za koji se smatra da je karakterističan za izvor jer lamproiti nemaju plagioklase.

Normalizovane vrednosti su slične vulkanskim stenama vezanim za subdukciju, što potvrđuje pretpostavku da su ultrakalijske stene takođe vezane za ovaj proces. Kontaminacija kore takođe može biti važna u generisanju negativnih pikova za **Nb-Ta**, **Sr**, **P** i **Ti**.

Frakcionisanje inkompatibilnih elemenata tokom parcijalnog stapanja može se dogoditi ako su faze (minerali) koje ih koncentrišu rezidualne u izvoru pri niskom stepenu parcijalnog stapanja. Na primer, liskuni (flogopit) i amfibol (**K**-rihterit) preferencijalno bi koncentrisali **K**, **Rb** i **Ba**, dok bi „egzotičniji” minerali (vadeit, priderit, rutil, perovskit i ilmenit) mogli da koncentrišu mnogo širi opseg inkompatibilnih elemenata.

Nizak sadržaj **Nb** je karakterističan za vulkanske stene subdukcionih zona. Lamproiti i kimberliti su izrazito obogaćeni sa **REE**, a osiromašeni sa teškim **REE** u odnosu na alkalne bazalte. Sličnost u sastavu ukazuje na to da potiču (vode poreklo) iz sličnih izvora iz gornjeg omotača. Neki autori (npr. *Gao i dr., 2007*; *Guo i dr., 2006*; *Altherr i dr., 2004*) smatraju da su subdukovani okeanski sedimenti odigrali važnu ulogu u stvaranju lamproita.

Radi ilustracije, prikazaćemo sadržaje **REE** u lamproitima u poređenju sa bazaltima stvorenim u različitim geotektonskim sredinama koji su normalizovani na hondrite (slika 701). Lamproiti su značajno obogaćeni sa LREE u odnosu napomenute stene, čak više nego kontinentalna kora! Zbog



Sl. 701 Sadržaji **REE** mikro elemenata lamproita, bazalta **OIB** i **MORB-a** normalizovani na hondrite (*Mitchell i Bergman, 1991*)

toga veliki broj istraživača smatra da asimilacija materijala (stena) iz kore nije „dovoljna”, već se moraju tražiti i drugi izvori. Normalizovani dijagram mikro-elemenata lamproita (i kimberlita) sličan je bazaltima okeanskih ostrva (**OIB-a**), od kojih su bogatiji inkompatibilnim mikroelementima. Ovo ukazuje na stvaranje magmi pri manjem stepenu parcijalnog stapanja iz osiromašenog izvora omotača ili topljenjem metasomatski obogaćenog izvora. Visok odnos sadržaja **REE/REE** ukazuje na prisustvo granata u izvornom ostatku, dubokom izvoru u omotaču. Moгуće je da nekonvektivni omotač ispod starih kratera predstavlja ostatak drevnih pluma (*Herzberg i O'Hara, 1998; Haggerty, 1999*) koji je doživio dugotrajan metasomatizam i mlađe epizode vulkanizma (parcijalno stapanje), na šta ukazuju različiti sadržaji i odnosi izotopa **Sr** u lamproitima. Da li su eklogiti sa dijamantima u subkratonskom omotaču „zamrznuti” visokopritisni rastopi ili ostaci drevne subdukovane okeanske kore (*Helmstaedt i Gurney, 1995*) još uvek je otvoreno pitanje. Isto tako, izvor ugljenika za dijamante i **CO₂** rastvoren u kimberlitskim magmama – bilo iz drevne potisnute kore ili iskonskog omotača – takođe je kontroverzan.

SADRŽAJI IZOTOPA

Brojna istraživanja visoko kalijjskih magmatskih stena dokumentuju njihov **Nd-Sr** izotopski sastav, koji značajno „prevazilazi” kombinovani opseg sadržaja za **MORB+OIB**. Lamproiti iz zapadne Australije koji sadrže dijamante potiču iz izvora omotača obogaćenog odnosima izotopa **Rb/Sr** i **Sm/Nd**, koji su u saglasnosti s idejom da su ove kontinentalne vulkanske stene „došle” iz metasomatskog izvora omotača. Hoksvort i dr. (*Hawkesworth i dr., 1984*) smatraju da niski odnosi sadržaja izotopa **Sm/Nd** i **Rb/Sr** i obogaćivanje određenih mikroelemenata odražavaju migraciju silikatnih rastopa male zapremine u gornjem omotaču i da je taj proces odgovoran za visoke sadržaje **Ti**, **Nb** i **Zr** u većini bazalta unutar kontinentalnih ploča. Međutim, Menzis i Vas (*Menzies i Wass, 1983*) „tvrde” da takvo obogaćenje može biti rezultat migracije fluida obogaćenih lakim elementima retkih zemalja (**LREE**).

Prisustvo **K**-rihterita i ksenolita bez granata u kimberlitima sličnog izotopskog sastava potvrđuje postojanje visokog odnosa **Rb/Sr** u subkontinentalnoj litosferi. Ksenoliti su bogati **H₂O** u odnosu na normalni omotač i mogu biti rezultat metasomatoze omotača usled fluida bogatih **H₂O**. Njihovo poreklo nije dovoljno poznato, iako u nekim provincijama postoje jasni dokazi da su vezani za zone subdukcije.

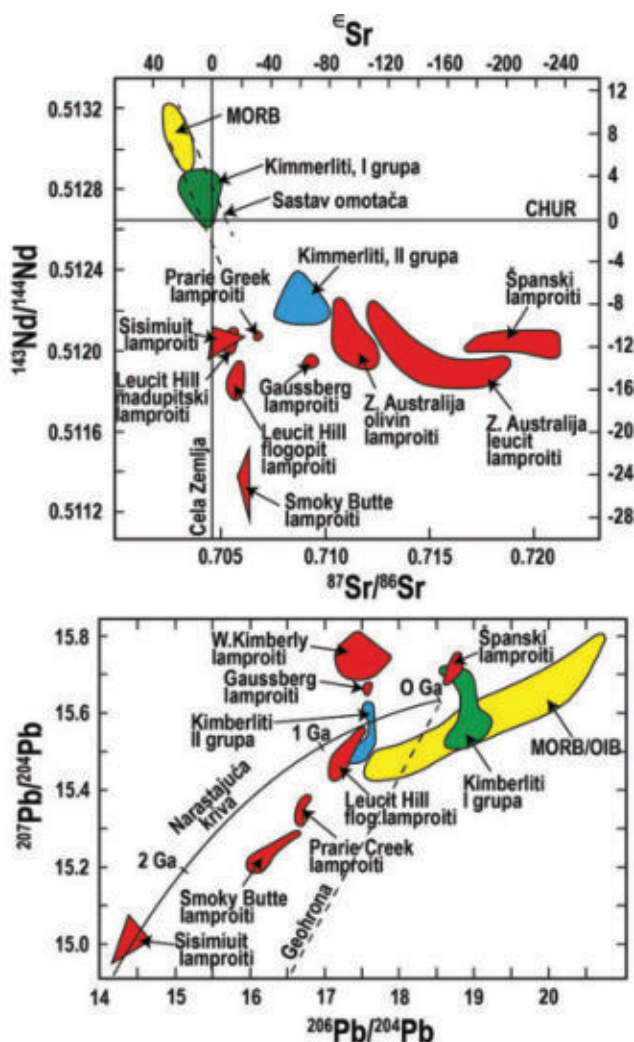
Na slici 702 prikazani su izotopski sistemi **Sr-Nd** i **²⁰⁷Pb-²⁰⁶Pb** za lamproite. Ove stene imaju nizak odnos **¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd** i visok odnos **⁸⁷Sr/⁸⁶Sr**. Zbog visokog sadržaja **REE** i **Sr** u lamproitima, ovi odnosi ne bi trebalo da se menjaju (kontaminacija s korom), pa se smatraju odrazom vrednosti omotača u kojem su ove stene formirane. Mnoge kontinentalne alkalne magme imaju „obogaćen” izotopski sastav, zbog čega treba biti oprezan pri korišćenju visokih vrednosti odnosa sadržaja izo-

topa $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Mičel i Bergman (*Mitchell i Bergman, 1991*), na osnovu sadržaja i izotopa, predložili su sledeći model za stvaranje lamproita:

1. Osiromašeni harzburgit nastaje ekstrakcijom rastopa u rastućoj astenosferskoj plumi ili vremenski dugim iscrpljivanjem potkontinentalnog litosferskog omotača, koje je možda povezano i sa nastankom kore. Izotopi ukazuju na to da se taj događaj morao dogoditi pre najmanje 1 do 2 Ga.

2. Kasnije obogaćivanje inkompatibilnim elementima verovatno se dogodilo subdukcionim procesima kada su kristalisali minerali sa vodom (flogopit i, možda, K-rihterit) kao glavne metasomatske faze omotača. To je rezultiralo povećanim sadržajem velikog broja inkompatibilnih elemenata. Procesi obogaćivanja mogu se odvijati u nekoliko faza i mogu uticati samo na određene delove litosfere, što rezultira heterogenim subkontinentalnim omotačem sa varijabilnim proslojcima, džepovima.

3. Osiromašeni i obogaćeni heterogeni izvori se parcijalno stapaju kada se može stvoriti nova pluma koja „isporučuje” toplotnu energiju i fluide. Toplota za parcijalno stapanje može biti rezultat kolapsa orogeneze, dekompresije itd. Složena i spekulativna priroda ne omogućava precizno određivanje stepena parcijalnog stapanja na osnovu geohemije lamproita.



Slika 702. Sadržaj izotopa Nd, Sr i Pb u lamproitima i kimberlitima; u razmatranja su uključeni i MORB bazalti, sastav omotača i „cela Zemlja“ (*Mitchell i Bergman, 1991*)

V.19 MESTO STVARANJA I POJAVLJIVANJA ALKALNIH STENA

Alkalne stene nastaju u različitim tektonskim sredinama: kontinentalnim riftovima, unutar ploča, okeanskim i kontinentalnim subdukcionim zonama (posebno u basenima iza lukova) itd. Struktura i magmatski procesi većine riftova su složeni. Aktivni rifting uglavnom je preferirana hipoteza za većinu kontinentalnih riftova, ali nema razloga da bude jedina.

