

V.6 PERIDOTITSKA GRUPA

Ultrabazične (sinonim je i ultramafitske) stene se, prema načinu, mestu pojavljivanja, dele na dubinske, žične i izlivne.

V.6.1 DUBINSKE ULTRABAZIČNE STENE

UVOD

Dubinske ultrabazične stene imaju sadržaj SiO_2 manji od 45%. Bogate su **magnezijom** (MgO) i **gvožđem** (FeO), a siromašne **aluminijom** (Al_2O_3), **alkalijama** Na_2O i K_2O i **kalcijom** (CaO).

Kao bitni minerali u ovim stenama javljaju se samo femski minerali: **olivini**, **rombični** i **monoklinični pirokseni**, retko **hornblenda** i **biotit**. Ove stene ne sadrže salske minerale: feldspate, feldspatoide i kvarc.

Od sporednih, akcesornih minerala najčešći su **hromit**, **pikotit**, **magnetit**. U okviru ove grupe javljaju se i tzv. **alumijski minerali** (koji sadrže aluminiju, Al_2O_3), **plagioklas**, **spinel** i **granat**, koji su važni indikatori uslova nastanka, porekla ultrabazičnih stena. Prisutni su u steni obično do 10% i biće prikazani detaljnije u drugom delu teksta ovog poglavlja.

V.6.1.1 PERIDOTITI

Peridotit je opšti termin za ultrabazične stene koje su izgrađene od pomenutih glavnih (bitnih) minerala. Pojedini autori ih prema mineralnom sastavu i načinu pojavljivanja dele u dve grupe:

1. PERIDOTITE, izgrađene od **olivina**, **monokliničnog** i/ili **rombičnog piroksena**, koje nazivamo opštim nazivom **peridotiti**, i

2. PIROKSENITE i **HORNBLENDITE**, koji ne sadrže olivin kao bitan sastojak, već su izgrađeni od monokliničnog, ili rombičnog piroksena ili hornblende. Stene dobijaju naziv prema mineralu koji dominira. Ove stene se javljaju kao žice u peridotitima.

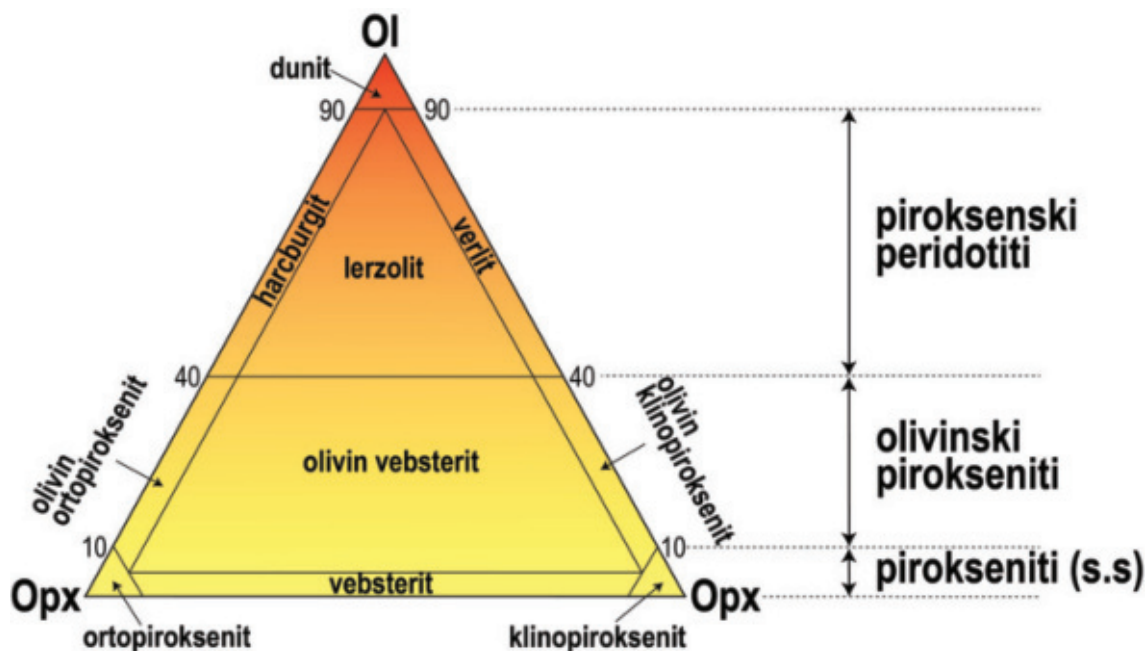
U većini udžbenika peridotiti se, na osnovu glavnih, bitnih minerala, ali ne i prema njihovom modalnom sadržaju i međusobnom odnosu, klasifikuju na:

- **dunite**, izgrađene samo od **olivina**;
- **harcburgite**, izgrađene od **olivina** i **rombičnog piroksena**;
- **lerzolute**, izgrađene od **olivina**, **rombičnog** i **monokliničnog piroksena**;

- **verlite**, izgrađene od **olivina** i **monokliničnog piroksena**;
- **kortlandite**, izgrađenog od **olivina** i **hornblende**;
- **biotit peridotite**, izgrađene od **olivina**, **piroksena** i **biotita (flogopita)** i
- **feldspat peridotite** (ili plagioklas peridotite) koji sadrže intersticijski (poslednji kristalisao) bazični plagioklas (anortit), kog ima do oko 10% volumena stene.

Podsetimo se i nomenklature peridotita koja je prikazana u okviru klasifikacije **IUGS**-a za magmatske stene (grupa sa **M > 90%**) koja se bazira na modalnom sastavu olivina, rombičnog piroksena, monokliničnog piroksena i hornblende (slike 410 i 411). Ove stene sadrže manje od 10% modalnog bazičnog plagioklasa (uglavnom anortita).

Nazivi stena na osnovu sadržaja olivina, rombičnog i monokliničnog piroksena prikazani su na slici 410. Iznad 40% modalnog olivina su **peridotiti**, dok su stene sa manjim sadržajem olivina **pirokseniti**.