Koherentnost asocijacija je povezana s većinom matičnih magmi koje nisu zasićene SiO_2 i ukazuje na brojne „paralelne magmatske linije”. Neke od njih su dovoljno „primitivne” (uglavnom po hemijskom sastavu) da bi se smatrale primarnim rastopima. U nastavku teksta prikazaćemo magmatizam koji se uglavnom javlja u anorogenim kontinentalnim područjima.

V.19.1 KONTINENTALNI RIFTOVI

Riftne zone na kontinentima su važna mesta magmatske aktivnosti, sa raznolikim sastavom lave i intruziva, i često su „dominantna” mesta stvaranja kontinentalnih alkalnih i ultraalkalnih stena. Klasični lokaliteti su Istočnoafrički rift, rift Rio Grande (SAD), Bajkal (Rusija), graben Oslo (Norveška), riftna zona Narmada Son (Indija) i provincija Gardar (Grenland) itd.

Kretanje fluida kroz omotač omogućava stvaranje flogopita i hornblende, a mineralni sastav ksenolita u ovim stenama ukazuje na (potvrđuje?) metasomatozu, tj. da su alkalne stene različitog sastava stvorene parcijalnim stapanjem metasomatski promenjenog omotača (*Dawson i Smith, 1988; Meshesha i dr., 2011*).

Na_2O i K_2O su takođe obogaćeni i u kori iznad omotača, zbog čega je „razumno” pretpostaviti da i oni mogu „učestvovati” u stvaranju ovih stena.

Ako se u zoni subdukcije „uhvati” značajna količina sedimenata sa morskog dna, njihovom metamorfozom (i stapanjem) imamo izvor kalijuma za metasomatozu omotača. Izmenom bazalta na morskom dnu stvara se albit, koji takođe može učestvovati u pomenutim promenama. Proces metasomatoze se dogodio, smatra se, mnogo pre stvaranja alkalnih magmi.

Pomenimo da tektonska sredina obično „kontrolise” uslove stapanja, ali ne i sastav omotača koji se delimično stapa. Postoje značajne razlike u strukturi, hemiji, petrologiji i dinamici različitih provincija kontinentalnih riftova, ali se smatra da je Istočnoafrički rift reprezentativan primer opštih karakteristika takvog magmatizma.

U nastavku teksta prikazaćemo „najvažnija”, bolje reći najviše pominjana, mesta stvaranja alkalnih stena, uključujući Istočnoafrički rift, u kojem se javlja i bimodalni vulkanizam.

V.19.1.1 ISTOČNOAFRIČKI RIFT

Magmatizam, tj. vulkanizam Istočnoafričkog rifta počinje stvaranjem široke plitke depresije, a zatim sledi aktivni stadijum razdvajanja (riftovanja), koji je uzrokovan litosferskim istanjenjem preko plume ili dijapira. Gornja kora puca, dok se donja kora i litosferski omotač „uvijaju” (ubiraju). Primarna heterogenost kore kontroliše rasede koji se javljaju na „slabijim” područjima drevnih tektonskih struktura, posebno na kontaktu između kratonskih blokova. Usponom, kretanjem dijapira stvara se adijabatska dekompresija, koja uzrokuje parcijalno stapanje na različitim dubinama. Na osnovu petroloških termometara dobijeno je da je pluma bila znatno hladnija od havajskih i drugih pluma.

Istočnoafrički rift se zbog „klasičnog” lokaliteta za alkalne stene proteže oko 2000 km, gde se „susreću” tri riftna sistema. Severna dva kraka su se širila (razmicala) oko 2 cm/god kada se formirala okeanska kora između Afrike i Arapskog poluostrva i kada su nastali Crveno more i Adenski zaliv. Južni krak se širio sporije (oko 1–5 mm/god) i nema dokaza o okeanskoj kori, zbog čega nije „dostigao” okeanski status.

Pojedini istraživači smatraju da su rane faze razdvajanja kontinenata na ovom prostoru povezane sa nizom vrućih tačaka i da u ovom trenutku nije moguće predvideti budući razvoj Istočnoafričkog rifta. Većina smatra da će se u vremenu ispred nas (koje se meri desetinama miliona godina) istočna Afrika odvojiti od ostatka Afrike i postati samostalni kontinent.

Riftni sistem je, kako smo pomenuli, „proizveo” veliku raznolikost magme, od karbonatita do alkalnih fonolita, bazanita, nefelinita, ultrakalinskih kamafugita, alkalnih bazalta, trahita i riolita, koji su zasićeni silicijom (SiO_2). U „plitkim” područjima (do 50 km) stvoreni su (i stvaraju se) toleitski bazalti, na srednjim i većim dubinama nastaju „prelazni” bazalti, a alkalne magme su generisane (nastale) na najvećim dubinama.

Razdvajanjem u „rastegnutoj” kori (riftovanjem) stvara se i razvija graben, a iz dubokog izvora na površinu izlivaju se alkalne magme koje su promenljive u svim fazama, uključujući stepen parcijalnog stapanja, heterogeni omotač itd., uz dodavanje toplote u plićim delovima sistema. Asimilacija u Istočnoafričkom riftu je, smatra se, podređena (slaba), zbog čega su primitivne magme uobičajene.

U zapadnom delu, ogranku, lave su kalijumske, na istočnom natrijumske. Karbonatiti se javljaju u obe grane.

Od vulkana, poznatiji su Erta Ale (Etiopija), Kilimandžaro, Ol Doinjo Lengai (Tanzanija), Nijamuragira i Niragongo (Demokratska Republika Kongo). Po-

slednja dva su najaktivnija stratovulkana u Africi i nalaze se u zapadnom delu. Niragongo je veoma neobičan zbog ultraalkalnih lava koje su putovale (izlivane) veoma brzo. Ol Donio Lengai je jedini aktivni karbonatitski vulkan u istočnom ogranku. Izbija natrokarbonatitska lava. Erta Ale je bazaltni štitasti vulkan, koji je ujedno i najaktivniji vulkan u Etiopiji. Vulkanska aktivnost povezana s mlađim riftovima aktivna je skoro neprekidno poslednjih 10 miliona godina. Bazaltne lave su izlivenne duž raseda, pukotina i stratovulkana, kao i različiti tipovi alkalnih i karbonatitskih lava.

Vulkanske stene prevladavaju nad plutonskim stenama u Istočnoafričkom riftu. Starije provincije, poput proterozojskog područja na južnom Grenlandu i permskog grabena Oslo u Norveškoj, imaju znatno više plutonskih (dubinskih) stena, veće erozije, koja otkriva magmatske korene. Gravitacione anomalije ispod Afrike takođe ukazuju na prisustvo plutona. Nastaju široki i plitki bazalti ogromnih površina. Lave intermedijarnog sastava su upadljivo odsutne.

Magmatizam Istočnoafričkog rifta se, prema hemijskom sastavu, deli u četiri glavne serije (*Kampunzu i Mohr, 1991*):

1. alkalnu;
2. ultraalkalnu i karbonatitsku;
3. prelaznu i
4. toleitsku.

Alkalna serija obuhvata stene od bazanita i alkalnih bazalta (sa normativnim nefelinom) do tefrita, fonolita i trahita. U Etiopiji, srednjemiocenski štit alkalnog bazalta dominira u završnim fazama tercijarnih plato bazalta (slično toleitskim do alkalnim stenama Havaja). Lokalni (mali) tokovi i plutoni su „razasuti” po visoravnima i grabenima u južnom delu. Ultraalkalne, silicijumom nezasićene stene javljaju se u južnom delu Kenijskog raseda (rifta) i na zapadnom ogranku, gde su bogate kalijumom. Stene sadrže feldspatoide, nefelin i leucit, uz prisustvo (ne uvek) sodalita, kankrinita, melilita, granata, perovskita, kalsilita, monticelita itd. Pomenimo da karbonatiti prate neke od nefelinita, melilitita i fonolita u južnom i zapadnom delu.

Prelazni bazalti su, prema geohemijskim svojstvima, između alkalnog i toleitskog bazalta. Ove stene grade velike izlive u Afaru, Etiopiji i Keniji, koji su izbili neposredno pre (i tokom) „glavnih” tektonskih procesa, kada je stvoren graben i podignuti bokovi. Diferencijacijom prelaznih bazalta stvaraju se alkalne „varijacije” toleitskog trenda, koje uključuju fero-bazalte, mugearite, alkalne trahite i peralkalne riolite (*Barberi i dr., 1975*). Slični su bazaltima **MORB**, ali su obogaćeni **LREE** i inkompatibilnim mikroelementima.

Većina pojedinačnih (lokalnih) vulkanskih centara „proizvodi” lave ograničenog sastava unutar jedne magmatske serije, dok se „susedni” centri, po sastavu, mogu značajno razlikovati. Petrološka raznolikost u Istočnoafričkom riftu je bogata detaljima i decenijama intrigira geologe. Postoji mnogo analitičkih podataka, ali

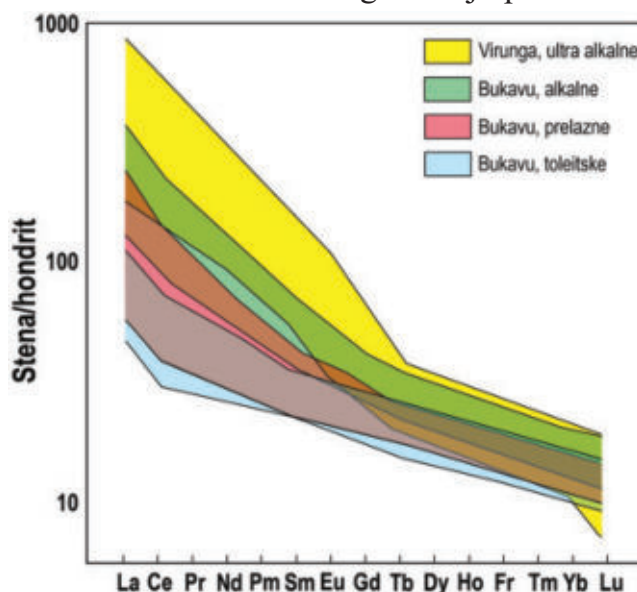
još uvek nisu dovoljni za izradu opšteprihvaćenih petrogenetskih modela.

Stene Istočnoafričkog rifta su, smatra se, reprezentativne za alkalne i peralkalne stene. Toleitske, prelazne i alkalne stene su slične okeanskim stenama, mada alkalnost (sadržaj alkalija) može biti veća i promenljiva, posebno u ultraalkalnoj seriji.

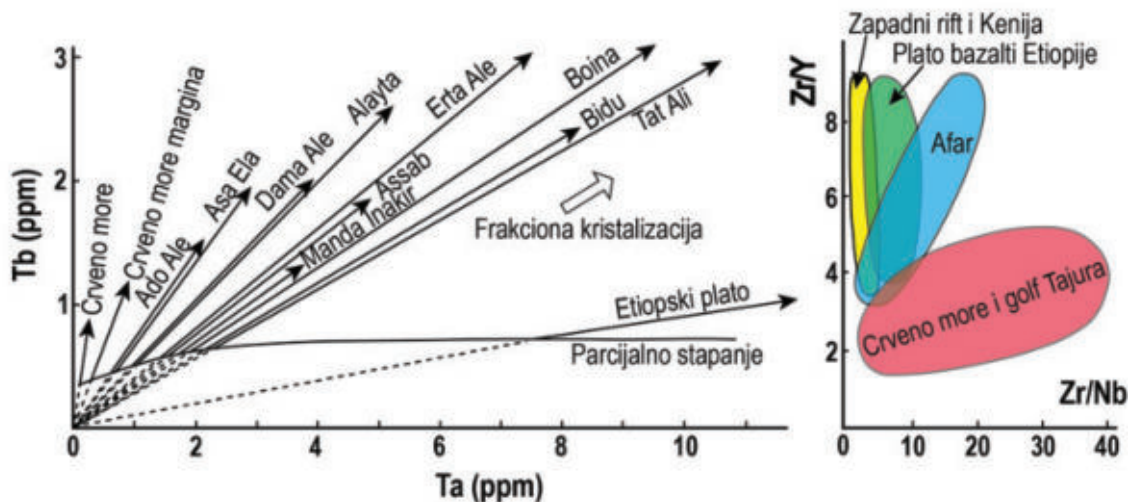
SADRŽAJI MIKROELEMENATA

Postoji opsežna literatura o geohemiji i izotopima lava iz Istočnoafričkog rifta. Sadržaji mikroelemenata ukazuju na frakcionisanje (izdvajanje) olivina, augita, plagioklasa i **Fe-Ti** oksida. Svi su obogaćeni **LREE**, bez obzira na to da li su alkalni ili toleitski. Ultraalkalne lave pokazuju maksimalno obogaćenje sa **LREE** (skoro 1000 puta više od hondrita) i siromašnije su u **HREE**. Uočava se i negativna anomalija **Eu**. Slika 703 prikazuje sadržaje **REE** normalizovane na hondrite. Imajmo na umu da je nagib strmiji zbog porasta alkalnosti, ali i zbog nižeg stepena parcijalnog stapanja više alkalnih magmi. Navedeni trendovi se odnose i na slične vrednosti **Mg#**. Varijacije u sadržaju inkompatibilnih mikroelemenata pripisuju se različitim sastavima izvora omotača. Nori i dr. (*Norry i dr., 1980*) objašnjavaju vezu između stepena nezasićenosti **SiO₂** i obilja inkompatibilnih mikroelemenata, uključujući obogaćivanje u **LREE**, koje su pripisali metasomatskom obogaćivanju prethodno osiromašenog potkontinentalnog litosfernog omotača uz pomoć fluida bogatih **CO₂**. Međutim, nedostatak korelacije između sadržaja mikroelemenata i izotopskih odnosa podrazumeva da je obogaćivanje došlo neposredno pre stvaranja magme, iako odnosi sadržaja pojedinih izrazito inkompatibilnih mikroelemenata imaju tendenciju da budu relativno konstantni na određenoj lokaciji i razvijaju se u skladu sa različitim trendovima (slika 704).

Stalni odnosi sadržaja pripisuju se procesima frakcione kristalizacije. Bejker (*Baker, 1987*) utvrdio je slične konstantne odnose **Zr/Nb** i **Hf/Ta**. Kontaminacija bi izmenila ove odnose, ali je njen uticaj verovatno mali. Varijacije odnosa sadržaja mikroelemenata na jednoj lokaciji u odnosu na drugu mogu biti rezultat brzine i načina riftovanja, što može odražavati evoluciju izvora omotača (gubitak inkompatibilnih mikroelemenata) kako riftovanje i izdvajanje rastopa napreduju. Tu su i faktori kao što su dubina na kojoj se proces odvija, vreme trajanja itd.



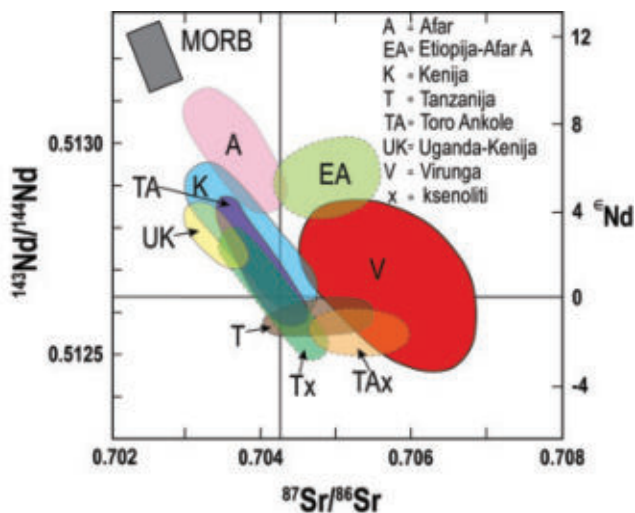
Slika 703. Sadržaji **REE** magmatskih serija Istočnoafričkog rifta normalizovani na omotač (*Kampunzu i Mohr, 1991*)



Slika 704. Odnos sadržaja **Ta** i **Tb** stena Crvenog mora, Afara i platoa Etiopije (levo) pokazuju konstantan međusobni odnos sa frakcionom kristalizacijom, zavisno od parcijalnog stapanja; odnosi sadržaja **Zr/Y** i **Zr/Nb** lava Istočnoafričkog rifta imaju konstantan odnos (**Kampunzu i Mohr, 1991**)

SADRŽAJI IZOTOPA

Na slici 705 prikazani su odnosi sadržaja izotopa **Sr** i **Nd** za neke istočnoafričke bazaltne lave i ksenolite kako bi se minimizirali efekti kontaminacije korom i omogućilo što bolje određivanje svojstava izvora. Prelazni, plato i alkalni bazalti od Afara do Kenije bogatiji su pomenutim izotopima od **MORB**-a i imaju karakteristike slične bazaltima **OIB**. Odnosi sadržaja **Sr** u ultraalkalnoj seriji su uglavnom u opsegu od 0,703 do 0,707, što sugerise na izvor u omotaču, ali mogu biti i do 0,711. Izotopski podaci za više diferencirane stene imaju svojstva slična „običnim” bazaltima, što ukazuje na to da se većina magmi razvila magmatskom diferencijacijom uz malu kontaminaciju i asimilaciju sa kontinentalnom korom. Ovaj zaključak iznenađuje neke istraživače, ako se ima u vidu debljina drevne kontinentalne kore u kojoj su magmatske komore morale boraviti. Sadržaji većine mikroelemenata su veći, što rezultira visokim odnosima sadržaja izotopa **Rb/Sr** i **Nd/Sm**, što će tokom vremena



Slika 705. Odnosi sadržaja izotopa **Sr** i **Nd** za lave i ksenolite Istočnoafričkog rifta; pune linije označavaju sastav cele Zemlje (**Kampunzu i Mohr, 1991**)

dati povišene odnose izotopa $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ i $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. Međutim, oni su niski, što ukazuje i na niske odnose Rb/Sr i Nd/Sm u drevnom izvoru. Na osnovu navedenog, može se zaključiti da se obogaćivanje izvora omotača sa pojedinim mikroelementima moralo desiti nakon ranijeg osiromašenja, što ostavlja dovoljno vremena za obogaćivanje elemenata da stvori razliku i u sadržaju izotopa. Oni se dobro korelišu sa pripadajućim lavama, što ukazuje na to da „održavaju” vezu sa omotačem, a ne magmatske procese. Odnosi sadržaja izotopa **Nd-Sr** su slični klasičnim plato bazaltima. Podaci ukazuju na to da ove stene nastaju iz metasomatski promenjenog omotača.

ZAKLJUČIMO! Pojava primitivnih ultraalkalnih (i alkalnih) stena u Istočnoafričkom riftu, zajedno sa povećanim sadržajima inkompatibilnih mikroelemenata i izotopa, ukazuje na obogaćeni omotač ispod Afrike.

Eksperimentalne studije parcijalnog stapanja ukazuju na to da je teško, ali nije nemoguće dobiti nezasićene rastope (magne) bogate **K** iz normalnog omotača. Smatra se da ti rastopi nisu bili u ravnoteži sa „normalnim” lerzolitom.

Mineralogija i hemizam pojedinih ksenolita su u korelaciji sa lavama domaćina, što ukazuje na to da su oni izvedeni iz izvora lave omotača. To potvrđuju i eksperimenti na nekim ksenolitima – da bi se sa 20–30% njihovog parcijalnog stapanja stvorila lava alkalnog sastava. Velika geohemijska varijacija magmatskih stena, različiti sastav ksenolita, ukazuju na to da je omotač ispod Afrike u horizontalnom i vertikalnom smislu različitog sastava. Smatra se da postoje najmanje tri glavna rezervoara omotača iz kojih su nastale stene Istočnoafričkog rifta:

1. malo osiromašen izvor **MORB**-a sličan **DM**-u (osiromašenom omotaču);
2. izvor sličan **HIMU**, sa visokim sadržajima izotopa ^{207}Pb i ^{208}Pb ; i
3. izvor **EM** sličan je **DUPAL**-u (visok odnos sadržaja $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{207}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$) južno od ekvatora.