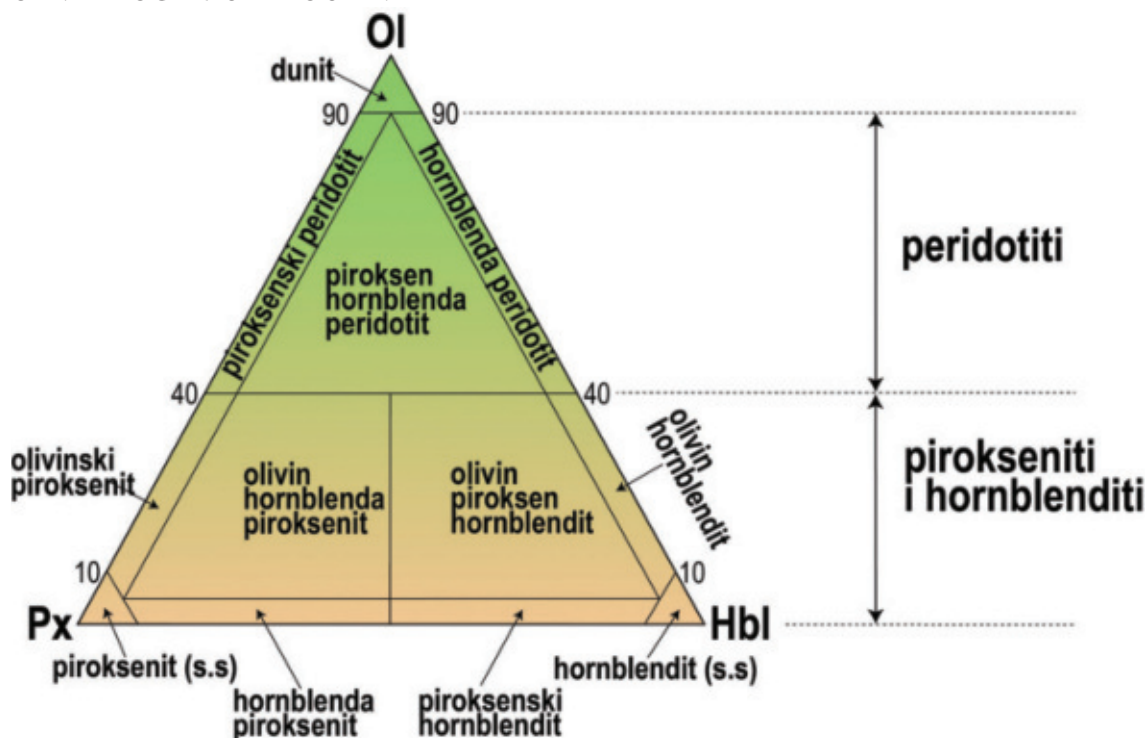


Slika 410. Nazivi ultrabazičnih stena na osnovu klasifikacije IUGS-a

Pirokseniti se dalje dele na ortopiroksenite, vebsterite i klinopiroksenite.

Granica između dunita i ostalih stena iz grupe peridotita ograničena je na 10% modalnog sastava orto i klinopiroksena, odnosno hornblende. Ako stene imaju preko 10% orto- i/ili klinopiroksena prelaze u lerzolite, harzburgite itd.

Na osnovu međusobnog sadržaja olivina, piroksena i hornblende data su druga imena (slika 411). Na prikazanim dijagramima ima mnogo naziva stena, ali nema razloga da ih učite „napamet”. Predlog: odredite modalni sastav glavnih minerala Vaše proučavane ultrabazične stene i nanosite ga na dijagram.



Slika 411. Nazivi stena prema međusobnom sadržaju olivina, piroksena i hornblende

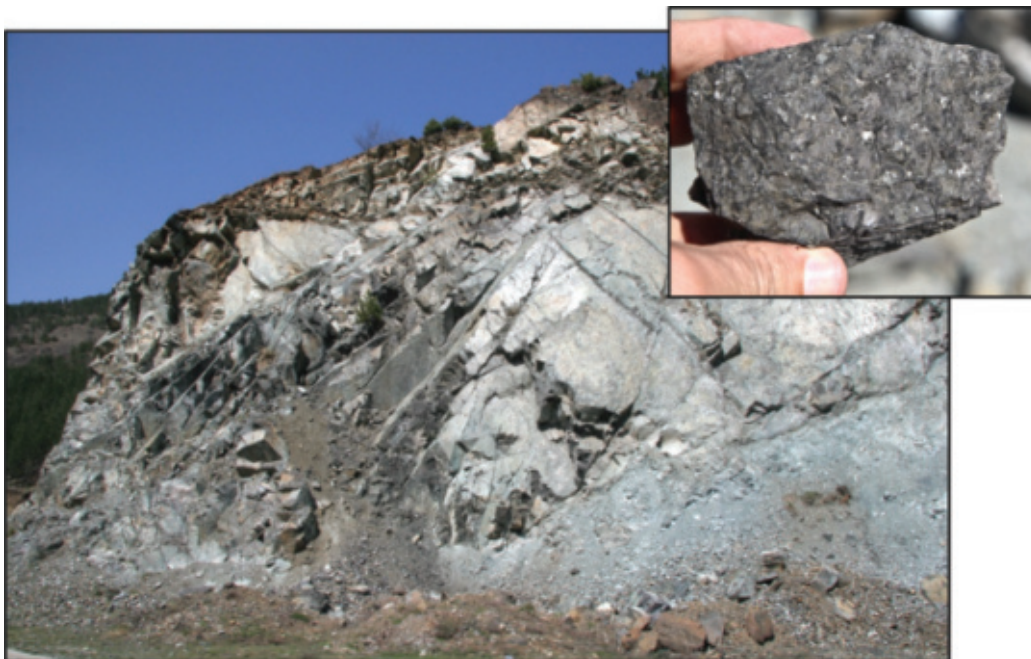
Podsetimo se da je lerzolit dominantna stena gornjeg omotača Zemlje, dok su druge ultrabazične stene, kao što su verliti, vebsteriti i klinopirokseniti, mnogo manje zastupljeni.

Većina lerzolita (kao i harcburgita) ima metamorfne teksture, pa pojedini autori smatraju da je „ironično” smatrati ih magmatskim stenama. Međutim, većina autora smatra da je lerzolit „prihvaćen” kao izvorna stena za bazaltne magme koje grade okeansku koru. Postoje i drugačija mišljenja. Naime, pojedini autori smatraju da eklogit, metamorfna stena koja je izgrađena od granata i omfacita (alkalnog piroksena), a koja generalno ima isti sastav kao i bazalti, takođe može biti matična stena od koje su parcijalnim stapanjem nastali pomenuti bazalti.