Rezervoari 2 i 3 ukazuju na to da omotač ispod Afrike sadrži i recikliranu okeansku litosferu. Poslednja subdukcija u Africi dogodila se pre oko 600 Ma, što je omogućilo dovoljno vremena za izotopski razvoj, kad je došlo do iscrpljivanja (osiromašenja) i stvaranja izotopskog rezervoara tipa **DM**. Tokom kenozoika, omotač ispod Afrike različito je obogaćen, kada su mnoge magmatske stene i ksenoliti dodali nova svojstva. Još uvek su otvorena pitanja o prirodi litosferskih i astenosferskih komponenti. Da li je astenosfera ispod Afrike heterogena? Jesu li plitki i dublji nivoi omotača? Ako su odgovori pozitivni, litosferska komponenta nije potrebna. Evo nekih razmišljanja:

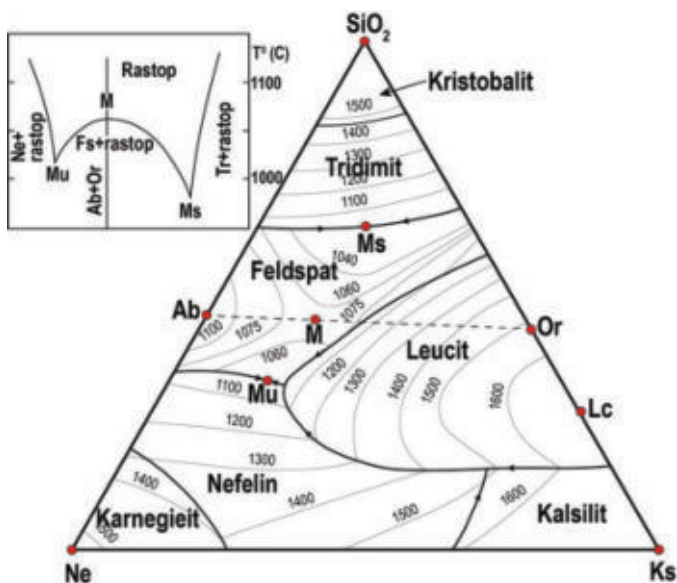
- Makdonald i dr. (*Macdonald i dr., 1994*) uočili su da se većina bazalta Afričkog rifta poslednji put uravnotežila sa omotačem na dubinama manjim od 15 km (unutar litosfere), tako da ne možemo sa sigurnošću razlikovati litosferske i astenosferske izvore, ali se može reći nešto o omotaču.

- Bejker (*Baker, 1987*) primetio je niz ranog prerift vulkanizma sa dominan-

tnim visoko alkalnim nefelinsko-karbonatitskim sastavom, zatim fazu sa alkalnim bazaltima i prelazima ka fonolitima, i na kraju toleitskim magmama. Pomenuta razlika se pripisuje progresivnom smanjenju pritiska parcijalnog stapanja izvorišta omotača. Sličan proces je u kontinentalnom okruženju, gde se rani alkalni magmatizam postepeno zamenjuje **MORB**-toleitima, tj. dobija okeanski karakter.

- Kampunzu i Mor (*Kampunzu i Mohr, 1991*) smatraju da strukturno okruženje (tektonika rifta) igra važnu ulogu, kontrolu u geohemijskom sastavu magmi. Porast alkalnosti pripisuju udaljenosti od ose rifta, gde je manji uticaj astenosfere, a samim tim i niži stepen parcijalnog stapanja.

Pomenuto ukazuje na to da je većina magmi (lava) u Istočnoafričkom riftu rezultat frakcione kristalizacije iz parcijalnih rastopa iz omotača bez značajnijeg zagađenja starom kontinentalnom korom. Različiti evolucijski putevi u alkalnim serijama prikazani su na sistemu **Ne-Ks-SiO₂-H₂O** (slika 706), gde postoje dva toplotna minimuma na likvidusu, odvojena barijerom koja se proteže od albita do ortoklasa-leucita. Ona razdvaja rastope (magne) koje evoluiraju prema fonolitima, sa jedne strane, i prema riolitima, sa druge strane. Magme unutar potpolja **Ab-Or-Ks-Ne** su silicijumom nezasićene, što daje alkalno-feldspatsko-nefelinsko-leucitni fonolit. Rastopi (magne) unutar potpolja **Ab-SiO₂-Or** su silicijom prezasićene i postaju alkalno-feldspatski kvarcni rioliti. Magme, rastopi trahitskog sastava se razvijaju duž različitih linija, stvarajući različite sastave, u kojima frakcionizacija feldspata kontroliše evoluciju i diferencijaciju. Silicijske lave i piroklastiti čine značajan deo ukupne zapremine Istočnoafričkih vulkanita. U Etiopiji to čini jednu šestinu, u Keniji polovinu itd. Smatra se da su rioliti nastali frakcionom kristalizacijom odgovarajućih bazaltnih magmi sa „ograničenom” kontaminacijom kore, što je uticalo i na sadržaje izotopa **Sr**, ali nije promenilo **Nd**.



Slika 706. Trokomponentni sistem
kvarc–nefelinkalsilit–H₂O na pritisku od 1 atmosfere
(Bowen i Schairer, 1935)

Šta je sa magmama (lavama) srednjeg sastava kojih nema na ovom prostoru? Proces frakcione kristalizacije nije toliko savršen da bi rezultirao samo početnom bazaltnom magmom i završnim rezidualnim kiselim magmama. Pozivanje na deblju koru koja deluje kao filter da bi razdvojila bazalte i riolite nije prihvatljivo, jer su bazalti gušći. Zapravo, „srednje” (andezitske) magme bi imale manju gustinu

i viskoznost, verovatno zbog većeg sadržaja fluida (vode). Alternativni modeli se pozivaju i na parcijalno stapanje bazaltne „donje ploče”, kada se preostali (rezidualni) kiseli rastop uzdiže kroz koru. Takođe je moguće i stapanje okolne kore i stvaranje riolitских magmi. U tom slučaju ne dolazi do stvaranja međuprodukata parcijalnog stapanja.

Bimodalnost je „problem” za predloženi model frakcione kristalizacije, jer bi količina evoluiranih lava trebalo da postepeno opada zbog frakcione kristalizacije, koja uklanja deo minerala iz magmatskih sistema. Ovo se posebno odnosi na ogromne mase fonolita u Keniji.

V.19.2 ALKALNE STENE U OKEANSKIM OSTRVIMA

Alkalne stene javljaju se i na okeanskim ostrvima koja su udaljena od aktivnih tektonskih područja (srednjeokeanskih riftova, subdukcionih zona). Asocirane su sa bazaltima koji su nastali iz kapljica („pluma”) magmi koje potiču iz neosiromašenog dela gornjeg omotača. Zato imaju povećan sadržaj inkompatibilnih elemenata i specifičan sastav izotopa u odnosu na bazalte srednjeokeanskih riftova.

Kada se pluma podigne u plitke dubine usled dekompresije, dolazi do intenzivnijeg parcijalnog stapanja i stvaranja velike količine subkalijskih magmi.

Najveći deo ostrva Havaji izgrađen je od olivinsko-troktolitских bazalta koji su brzo izliveni i stvorili impresivne vulkanske štitove. Ova subkalijska faza obuhvata više od 95% zapremine svakog izliva, ali se u početku izlivanja stvara mala količina alkalnih stena. Najvećim delom je izgrađena od olivin-augit-alkalnog bazalta i bazanita. „Razumno” je pretpostaviti da će se ove lave brzo prekriti kasnijim izlivima „normalnih” bazalta. Lave „postkaldera” su „kape” alkalnih bazalta, havajita, mugearita i manjih količina ankaramita, trahita i fonolita.

Posteroziona faza, koja traje 1–2 miliona godina, otkrila je alkalne stene koje izgledaju „nepovezano” sa glavnom vulkanskom strukturom ostrva. Ksenoliti spinel-lherzolita, dunita i, u nekim područjima, granatskog lherzolita, zajedničke su karakteristike ovih lava. Slična istorija stvaranja primenjuje se na okeanska ostrva širom sveta.

Pomenimo i vulkanizam Islanda, gde je većina lava subalkalnog sastava, mada na dva područja preovlađuju alkalni bazalti poput havajita, mugearita i trahita.

V.19.3 ALKALNE STENE U SUBDUKCIJONIM ZONAMA

Tompson i Fauler (*Thompson i Fowler, 1986*) smatraju da ultrakalijske stene retko nastaju u subdukcionim zonama, gde su „blisko” asocirane sa kalcijum-alkalnim stenama. To uključuje šošonite u kojima je sadržaj $\text{Na}_2\text{O}=\text{K}_2\text{O}$ (*Morrison 1980*). Primeri su Sunda luk Indonezije, Fidži, Nova Gvineja itd.

Veza sa subdukcijom je „jasna” zbog negativne anomalije **Nb**, koju ima većina šošonita, a često je praćena i sličnom anomalijom i za **Ti**. Ove stene pokazuju znatno veće obogaćenje sa **LIL** mikroelementima (100–1000 puta) od „pridruženih” kalcijum-alkalnih stena (sa kojima su asocirani).

Šošoniti iz kontinentalnih magmatskih lukova imaju „strmije” vrednosti sadržaja **REE** od intraoceanskih, kao što su Marijanski luk, što ukazuje na prisustvo rezidualnog granata u izvoru omotača.

Pomenimo da postoji značajna „raznolikost” mišljenja o poreklu i tektonskom značaju kalijumskih stena u ostrvskim lukovima i aktivnim kontinentalnim marginama zbog složenog tektonskog sklopa ovih područja i uticaja okeanske i kontinentalne litosfere i astenosfere na njihov sastav (*Cundari, 1980, Edgar, 1980*). Osnovni problem je da li je nastanak magme bogate kalijumom (K_2O) direktno povezan sa subdukcijom okeanske litosfere ili kasnijim uzdizanjem stvorene magme i mešanjem sa stenama kontinentalne kore.

V.19.4 ALKALNE STENE U KOLIZIONIM ZONAMA

Kalijske i ultrakalijske stene se javljaju i u kolizionim zonama (postorogene faze), nakon zatvaranja okeana. Veći deo neogensko-kvartarnog kalijskog vulkanizma Mediterana, uključujući i rimsku provinciju u Italiji, pripada ovom tektonskom okruženju (*Keller, 1983*).

Italijanski vulkani (Etna, Stromboli) „rezultat” su kolizije afričke i evroazijske tektonske ploče. Složena priroda sudara je „maskirana” „jednostavnim” položajem vulkana koji se protežu duž fronta sa različitim sastavom lava izlivenih u različito vreme sa raznovrsnim sastavom magme za tako „malu” geografsku oblast. Širok spektar magmi bogatih kalijumom probijao se kroz okolne sedimente (krečnjake, laporce i gline), zbog čega je kontaminacija ovim stenama veoma izražena, naročito u severnom delu provincije. Neki od njih, Etna i vulkani na ostrvu Pantelerija (Pantelleria), imaju „srodan” alkalni afinitet. Etna „trenutno” izbacuje uglavnom havajite, dok Pantelerija ima peraluminijске alkalne stene, kao i ignimbrite.

Pojave kalijskih lava stvorenih u ovim tektonskim sredinama se sreću, osim u pomenutoj Italiji, i u Anatoliji, Turskoj, Iranu itd. i genetski su vezane za sudar

afričke i evroazijske ploče. Stvarane su od neogena do kvartara. Na kraju prikaza alkalnih stena opisaćemo i karbonatite koji nastaju u različitim tektonskim sredinama, uglavnom u kontinentalnim područjima.

KARBONATITI

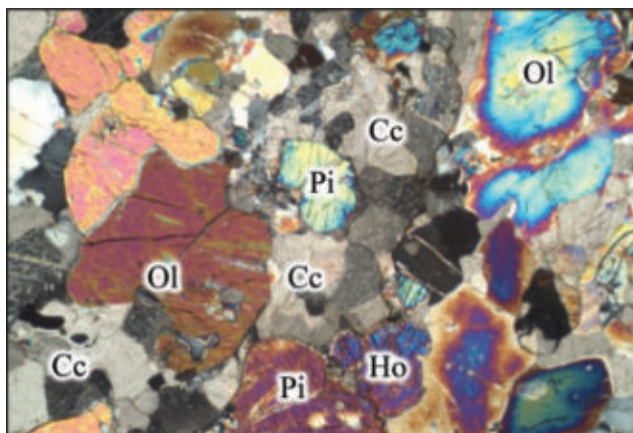
Karbonatiti su intruzivne (plutonske) ili ekstruzivne (vulkanske) stene, koje prema klasifikaciji **IUGS**-a imaju više od 50% modalnog primarnog, magmatskog karbonata (obično kalcita, dolomita, ankerita ili „jedinstvenog” natrijum-karbonata, njerereita $(\text{NaK})\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$, kao i veliki broj silikatnih feromagnezijskih minerala: olivina, monticelita, klinopiroksena, amfibola ili biotita itd. (slike 707 i 708). Odnosi sadržaja pomenutih minerala, posebno u plutonskim (dubinskim) stenama, značajno variraju, zbog čega je i otežana definicija ovih stena. Pomenimo da je početkom 20. veka magmatsko poreklo karbonatita osporavano, i smatralo se da su oni „remobilisani” krečnjaci ili ogromni karbonatni ksenoliti (tela), ali je danas to sasvim jasno. Mičel (*Mitchell, 2005*) predlaže da se karbonatiti definišu kao stene sa više od 30% karbonatnih minerala, uz dodatak (prefiks) imenu stene prema sadržaju karakterističnog minerala: flogopit-karbonatit, monticelit-karbonatit itd. Ovaj autor deli karbonatite na:

1. primarne magmatske karbonatite (sensu stricto), koji su uglavnom povezani sa alkalnim vulkanitima ili njihovim plutonskim ekvivalentima (bez feldspata); primeri su Tororo i Napak u Ugandi, Šombole (Shombole) i Kizingiri u Keniji i analogni plutonski kompleksi na Fenu u Norveškoj i Oka u Kvebeku.

2. asocijacije magmatskih stena bogatih karbonatima i mineralima sa povećanim sadržajem **Ba**, **Sr** i **RRE**, koje su povezane sa drugim plutonskim stenama kao što su sijeniti, što navodi na zaključak da su karbonatiti rezidualni rastopi „napredne” frakcije kristalizacije.



Slika 707. Karbonatit, Brazil;
veličina uzorka 15 cm



Slika 708. Mikrosnimak karbonatita iz Mozambika;
Ol = olivin, Pi = piroksen, Cc = kalcit,
Ho = hornblenda; N+, 60x

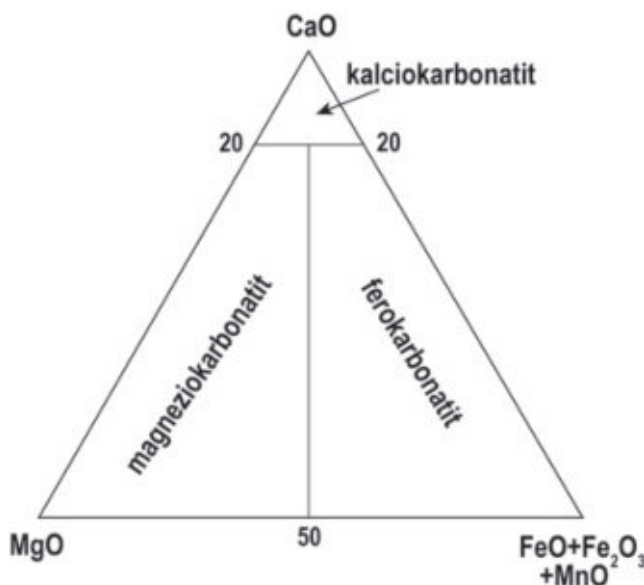
Karbonatiti mogu da sadrže veliki broj silikatnih minerala: monticelit, melilit, apatit (akumulira **REE**), pirohlor, magnetit, fluorit, alkalne amfibole, liskune, magnetit, olivine, piroksene, minerale niobijuma i tantala itd. U ovim stenama je poznato preko 280 minerala, što je odraz „egzotične” raznolikosti ovih stena.

Jedna od hemijskih klasifikacija karbonatita je prema sadržaju **CaO**, **MgO** i **FeO+Fe₂O₃+MnO** (slika 709). U praksi, međutim, najčešća podela je prema sadržaju karbonata, gde se ove stene dele na:

1. **kalcitske karbonatite**, gde je glavni karbonat kalcit; ako je stena grubozrna (pripada intruzivima), naziva se sovit, ako je srednjozrnasta do fino-zrnasta, naziva se **alvikit**; oba pomenuta naziva su „preneta” iz ranih dana istraživanja karbonatita;
2. **dolomitske karbonatite**, gde je glavni karbonat dolomit; takođe se može nazvati i beforsit;
3. **ferokarbonatite**, gde je glavni karbonat bogat gvožđem; to su ankerit i/ili siderit i obično su sitno zrnasti, i
4. **Natrokarbonatite**, koji su izgrađeni od natrijum, kalijum i kalcijum-karbonata.

Ovaj „neobičan” mineral (natrokarbonatit) nalazi se samo u karbonatitskim lavama vulkana Ol Doinjo Lengai u Tanzaniji. Zbog navedenog minerala i recentnih izliva, pojedini autori smatraju da su stariji karbonatiti izvorno bili natrijski, ali su kasnije „isprani” atmosferilijama. Eksperimentalno nije bilo moguće napraviti natrokarbonatni rastop. Magmatske stene koje sadrže manje od 10% karbonata mogu se nazvati **iolitom**, dok se stene koje sadrže između 10% i 50% karbonatnih minerala mogu nazvati **kalcitskim iolitom** (ili karbonatnim iolitom) itd. Ako stena sadrži

SiO₂ > 20%, stena je **siliko-karbonatit** (silicijumski karbonatit). Karbonatiti se javljaju na svim kontinentima, uključujući i Antarktiku, jer se smatra da kontinentalna kora igra važnu ulogu u stvaranju rastopa bogatih **CO₂**, koji su „neophodni” za stvaranje karbonatita. Gotovo polovina njih je u Africi, tesno povezana sa Istočnoafričkim riftom, gde se pojavljuju pojedinačno u prečniku od nekoliko kilometara ili



Slika 709. Hemijska podela karbonatita koji sadrže manje od 20% **SiO₂** (Woolley i Kempe, 1989)

u zonama, rasedima dužine nekoliko stotina kilometara, kao linearni trend (pravac tektonske strukture) koji se naziva „istočnoafrička karbonatitska linija”.

Karbonatiti se javljaju kao plutoni, dajkovi, silovi ili izlivi, uključujući i piroklastične tokove. Većina izliva karbonatita je mala, površine nekoliko kvadratnih kilometara, a najveći poznati izliv je površine oko 20 km². Često se javljaju prstenasta ili cilindrična tela manja od 5 km, obično asocirana (praćena) nefelinitima, fonolitima itd. Napomenimo da je u svetu poznato više od 50 primera vulkanskih karbonatita, u obliku prstenastih tufnih, lava, piroklastita (npr. Polino u Italiji). Neke karbonatske dijatreme i piroklastiti sadrže ksenolite iz omotača, što ukazuje na brz uspon iz dubine. U njima se takođe uočava povećan sadržaj **SrO**, **BaO**, **SO₃**, **Cl**, **F** i, naravno, **CO₂**. U nekim slučajevima, magnetit i apatit mogu biti prisutni u dovoljnim količinama da budu ruda.