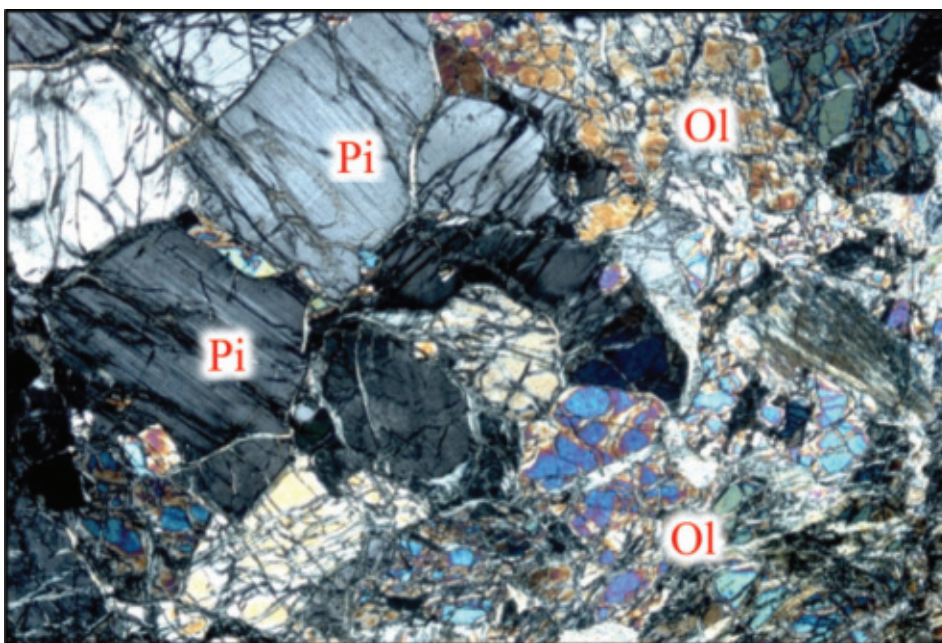
Peridotiti su uglavnom krupnozrne stene, sa veličinom minerala od 2 do desetak milimetara (slika 412). Ove stene imaju veliki visok kolor indeks, preko 90%, zbog čega spadaju u melanokratne stene i tamne su boje. Mineralni sastav i struktura peridotita se „lako” i brzo identifikuju u polarizacionom mikroskopu, osim ako nisu jako promenjeni, pre svega serpentinisani (slika 413). Obično se sastoje od 60% olivina ($\text{Fo}_{88} - \text{Fo}_{92}$), 25% ortopiroksena, koji ima povišen sadržaj aluminijuma ($> 5\% \text{Al}_2\text{O}_3$), i 15% klinopiroksena, diopsida, obično sa 4–8%.

Sadržaj Cr_2O_3 varira od 0,5% do 1,2%. Strukture su najčešće hipidiomorfno zrnaste, ponekad i panidiomorfno zrnaste sa idiomorfnim kristalima olivina i piroksena. Sreću se pojkilitske (uklapanja) strukture, ponekad i eksolucija i zonarnost (u piroksenima).

Boja peridotita zavisi od stepena alteracije, koja je česta. Kada su sveži, zelene su do žućkasto-zelene boje, sa staklastim do masnim sjajem i veoma jedre



Slika 412. Izdanak peridotita, Kraljevo; gore desno: uzorak stene



Slika 413. Mikrosnimak peridotita (Kraljevo); skraćenice:

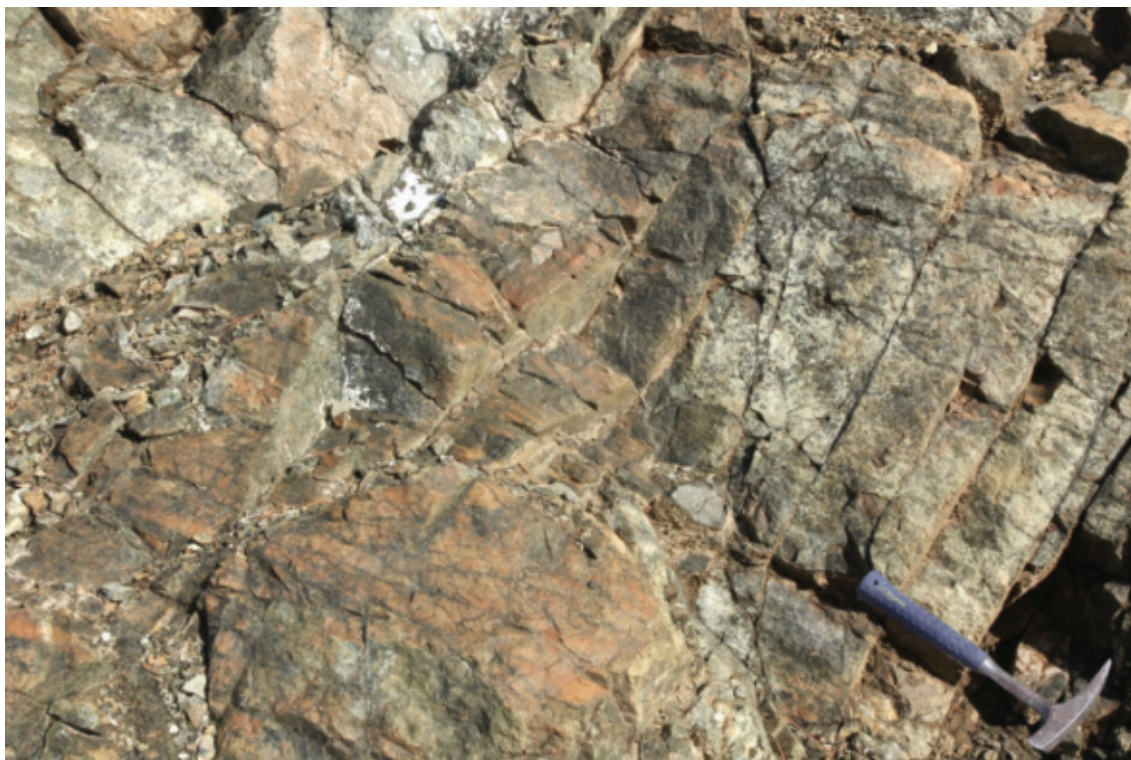
Ol = olivin, Pi = piroksen; Nikoli +, uvećanje 50x

(čvrste). Delimično ili potpuno alterisani peridotiti dobijaju zelenu, tamnozelenu, pa čak i crnu boju.

Teksture su uglavnom masivne, trakaste do „slojevite” kada se u masi stene javljaju akumulacije olivina, piroksena ili hromita, odnosno magnetita.

Lučenje peridotita je pločasto do nepravilno (slika 414).

Na površini, na terenu, peridotiti su obično polomljeni i ispucali, zbog visokog stepena alteracija nastalih usled uticaja atmosferilija, ali i zbog tektonskog



Slika 414. Pločasto lučenje u peridotitima, Zlatibor

smeštaja ovih stena u sadašnji položaj. Specifičan hemijski sastav, visok sadržaj **Mg** i **Fe**, sa malo silicije i alkalija, stvara odgovarajuće tlo na kojem uglavnom rastu niska trava i zimzelene biljke poput borova i jela, što omogućava relativno lako prepoznavanje područja sa peridotitima (slika 415).



Slika 415. Teren izgrađen od peridotita, Zlatibor

Dominantan proces promena je serpentinizacija, u kojoj olivin (i ortopiroksen) sa vodom prelazi u serpentin, a klinopiroksen u uralit i druge minerale, što dovodi do povećanja volumena stene i njene dodatne ekspanzije, rasta, razaranja, lomljenja i drobljenja. Ovaj proces se često primećuje odmah posle kiše kada se blokovi ovih stena pojavljuju na putu. Stoga, kada vozite putem koji prolazi kroz peridotite (kao što su Zlatibor, Divčibare, deo Ibarske magistrale itd.) budite pažljivi. Slično je i u rudnicima u peridotitima, posebno pri podzemnoj eksploataciji (hromita, magnetita, platine itd.). Pomenutim procesima fizičke dezintegracije nastaje sekundarna poroznost koja omogućava lako kretanje površinskih voda u dublje delove, zbog čega su područja peridotita generalno siromašna vodom, izvorima ili većim akumulacijama.

Od sekundarnih minerala, osim serpentinita, javljaju se i **hrizotil azbest**, **talk**, **magnezit**, (slika 416), kao i nešto hlorita, kalcita i opala. Većina autora smatra da su ovi minerali nastali uz „malu” pomoć hidrotermalnih rastvora. Neki od njih mogu biti i ekonomski značajni.



*Slika 416. Pojave magnezita kod Čajetine;
gore desno: magnezit, detalj*

Azbest, **talk** i **magnezit** često grade rudna ležišta, gde se vrši eksploatacija. Azbest se javlja u Korlaću (Ibarsko-kopaonički masiv), a pojave magnezita su zabeležene na Golešu, u peridotitima Šumadije (okolina Čačka), na Zlatiboru itd. Od rudnih minerala javlja se hromit, na Deli Jovanu (slika 417).

Upotreba peridotita u građevinske svrhe, pre svega za gradnju puteva, veoma



Slika 417. Hromit u peridotitu Deli Jovana

je ograničena. Ova stena je nepodesna za upotrebu zbog velike zapremine težine i nedovoljne otpornosti na atmosferske uticaje. Međutim, zbog lepe tamnozeleno boje i često prugaste strukture, peridotiti se ponekad koriste kao ukrasni kamen za unutrašnju dekoraciju. Duniti se eksploatišu i za vatrostalne materijale. Oni moraju biti sveži, sa sadržajem vode ispod 3% i sadržajem piroksena ispod 10%. Takvih stena (dunita) ima na Golešu. Takođe,

umesto kvarcnog peska, sve više se koristi olivinski pesak za kalupe u livarstvu, jer je pogodniji za tu svrhu.

Peridotiti su veoma rasprostranjene stene u našoj zemlji. Najveće pojave se javljaju na Zlatiboru, Maljenu u zapadnoj Srbiji, na Kopaoniku, Golešu i drugim lokalitetima. Ove stene su posebno značajne u gradnji jurskih ofiolitskih masiva Dinaridskog ofiolitskog pojasa i ofiolita Vardarske zone. Stariji peridotiti (izotopska starost 410 miliona godina, početak devona) sadrže i intersticijski bazični plagioklas (anortit), pa se nazivaju feldspat peridotiti. Oni se javljaju kao manji deo u gabro masivu Deli Jovana, gde takođe ima i pojava hromita.

Petrolozi, mineralozi, regionalni geolozi i svi ostali koji žele više detalja o nastanku, poreklu i rasporedu peridotita, obratite pažnju na tekst koji sledi.

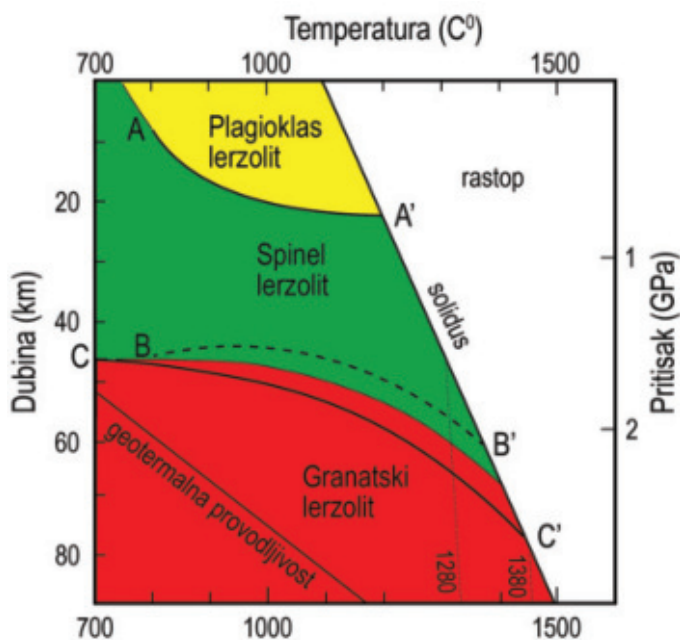
Peridotiti se javljaju u tri različita tektonska okruženja, kao:

1. **tektonitski peridotiti**, koji su „došli” iz dubokih delova naše planete (gornjeg omotača);
2. **ksenoliti** u alkalnim lavama i
3. **kumulatni feldspat peridotiti** koji grade donje delove okeanske kore.