Jedini aktivni vulkan karbonatita na našoj planeti je Ol Doinjo Lengai u Tanzaniji, koji pripada Istočnoafričkom riftu. Po sastavu je natrokarbonatit, gde su glavni primarni karbonatni minerali njerereit (idealna formula **Na₂Ca(CO₃)₂**) i gregorijat (idealna formula **Na₂CO₃**).

Izlivi lave stvaraju kratkotrajne bizarne, vrlo pokretljive, tokove slične maslinovom ulju, jer imaju **najmanji viskozitet** među poznatim lavama (slika 710).



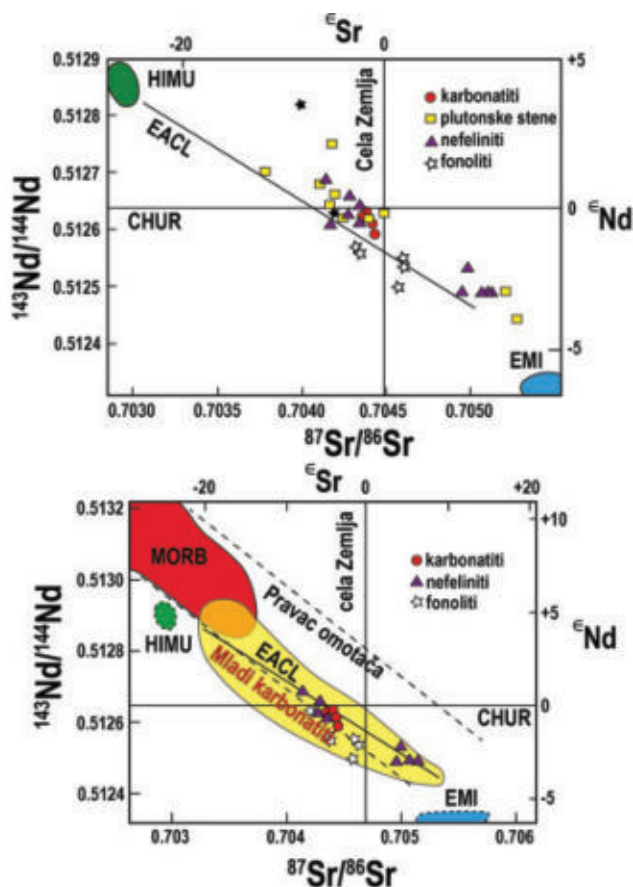
Slika 710. Karbonatitska lava, vulkan Ol Doinjo Lengai u Tanzaniji

HEMIJSKI SASTAV

Karbonatiti imaju veoma nizak sadržaj SiO_2 i lako se prepoznaju po visokom sadržaju **REE** (> 500 ppm), **Sr** (> 700 ppm), **Ba** (> 250 ppm), **V** (> 20 ppm), **P**, **Nb** itd., visokim sadržajima gasova: CO_2 , **F**, **Cl**, **S** itd. Pomenimo da su karbonatiti glavni ekonomski izvori **Nb** i **REE**, kao i fosfata. Neki od njih nose i **Ba**, fluorit, **Sr**, **V**, **Th**, **U**, **Zr** i **Cu** itd.

Sadržaji izotopa **Nd** i **Sr** (slika 711) iz mladih karbonatita starosti ispod 20 Ma (uključujući i stene Istočnoafričkog rifta) slični su sa bazaltima okeanskih ostrva, uprkos činjenici da se ove stene javljaju na kontinentima. U početku se smatralo da su to gazirani rastopi nastali metasomatozom litosfere, ali to nije podržano zbog radioaktivnih izotopskih podataka, koji ukazuju na uključivanje više od jednog izvora sličnog onima koji se javljaju u okeanskim bazaltima. Proučavanja pojedinih izotopa, na primer $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, ukazuju na materijal iz omotača i daleko su niže vrednosti sadržaja od sedimentnih karbonatnih stena u kori. Visoki sadržaj **Sr** i **Nd** u karbonatitima (kao i nekih alkalnih stena) potvrđuju poreklo iz omotača.

Bel i Blenkinsop (*Bell i Blenkinsop, 1989*) objašnjavaju da su ove magme izvedene iz osiromašenog omotača (**DM**) koji je star najmanje 3 Ga. Bel i Tilton (*Bell i Tilton, 2001*), na osnovu odnosa sadržaja pojedinih izotopa, zaključili su da karbonatiti odražavaju krajnje članove omotača (uglavnom **HIMU** i **EMI**), za koje su pretpostavili da su se mešali verovatno unutar plume, dok su varijacije u alkalnim stenama usled kontaminacije iz drugih izvora. Odnosi sadržaja izotopa **Nd** i **Sr** (*Bell, 1989*) nedvosmisleno pokazuju da je izvor karbonatitskih magmi donji deo gornjeg omotača, koji sadrži karbonate (CO_2). Harmer i Gittins (*Harmer i Gittins, 1998*) utvrdili su da su karbonatiti u nekim kratonskim oblastima na Zemlji obogaćeni izotopima i vodom koji vode poreklo iz drugih izvora. Alkalne stene su promerljivije i bogatije pojedinim mi-



Slika 711. Odnosi sadržaja izotopa **Sr** i **Nd** za mlade karbonatite (označeni žuto) i kriva **EACL** (lave Istočnoafričkog rifta) + **HIMU** i **EMI** rezervoari (*Bell i Blenkinsop, 1989*); na donjem dijagramu su prikazani i natrokarbonatiti i alkalne stene područja Ol Doinjo Lengai (*Bell i Dawson, 1995*)

kroelementima i izotopima od karbonatita zbog reakcije sa korom ili omotačem. Pomenimo da je raspon sadržaja izotopa u karbonatitima mnogo manji nego kod okeanskih bazalta, uprkos većoj debljini i promenljivoj prirodi kontinentalne kore kroz koju moraju da prođu.

Izotopski podaci plemenitih gasova daju indikacije o relativnim dubinama izvornog materijala. **Ar**, **Ne**, **Kr**, **Xe** itd., koji su zarobljeni u mineralima kao što su apatit i magnetit, ukazuju na relativno primitivan omotač koji je manje degaziran od izvora koji stvara bazalte srednjeokeanskih grebena.

Od posebnog interesa su anomalije ^{129}Xe , niski sadržaji $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ i $^4\text{He}/^3\text{He}$, i odnosi $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ sa $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$, koji ukazuju na prisustvo i poreklo iz plume.

Međutim, karbonatiti su naročito sklони procesima izotopske razmene, koji uključuju vremenske uslove, alteraciju u atmosferskim uslovima i hidrataciju, pa se mora voditi računa da se analiziraju samo sveži uzorci. Izotopski podaci **C** i **O** iz sveže uzetih uzoraka natronkarbonatita iz Ol Doinjo Lengai ukazuju na to da ove stene vode poreklo iz donjeg dela gornjeg omotača.

Stene oko većine karbonatita i nekih alkalnih ultrabazičnih intruziva su metasomatski promenjene. Taj, u suštini alkalni, metasomatizam naziva se **fenitizacija**, koja podrazumeva zamenu kvarca alkalnim feldspatom, feldspata nefelinom i stvaranje alkalnih mafičnih minerala kao što su egirin i arfvedsonit.

Fenitizacija se javlja i oko ijolitskih intruzija koje su ponekad praćene karbonatitima. Dobila je ime po lokalitetu Fen u Norveškoj, gde je prvi put opisana.

Smatra se da je kalijski metasomatizam karakterističan za niže temperature, dok je natrijski karakterističan za dublje nivoe i više temperature. Pojedini autori smatraju da sijeniti predstavljaju krajnje procese fenitizacije. Nizak viskozitet karbonatitskih magmi čini ih idealnim agensima za metasomatizam unutar omotača, menjajući njegov mineralni i hemijski sastav.

NASTANAK KARBONATITA

Većina karbonatita se javlja u kontinentalnim ekstenzivnim okruženjima, grebenima, riftovima i veoma su retko vezani za subdukciju ili orogene zone, kao što je slučaj u Pakistanu duž Himalajskih „potisnih” pojaseva (*Gitting, 1989, Tilton i dr., 1998*). Do sada su otkrivene samo dve okeanske pojave: Zelenortska Ostrva i Kanarska ostrva. Blizina ovih ostrva afričkom kontinentu, koji je „bogat” karbonatitima, ukazuje na njihovu međusobnu povezanost. Smatra se da se ispod kore Kanarskih ostrva nalazi hercinska podina (stare stene nastale i vezane za hercinsku orogenezu, koja se dogodila u karbonu).

Karbonatiti su formirani od proterozoika (starije od 2 milijarde godina) do danas, a većina njih je mlađa od 150 miliona godina. Arhejskih karbonatita ima veoma malo. Najstariji poznati karbonati nalaze se na Grenlandu, u Finskoj i Kanadi.

Karbonatiti se retko pojavljuju sami i uglavnom su prostorno vezani za magmatske stene slične starosti. Od klasičnih karbonatitskih kompleksa „raspršenih” širom Istočne Afrike, većina je asocirana sa nefelinitima i fonolitima, alkalnim ba-

zaltima, kimberlitima i drugim alkalnim stenama ili sa njihovim plutonskim ekvivalentima koji se javljaju u kontinentalnim područjima.

Velika je rasprava o poreklu i nastanku karbonatita. Postoji više aktuelnih hipoteza o nastanku ovih stena. Jedna od njih je da ove stene nastaju direktnim parcijalnim stapanjem iz omotača koji sadrži karbonatne faze (CO_2). Polja stabilnosti bogatog magnezijum-kalcita, dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ i magnezita MgCO_3 čine ove minerale „idealnim kandidatima” za zadržavanje CO_2 u omotaču. Postavlja se interesantno pitanje da li je karbonat primaran, tj. da li je prisutan u omotaču od formiranja Zemlje ili je recikliran tokom subdukcije u obliku krečnjaka ili gaziranog materijala od karbonata koji se nalaze na dnu okeana.