V.6.1.2 TEKTONITSKI PERIDOTITI

Najveće mase ovih stena su došle iz gornjeg omotača putem tektonskih procesa i smeštene su blizu površine ili na površini Zemlje. Po sastavu se uglavnom radi o harcburgitima, lerzolitima i, retko, dunitima, koji su uvek u tektonskom odnosu (kontaktu) sa okolnim stenama. Kao akcesorni minerali javljaju se spinel i granat, koji pripadaju „aluminijumskoj fazi”.

Aluminijumska faza, odnosno prisustvo akcesornih minerala koji sadrže aluminiju (anortit, spinel, granat), na osnovu termodinamičkih proračuna i eksperimentalnih podataka, pruža informacije o uslovima stvaranja peridotita, odnosno o područjima odakle potiču, iz gornjeg omotača ili donjeg dela okeanske kore. Na dubinama do oko 30 km stabilna aluminijumska faza je plagioklas (slika 418). Peri-



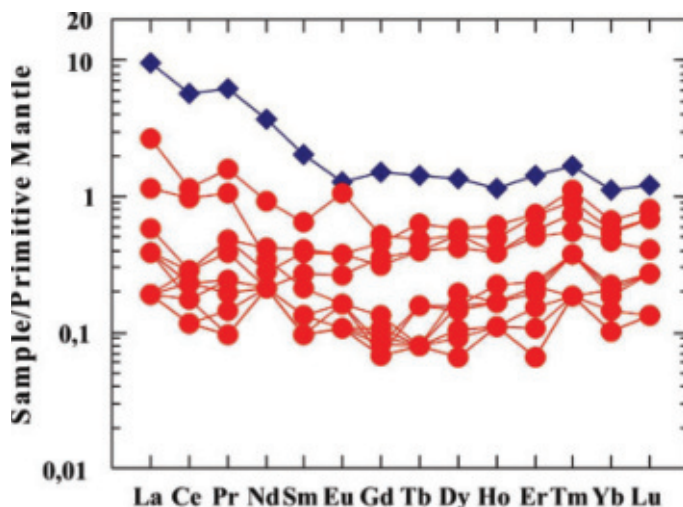
Slika 418. Polja stabilnosti plagioklasa, spinela i granatskog lerzolit; krive A–A' i B–B' su prema **Saxena i Eriksson (1983)**, a kriva C–C' od **O'Hara i dr. (1971)**; granica između spinela i granatskog lerzolit je približna; solidus krive na 1280 °C i 1360 °C su prema **McKenzie i Bickle (1988)**

dotiti koji sadrže ove akcesorne minerale nastali su na ovim dubinama. Upravo su to feldspat (ili plagioklas, tj. anortit) peridotiti koji grade donje delove okeanske kore. Nastali su frakcionom i gravitacionom kristalizacijom gabro magme. U intervalu od ove dubine pa do oko 75 km, stabilan je spinel. Ovaj mineral je česta „aluminijumska” faza u većini peridotita harzburgitskog sastava na našem području (**Milovanović i dr., 2001, Milovanović i dr., 2013**). Potiču iz gornjeg dela gornjeg omotača. Na dubinama većim od 75 km, umesto spinela se javlja (zamenjuje ga) stabilniji granat. Prelazi između pomenutih aluminijumskih faza su uglavnom

postepeni, nisu oštri. I evo ideje za proučavanje peridotita. Kada u Vašoj ispitivanoj steni uočite granat, kao akcesorni mineral, možete reći (čak i ako ste sami), evo „mog” peridotita koji dolazi sa velikih dubina iz donjeg dela gornjeg omotača. Lično sam imao priliku da ga vidim, dodirnem i istražim dok sam radio na peridotitima, zapravo ofiolitima. Osećaj je predivan, inspirišući i budi želju da dokučimo tajne delove naše Zemlje zarad nje i nas samih.

Peridotiti sa granatom na dubinama većim od oko 150 km, usled visokih PT uslova, sadrže dijamante, koji se često javljaju kao inkluzije u piroksenu ili granatu, ponekad su asocirani i sa perovskitom. Na manjim dubinama, dijamant nije stabilan i prelazi u grafit, ukoliko su uslovi redukcioni, ili je prisutan u obliku CO₂, ukoliko su uslovi oksidacioni, kada se javlja kao gasna inkluzija u pojedinim mineralima.

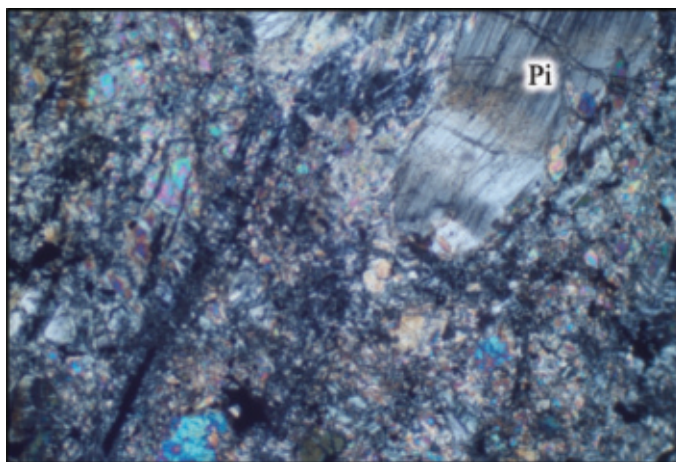
Zavisno od sadržaja i vrste aluminijumske faze, može se dodati kvantifikator kao prefiks uz naziv stene: plagioklaslerzolit, spinel-lerzolit, granat-lerzolit itd. Napomena: stabilnost pomenutih minerala u literaturi značajno varira, naročito za granat, koji se kreće u intervalu od 40 km do oko 100 km, zbog čega se prilikom korišćenja podataka i interpretacije rezultata uvek treba pozvati na izvornu literaturu. Zavisno od sastava, uključujući i sadržaj minerala sa pomenutom aluminijumskom fazom, ove stene imaju „karakteristične” sadržaje i međusobne odnose pojedinih mikroelemenata, posebno retkih zemalja. Ove stene se najčešće normalizuju na primitivni omotač (slika 419). Tektonitski peridotiti imaju „tektonsku”, tj. po-



Slika 419 Sadržaj elemenata retkih zemalja (REE) u serpentinisanim peridotitima Tekije i Petrovog sela (plavi rombovi); normalizacija vrednosti po **Sun S.S. i McDonough, W.F. (1989)**

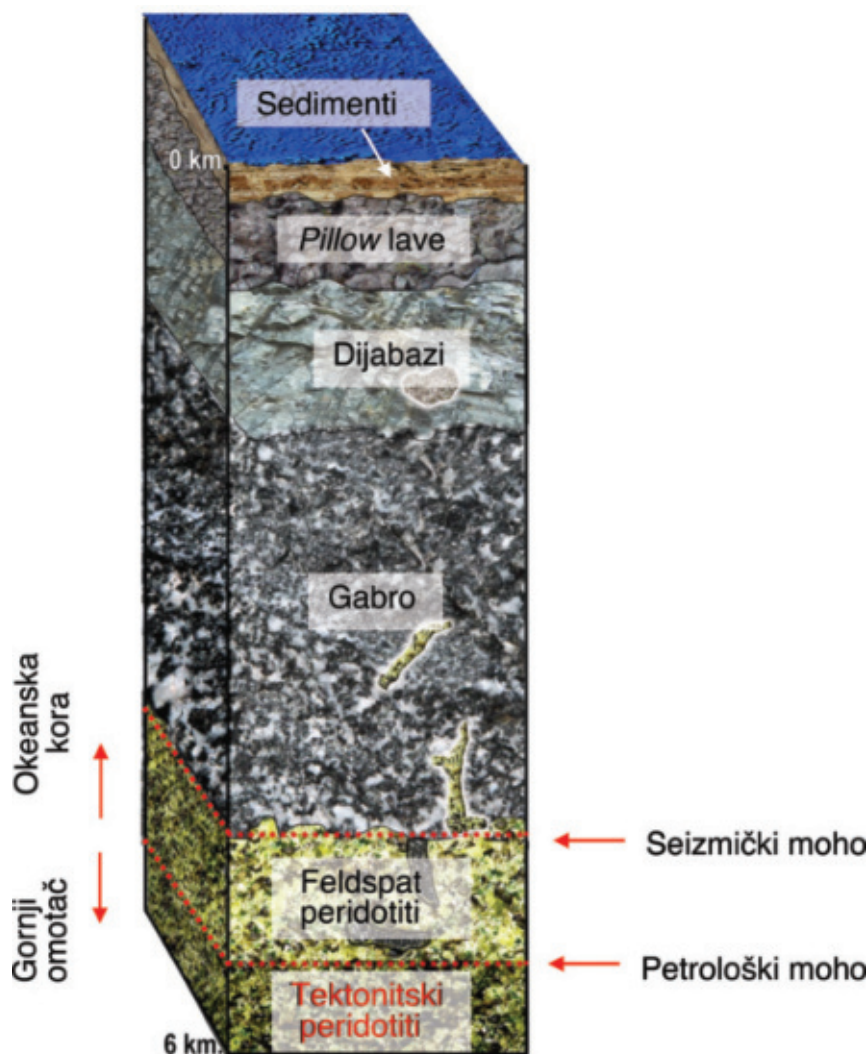
(usled tektonike su smrvljena). Često se sreću i „čuvena” srastanja piroksena pod uglom od 120°. Većina autora tumači ovu strukturu kao rekristalizaciju u čvrstom stanju, zbog čega je svrstavaju u metamorfne stene.

ligonalnu, „mozaik” strukturu (po čemu su dobili ime), gde su zrna bitnih, glavnih minerala, pre svega piroksena, deformisana, savijena i ispucala usled mehaničkih (tektonskih) procesa u čvrstom stanju (veoma važno) tokom njihovog kretanja iz gornjeg omotača i smeštaja u današnji položaj (slika 420). U literaturi se ova struktura često naziva i protoklastična, pri čemu „veliki” (krupni) deformisani kristali (protoklasti) duž ivica i granica zrna pokazuju granulaciju



Slika 420. Tektonitski peridotit (Zlatibor) sa deformisanim piroksenom (Pi) i olivinom (Ol); N+, 50x

Tektonski peridotiti se u „idealnom” profilu gornjeg dela Zemlje nalaze u gornjem omotaču, ispod stena istog mineralnog sastava, ali sa kumulatnom strukturom koja je nastala magmatskim procesima, frakcionom kristalizacijom donjeg dela okeanske kore (slika 421). Ove dve grupe peridotita čine granicu, tzv. petrološki Moho diskontinuitet, koji se seizmički ne može utvrditi zbog slične gustine stena i odsustva odgovarajućih pikova. Taj diskontinuitet se nalazi na granici kumulatnog gabra i tektonitskog peridotita, gde postoji veća razlika u gustini zbog razlike u mineralnom sastavu. Tektonski peridotiti se javljaju u većini orogenih pojaseva, kao što su Alpi, gde se nazivaju i alpskim peridotitima, koji su uglavnom jako serpentinisani.



Slika 421. Tektonitski peridotiti u „idealnom” profilu okeanske kore

V.6.1.3 PERIDOTITI KAO KSENOLITI

Važne informacije o sastavu gornjeg omotača dobijene su i na osnovu prisustva ksenolita, komada i fragmenata ultrabazičnih stena koji se obično nalaze u alkalnim bazaltima, kimberlitima itd., otkrivenim na hiljadama lokaliteta širom sveta. To su komadi stena iz gornjeg omotača koji su otkinuti sa zidova prilikom kretanja i uzdizanja bazaltnih i alkalnih lava ka površini. Veličine tih komada su od nekoliko centimetara do preko deset centimetara (slika 422).

Ksenoliti iz omotača obično su sveži, sa karakterističnom maslinasto-zelenom bojom, i sastoje se od olivina, ortopiroksena, klinopiroksena, spinela i granata.

Klinopiroksen je po sastavu „hrom-diopsid” sa karakterističnom živopisnom zelenom bojom. Ponekad se u ksenolitima javljaju i minerali sa vodom, poput flogopita i amfibola (pargazit).



Slika 422. Ksenolit ultramafita u bazaltu, Soko Banja

Na osnovu modalnog sastava glavnih minerala u ksenolitima, stene se klasifikuju kao lertzolit, harzburgit, a retko i dunit. Najčešće nemaju kumulatnu strukturu, već poligonalnu ili mozaičnu teksturu, koja se opisuje kao rekristalizacija u čvrstom stanju (deformacija, kidanje, drobljenje itd.) i koja se smatra metamorfnom, a ne magmatskom. Ove karakteristike se lako uočavaju pod mikroskopom.