Gasovite komponente **C-O-H**, na koje se toliko istraživača oslanjalo da pomognu u stvaranju alkalnih i karbonatitnih rastopa, mogu se pojaviti na dva načina: izvedene iz dubljih primordijalnih stena omotača (kao hidratizane karbonatne faze) ili kao deo fluida (uglavnom H_2O i CO_2) koji se „vraća” u omotač iz subdukovane ploče, pretvarajući olivin i klinopiroksen u flogopit i **K**-rihterit itd.

Na osnovu nedavnih eksperimenata na karbonatima iz eklogita (metamorfisani ekvivalent bazalta, plus kalcit), verovatno će se „ukloniti” iz subdukovane ploče pre nego što se dostigne dubina od 300 km. Stoga je malo verovatno da se karbonati recikliraju u zoni subdukcije i odlaze u velike dubine.

Visoka temperatura stapanja kalcita ($> 1340^\circ\text{C}$ pri 0,1 GPa) i visok P_{CO_2} potreban za sprečavanje disocijacije pri tom pritisku, zajedno sa odsustvom visokotemperaturnih metamorfnih aureola oko karbonatita, naveli su ranije istraživače da sumnjaju da su oni magmatske stene. Dugo se smatralo da karbonatiti vode poreklo iz krečnjaka, mermernih ksenolita ili da su hidrotermalnog porekla. Vili i dr. (*Wyllie i dr., 1975 i 1998*) pokazali su da se kalcit stapa na znatno nižim temperaturama ($600\text{--}700^\circ\text{C}$) pri $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1$ GPa u prisustvu guste pare sa $\text{H}_2\text{O-CO}_2$. Kraft i Keler (*Krafft i Keller, 1989*) izmerili su temperature u izlivima natrijskih karbonatita i jezeru lave, koje su se kretale u opsegu od 491°C do 544°C , dok su Pinkerton (*Pinkerton i dr., 1995*) dobili nešto više temperature. Smatra se da rastopi bogati karbonatima nisu polimerizovane jonske tečnosti i da imaju vrlo nisku viskoznost i gustinu.

Druga hipoteza je da karbonatiti nastaju mešanjem karbonatnog (kalcitskog) rastopa i rastopa bogatog alkalijama. Treća mogućnost je da ove stene (karbonatiti) mogu nastati ekstremnom kristalnom frakcionizacijom silikatne magme.

Karbonatiti sensu stricto, kao i prateći nefeliniti i meliliti, nesumnjivo su formirani iz magmi u omotaču. Na to ukazuje i prisustvo ksenolita u više karbonatnih lava.

Pomenimo još neke hipoteze koje smatraju da karbonatiti „dolaze” iz omotača. Jedna od njih je da se koegzistentne karbonatne ili silikatne magme odvajaju od roditeljske karbonatno-silikatne magme. Drugi autori smatraju da karbonatiti mogu nastati direktnim parcijalnim stapanjem „gaziranog” (bogatog fluidima) peridotitskog omotača. U Istočnoafričkom riftu postoji jasna uzročna povezanost između podizanja, riftinga, vulkanizma i pluma.

HIMU-EMI izotopski karakter karbonatita ukazuje na to da su plume omotača uključene u njihovo poreklo (nastanak), ako ima „dovoljno” CO_2 i H_2O . Dokazi o vezi karbonatita i pluma su: (i) sličnost izotopskih zapisa između okeanskih ostrvskih bazalta i karbonatita; (ii) asocijacija karbonita sa dva poznata okeana, Kanarska i Zelenortska ostrva; (iii) vremenski i prostorni odnosi nekih karbonatita u izlivima bazaltnih provincija (na primer Dekan, Siberijska itd.) i sadržaj plemenitih gasova.

Magmatizam povezan sa plumama takođe je predložen za mlade karbonatite u istočnoj Africi, uključujući Ol Doinjo Lengai. Otvoreno je pitanje o razumevanju uloge kontinentalne litosfere u magmatizmu karbonatita. Neki modeli pluma uključuju mešanje između materijala iz pluma i litosfere, dok drugi smatraju da litosfera ima ulogu samo u mehaničkom ograničavanju hlađenja plume, kada mogu nastati karbonatiti iz hladnih, „isparljivih” delova plume.

Sa „razumnim” količinama CO_2 i H_2O u omotaču, mogu se stvoriti samo male količine primarnog karbonatnog (i kimberlitskog) rastopa. U slučaju „viška” pomenutih sastojaka (što je malo verovatno), karbonatiti se mogu stvarati na znatno nižim temperaturama.

Primarni rastopi karbonatita mogu se akumulirati na granici litosfere i astenosfere, gde se „susreću” sa mehaničkim otporima zbog rigidnije prirode litosfere. Deo može dospeti u litosferni omotač, prateći geotermalni gradijent, sve dok ponovo ne dostigne solidus i ne počne da kristališe. Tada se oslobađaju gasovi koji uzrokuju metasomatizam stena omotača. Oni omogućavaju rastopu da se uzdigne pre nego što potpuno iskristališe. Ako je kretanje nagore adijabatsko (usled pada pritiska), gasovi se oslobađaju i metasomatiziraju okolne stene, a magma se spušta na niže, pliće nivoe. Ako se formira dovoljno karbonatitske magme, ona može doseći površinu. Alkalne magme nisu u ravnoteži sa karbonatitima. Frakcionisanjem alkalnih magmi nastaju nemešljivi rastopi ili, što je manje verovatno, one „propuštaju” karbonatitne rastope.

Podsetimo se da su alkalije i gasovi „glavni” agensi fenitizacije. Neki autori smatraju da se karbonatiti „odvajaju” od alkalnih rastopa iznad $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ i hlade se na $550\text{--}650\text{ }^{\circ}\text{C}$, gde počinje kristalizacija. Različitost mineralnog sastava karbonatita zavisi i od sastava matične magme, pritiska i temperature frakcione kristalizacije, prirode gasova itd.

Odnos između karbonatita i alkalnih stena je složen i još uvek nije potpuno jasan. Da li su oba rastopa produkti frakcionacije iste roditeljske magme ili su „nezavisni”? Izotopska sličnost sastava sugerise zajednički izvor. Harmer i Gittins (*Harmer i Gittins, 1998*) smatraju da se karbonatiti „moraju” odvojiti na početku evolucije alkalnih magmi (kada su one imale primitivne karakteristike), ali ne „kasnije”. Međutim, postoji mišljenje da karbonatiti moraju postojati kao „diskretne” magme u omotaču i da nisu „izvedeni” iz zajedničkih magmi. Treba pomenuti da neke alkalne magme mogu nastati parcijalnim stapanjem subkontinentalnog litosfernog omotača pod uticajem metasomatskih efekata stvorenih prilivom karbona-

tita. Ima i drugih hipoteza. Pojedini autori smatraju da karbonati nastaju remobilizacijom sedimentnih krečnjaka usled uticaja toplote silicijskih magmi.

Karbonatitni magmatizam se ponavlja, ali ne kontinuirano, na stotine miliona ili čak milijardi godina na istoj lokaciji, što ukazuje na neuobičajeni splet događaja u omotaču. Primećeno je da se karbonatitni magmatizam u afričkoj ploči podudara sa udaljenim sudarima ploča ili periodima povećane globalne magmatske aktivnosti, iako je uzrok ovih procesa nedovoljno poznat. Trenutno se vode žive rasprave o sledećim „glavnim” temama:

1. Da li se karbonatitske i alkalne magme stvaraju razdvojenim parcijalnim stapanjem peridotita iz „gaziranog” omotača ili su karbonatiti nastali iz gazirane roditeljske silikatne magme diferencijacijom u omotaču ili kori?

2. Ako je karbonatitska magma izvedena iz roditeljske silikatne magme, da li je to frakcionom kristalizacijom i na kojoj dubini?

3. Ako karbonatitska magma nije dobijena diferencijacijom silikatne magme, kakva je priroda roditeljske karbonatitne magme? Šta je uzrok razlike u sadržaju kalcijuma, magnezijuma (dolomita) i natrijuma? Da li je izvor litosferski omotač, astenosfera ili oboje?

Mičel (*Mitchell, 1986*) sugerisao je da prisustvo kalcita, kako u kimberlitima tako i u karbonatitima, ukazuje na njihovo zajedničko poreklo u istim delovima gornjeg omotača, a ne na pravi kimberlit-karbonatitni genetski odnos. Sve se više veruje da geneza kimberlita, karbonatita i mnogih alkalnih silikatnih magmi uključuje parcijalno stapanje peridotita koji sadrži karbonat (ili bar peridotita sa značajnim sadržajem CO_2). Alkalni rastopi (magne) bi „na kraju” trebalo da razviju (izdvoje) dovoljno CO_2 za stabilizaciju karbonata, naravno, u malim količinama. Smatra se da su „glavne” epizode stvaranja karbonatita bile u proterozoiku, na početku paleozoika, a zatim posle duže pauze u kenozoiku.

Subkontinentalni litosferski omotač, smatra se, ima veliki uticaj na aktivnost, stvaranje alkalnih stena i karbonatita, mada ne treba isključiti ni plume koje mogu u ranoj fazi dati alkalni karakter (uz toplotu za parcijalno stapanje).

Le Bas (*Le Bas, 1971*) smatra da asocijacija nefelinit–karbonatit–kimberlit obeležava mesto plume koja modifikuje sastav gornje litosfere, smanjujući njenu gustinu i stvarajući dome koji su karakteristične za mnoge provincije karbonatita. Ekstremno nizak viskozitet karbonatita može biti značajan faktor u izdvajanju i izdizanju ovih magmi ka površini. Karbonatitska magma se izdvaja iz izvornih stena čak i kada je stepen stapanja samo oko 0,1%, dok silikatni rastop, pri ovakvom niskom stepenu parcijalnog stapanja, još uvek ostaje sa čvrstim ostatkom (*McKenzie, 1985*).