Ksenoliti peridotita sa spinelom često se javljaju u alkalnim bazaltima, bazanitima i nefelinitima koji se izlivaju u okeanskim, ali i u kontinentalnim prostorima. S druge strane, ksenoliti sa granatom potiču sa većih dubina i najčešće se javljaju u alkalnim silicijumom nezasićenim magmama (lavama), kimberlitima i lamproitima. Ovo prisustvo je u saglasnosti i sa pojavom dijamanta (u kimberlitima), koji su stabilni na visokom pritisku i temperaturi, što ukazuje na njihov nastanak na velikim dubinama.

V.6.1.4 KUMULATNI FELDSPAT PERIDOTITI

Ova grupa peridotita nastala je frakcionom kristalizacijom bazaltne magme na znatno manjim dubinama, uglavnom u donjim delovima okeanske kore (slika 421). U literaturi se nazivaju i **stratiformni ultramafitski kumulati**.

U **feldspat peridotitima**, aluminijska faza je plagioklas (uglavnom anortit), koji se najčešće javlja kao intersticijska faza (poslednji je kristalisao). U pojedinim udžbenicima ove stene se nazivaju i **plagioklas peridotiti**.

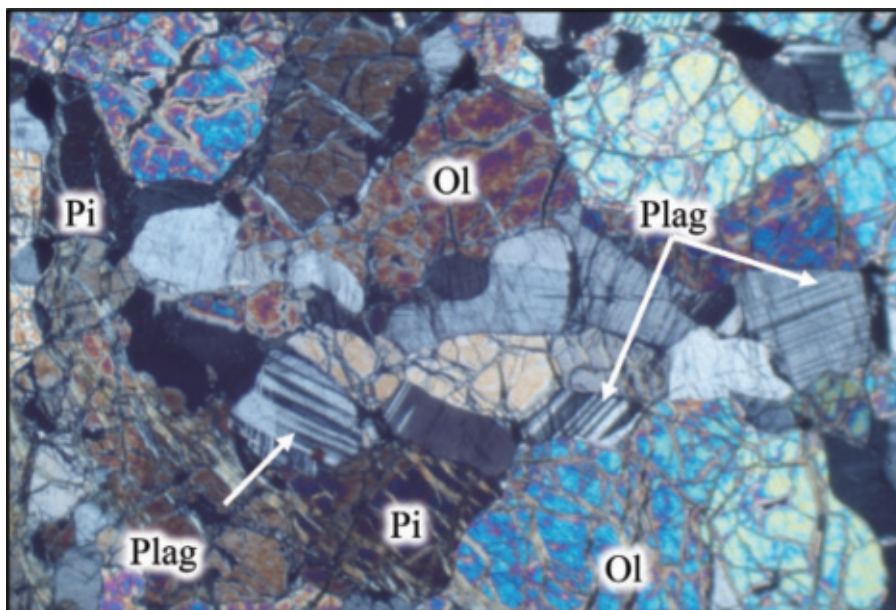
Najčešće se javljaju u donjim delovima okeanske kore, ispod gabrova, kao kumulatni peridotiti nastali frakcionom kristalizacijom bazaltne magme kao njen najbazičniji diferencijat (slika 423).

Strukture ovih stena su zrnaste, hipidiomorfne ili panidiomorfne. Izgrađeni su od olivina, rombičnog i/ili monoklinočnog piroksena koji nisu deformisani, već su „pravi” kumulatni minerali kristalisali u zatvorenom sistemu (slika 424).



Slika 423. Feldspat perioditi, Bukovi, Maljen; gore desno: uzorak stene

U nekim piroksenima uočava se i eksolucija. Od akcesornih minerala prisutan je pomenuti feldspat (anortit), koji zapunjava prostore između glavnih minerala olivina i piroksena (intersticijski), ukazujući na to da je poslednji kristalisao. Njegovo prisustvo je vezano za „plitke uslove” (male dubine) stvaranja ovih stena, do oko 35 km. Od ostalih akcesornih minerala javljaju se i spinel i hromit.



Slika 424. Feldspat (plagioklas) peridotit, Deli Jovan; Plag = plagioklas, Pi = piroksen, Ol = olivin; N+, 50x

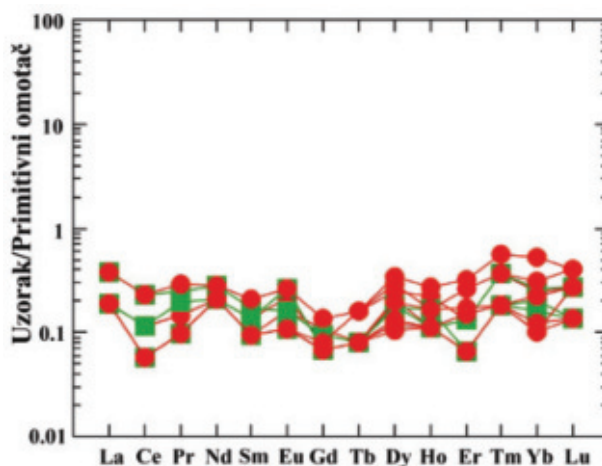
Feldspat peridotiti ili, kako se još nazivaju, stratiformni kumulatni peridotiti grade tzv. kumulatne sekvence u zatvorenom sistemu magmatske evolucije i akumulacije kristala na dnu magmatske komore bazičnog sastava.

Istraživanja, međutim, ukazuju na to da ultrabazični kumulati mogu nastati i diferencijacijom magmi sa većim sadržajem SiO_2 , kao što su Bušveld i Stilvoter (engl. *Stillwater*) kompleksi, kada se javljaju kao sekvence ili slojevi „odvojeni” od stene domaćina, posebno u podinskim delovima. Često se ciklično i ritmički ponavljaju sa akumulacijom dunita i hromita u donjem delu, i piroksenita u gornjem delu. Masivne hromitske trake često označavaju bazu svake sekvence i ponekad sadrže značajne količine koje se mogu eksploatirati.