Karbonatiti nastaju, prema pojedinim autorima, i kao krajnji produkt diferencijacije silikatnog rastopa koji sadrži rastvorene karbonate. Eksperimenti potvrđuju da karbonatitske magme nastaju u omotaču pod „posebnim” uslovima. Vendland i Majsen (*Wendlandt i Mysen, 1980*) dobili su karbonatitski rastop kao

prvi produkt stapanja prirodnog granatskog lerzolitita u prisustvu CO_2 , na pritiscima od 30 kbara. Isti materijal stopljen u prisustvu CO_2 na pritisku od 15 kbara, daje rastop toleitskog sastava.

Zbog niskog viskoziteta karbonatitskog rastopa, frakcionizacija je lakša nego u silikatnim sistemima. Dolomit i ankerit, koji su teži od kalcita, u toku kristalizacije verovatno tonu usled gravitacije. U nekim karbonatitskim intruzijama, međutim, ankerit je kristalisao poslednji, što ukazuje na to da tonjenje kristala nije jedini mehanizam diferencijacije karbonatita. Erupcija vulkana Ol Doinjo Lengai bila je karbonatitska lava sa sferulitima nefelina koji su sami sadržavali izdvajanja alkalnih karbonatita, iz čega se može zaključiti da su nemešljivi silikat-karbonatitski rastopi na niskom pritisku.

„PROBLEM” NATROKARBONATITA

Jedini istorijski aktivni vulkan karbonatita je Ol Doinjo Lengai u Tanzaniji. Tokovi su prvi put (zvanično) zabeleženi od 1958. do 1966, 1983 i, naravno, kasnije. To je jedina poznata pojava natrokarbonatita (osim tefre kod obližnjeg vulkana Karamasi). Doson i dr. (*Dawson i dr., 1995*) i Pinkerton i dr. (*Pinkerton i dr., 1995*) opisali su ih kao „aa” i pahohoe tokove crne lave, koja brzo apsorbuje vlagu i postaje bela. Izgrađena je od egzotičnih natrijumskih karbonata i ostalih „normalnih” (ali relativno retkih) silikata, uglavnom alkalnog karaktera.

Natrokarbonatit je deo vulkanskih stena koje se javljaju u ovom području (nefeliniti, fonoliti itd.). Karbonatiti su obično okruženi oreolima alkalnih fenita, zbog čega pojedini istraživači smatraju da natrokarbonatiti potiču iz alkalnih stena (nefelinita itd.). Slične zaključke doneli su i Tvajman i Gitins (*Twyman i Gittins, 1987*), koji smatraju da natrokarbonatiti mogu frakcionisati iz alkalnih karbonatitskih rastopa. U normalnom slučaju, frakciona kristalizacija uzrokuje porast alkalnosti i sadržaja H_2O karbonatitne magme sve dok magma nije zasićena H_2O . Alkalije se tada gube u rastopu ili vremenom postaju feniti, dok kalcit i dolomit kristališu stvarajući karbonatite. Smatra se da halogeni elementi (F, Cl) onemogućavaju zasićenje H_2O i time uklanjanje alkalija. Natrokarbonatit je egzotična stena nastala iz alkalnog roditelja dobijenog veoma niskim stepenom parcijalnog stapanja jedinstvenog sastava, zbog čega je malo primenljiv za šira sagledavanja ostalih karbonatita. Stvar se „komplikuje” jer je ova stena lako podložna razaranju usled atmosferilija, pa nema svežeg materijala.

KARBONATITI NA TERENU

Karbonatiti se, javljaju kao intruzivna i ekstruzivna (vulkanska) tela. Uglavnom su asocirani sa alkalnim intruzivnim telima, ali ima i samostalnih tela površine nekoliko kvadratnih kilometara.

Sovit (sadrži i do 90% kalcita) najčešći je tip karbonatita. Poslednje faze su obično brečizirane, a karakteriše se specifičnim strukturama i pojavama metasomatoze (fenitizacije) i hidrotermalne aktivnosti. Fenitizacija obično započinje

mrežom raseda i uključuje dodavanje alkalija i progresivnu desilifikaciju, pri čemu se originalni kvarc i feldspati i okolne stene zamenjuju alkalnim piroksenom i amfibolom. Rastopi prožimaju stene, formirajući oreol, širok nekoliko desetina metara. U izvornoj upotrebi, fenit se odnosio samo na mafitske stene nastale metasomatizmom **K-Na-Mg-Fe**, ali je pojam proširen i na feldspatizaciju, što je široko poznato u nekim karbonatitima koji su smešteni u plitkim delovima litosfere. Uobičajeni proizvodi fenitizacije uključuju egirin, alkalni amfibol, nefelin, flogopit i alkalni feldspat. U blizini kontakta može nastati alkalni feldspat, kada se stvara i pseudosijenit, koji je teško razlikovati od prave magmatske stene.

Fenitizacija je obično složen i višefazni proces. Feniti mogu biti bogati **Na** ili **K**, pri čemu se stvaraju albit $\pm$ natrijumski amfibol $\pm$ egirin odnosno alkalni feldspat.

Karbonatne magme „moraju” nastati iz omotača bogatog volatiliba, pre svega CO_2 , koji je neophodan za stvaranje kalcita, dolomita i magnezita. Otvoreno je pitanje porekla i ciklusa ugljenika. Da li karbonatitski magmatizam odražava reciklažu u omotaču putem subdukcije karbonatnih materijala kao što su krečnjak ili druge stene? Na osnovu izotopskih podataka, a posebno podataka o plemenitim gasovima, recikliranje kore je malo verovatno, i mi smo više skloni modelima koji uključuju oslobađanje gasova iz primitivnog materijala.

Teško je zamisliti primitivnu Zemlju bez atmosfere bogate CO_2 . Izgleda razumno pretpostaviti da je određena količina CO_2 bila zarobljena tokom akrecijske istorije Zemlje, a ostaci tog materijala još uvek su zadržani u donjim delovima omotača. Naše dve susedne planete, Venera i Mars, imaju atmosferu bogatu CO_2 , i nema razloga da Zemlja u svojoj ranoj istoriji bude drugačija od njih.

LEŽIŠTA U KARBONATITIMA

Karbonatiti su glavni izvor **Nb**, fosfata, **F** i **REE**. Minerali se javljaju u magmatskim, hidrotermalnim i supergenim ležištima. Karbonatiti i dalje predstavljaju najveći izvor **Nb** na svetu. Pirohlor je najvažniji **Nb**-mineral i najviše ga ima u Brazilu i Kanadi. Međutim, svi karbonatiti ne sadrže pirohlor. Budući da se većina minerala u karbonatitima alteriše pod uticajem atmosferilija, otporniji minerali, poput pirohlorita i monazita, mogu se eksploatisati kao rezidualni minerali. U ovim stenama česti su povećani sadržaji **REE**, posebno u monazitu, britolitu, burbankitu, parizitu itd. Treba napomenuti da većina svetske proizvodnje fosfata dolazi iz sedimentnog fosforita, dok primarni apatit u karbonatima predstavlja potencijalni izvor za proizvodnju đubriva. Ako ove stene sadrže fluorit, one takođe predstavljaju značajan izvor **F**.

Torijum (**Th**) i uranijum (**U**) takođe su povezani sa mnogim karbonatnim kompleksima i prisutni su u toritu i monazitu. Zanimljivo je da ove stene mogu da sadrže i dijamante. Ima ih u Uzbekistanu, ali su veoma sitni. Prisustvo ovog minerala (dijamanta) „otežava” objašnjenje nastanka karbonatita.

LEŽIŠTA VEZANA ZA ALKALNE STENE

Priču o rudnom bogatstvu alkalnih stena počnimo sa intruzijom Ilimaussak (Grenland), koja je jedna od najbogatijih ležišta retkih zemalja na svetu, u kojoj je više od jednog procenta ukupnih elemenata retkih zemalja.

Alkalne stene su obogaćene retkim metalima istim procesom kao hrom, nikl i elementi platinske grupe, akumulirani magmatskim frakcionisanjem u slojevitim mafičnim intruzijama. Podsetimo se da pomenuti metali imaju ekstremno velike koeficijente raspodele između minerala i rastopa (tj. između silikatnog rastopa i sulfidnog rastopa) i akumuliraju se u ranoj fazi frakcioniranja bazičnih i ultrabazičnih sistema. Nasuprot tome, elementi retkih zemalja imaju izuzetno niske koeficijente raspodele između minerala i rastopa, zbog čega se koncentrišu u rezidualnom rastopu.

U većini magmatskih stena, cirkon akumulira posebno teške retke zemlje. Kada ovaj mineral počne da kristališe, ovi teški metali postaju kompatibilni, a njihova koncentracija (sadržaj) u rezidualnom rastopu opada sa povećanjem frakcione kristalizacije. Ako cirkon ne kristališe retke zemlje, one ostaju i obogaćuju se u ostatku rastopa. Drugi način obogaćivanja retkih zemalja u alkalnim stenama je da alkalni rastopi nastavljaju kristalizaciju (i time diferencijaciju) sve do vrlo niskih temperatura. Većina granitoidnih magmi, pomenuli smo, očvršćava na oko 650–700 °C, dok alkalni rastopi ostaju i ispod 600 °C.

Alkalne stene su bogate elementima kao što su **Li**, **F**, **Na**, **Be** i **B**, koji su takođe vezani za niske temperature. Pojedini autori smatraju da je glavni „krivac” natrijum (**Na**), koji se nakon feldspata ugrađuje, ulazi u sastav alkalnih amfibola (riebekit ili arfvedsonit) ili piroksena (egerin), u kojima NaFe^{3+} zamenjuje MgFe^{2+} . „Višak” kiseonika za stvaranje Fe^{3+} je verovatno izvor H_2O i CO_2 u magmi (rastopu), pri čemu alkalne magme nikada ne dosežu zasićenost vodom, već postaju zasićene fluidima bogatim CH_4 . Dokaz za to su „uobičajene” tečne inkluzije sa CH_4 u alkalnim stenama. Pošto se voda, pretpostavlja se, ne izdvaja tokom frakcionisanja alkalnih intruzija, elementi kao što su **Li**, **F**, **Na**, **Be** i **B** ostaju u rastopu, što omogućava da se oni „razlažu” do niže temperature, čime se povećava sadržaj retkih zemalja u njihovom ostatku.