Serijski kumulatni peridotiti je ponekad „ispresecana” tankim peridotitskim dajkovima „pikritske” magme, koja ne pripada procesima akumulacije, pri čemu ostaje otvoreno pitanje njihove geneze.

Stratiformni kumulatni peridotiti imaju sličan mineralni sastav kao i tektoniti, ali je razlika u hemijskom sastavu, sadržaju pojedinih mikroelemenata, izotopa itd. Tu su i akcesorni minerali i njihov sastav. Javljaju se i kao olistoliti u ofiolitima, što će biti prikazano u narednom poglavlju. Pri interpretaciji geochemijskih podataka, obratite pažnju, između ostalog, na sadržaje **Ni**, **Cr**, **Eu** i „teške” **REE** (zbog granata). Najčešće se normalizuju na primitivni omotač ili hondrite. Nakon dobijenih rezultata treba sagledati situaciju na terenu, pre svega odnos sa okolnim stenama kako bi rekonstrukcija geoloških procesa bila što bliža „geološkoj istini”.

Pomenimo i ponovimo izraze „primitivni” (engl. *primordial*) i „osiromašeni omotač”, koji se odnose na izvor bazaltnih magmi (detaljnije objašnjeno u poglavlju Bazalti). Gornji deo gornjeg omotača je osiromašen pojedinim mikroelementima (**La**, **Ce**, **Rb**, **Sr** itd.) zbog parcijalnog stapanja, koje je rezultiralo bazaltnim magmama koje su ih „odnale” na površinu. Ispod toga je „neosiromašeni” (primordijalan, primaran) deo koji nije parcijalno stapan, pa je u odnosu na gornji deo obogaćen pojedinim mikroelementima (slika 425). Tu je i metasomatski omotač, koji je nastao kretanjem magmi koje su za „relativno kratko vreme donele” pojedine elemente uz kristalizaciju minerala s vodom (kao što su hornblenda, flogopit itd.). Ove stene se javljaju i u mnogim ofiolitskim kompleksima (detaljnije objašnjeno u odeljku o ofiolitima).



Slika 425. Sadržaj elemenata retkih zemalja (REE) u feldspat peridotitima i dunitima (zeleni kvadrati) Deli Jovana; normalizacija vrednosti prema **Sun S.S. i McDonough, W.F. (1989)**

V.6.1.5 SERPENTINIT

Peridotiti su izgrađeni od olivina i piroksena koji su nastali na visokim temperaturama i pritiscima, zbog čega su na nižim PT uslovima (niskom stepenu metamorfizma) ili površinskim uslovima (atmosfera, kiša, sneg) nestabilni. Lako menjaju sastav i strukturu. Olivini i rombični pirokseni, dodavanjem vode (kiše, podzemne vode, hidrotermi itd.), prelaze u serpentin, uz oslobađanje praškastog (sitnozrnog) magnetita, pri čemu se povećava zapremina stene (slika 426).



Slika 426. Serpentin (paleozojski), Petrovo Selo, Miroč; gore desno: detalj stene

Od serpentinitičkih minerala, najčešći su antigorit, hrizotil i lizardit. Novoobrazovana stena naziva se **serpentin**. Od sekundarnih minerala sreću se, **talk**, **azbest** i **magnezit**, koji, ako ih ima u većim količinama, mogu stvarati rudna ležišta.

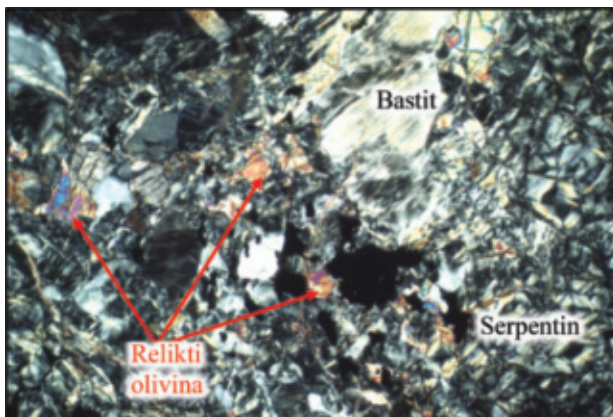
U petrografskom preparatu ovih stena često se uočavaju pseudomorfoze olivina sa serpentinom i praškastim magnetitom, kao i pukotine kroz koje su prodrli fluidi koji su učestvovali u alteracionim procesima, koje pojedini autori svrstavaju i u metamorfne. Na promenjenom olivinu se razlikuju dve generacije serpentina – prva koja zapunjava prostore između ostrvaca (relikata ovog minerala) i druga kada je mineral potpuno zamenjen serpentinom. Česta su i izdvajanja sitnozrnog (praškastog) magnetita, koji markira ostrvca primarnog olivina. Serpentinizacijom ortopiroksena stvara se bastit, sa karakterističnim metalnim, bronzanim sjajem.

Uglavnom se uočava i primarna cepljivost, po čemu se razlikuje od olivina (slika 427). Akcesorni minerali u peridotitima su spinel, hromit itd., uglavnom otporni (rezistentni) na alteracione procese.

Serpentinititi su masivni, često sa masnim, klizavim opipom i neravnim do fibroznim prelomom. Boja serpentinita varira od zelene, žućkasto-braon, do sivo-plave boje ili mešavine sve tri, zavisno

od dominantnog serpentinskog minerala. Antigorit je plavo-zelen do bezbojan, lizardit je zelen do beo, hrizotil je vlaknast i beo, često je to, u stvari, azbest.

Većina serpentinita je vezana za tektonski smeštaj peridotita iz gornjeg omotača ili stena okeanske kore, kada se stvaraju ofioliti, o kojima će biti detaljnije reči u narednom poglavlju. Pri ovim procesima, obično zatvaranjem okeanskog prostora i smeštajem peridotita, dolazi do njihove serpentinizacije. Zbog male duktilnosti (čvrstine), ove stene su jako deformisane tokom pomenutih procesa, i stvaraju blokove, komade, olistolite (detaljnije u delu o ofiolitima), koji zajedno sa drugim magmatskim stenama okeanske kore i omotača, kao i sedimentima, stvaraju melanž, koji se obično nalazi u prostoru aktivne kontinentalne margine, odnosno u subdukcionoj zoni. Pomenimo da se neki serpentinititi, zbog manje gustine u odnosu na okolne stene, javljaju i kao dijapiri u akrecionim prizmama (narastajućim klinovima), gde se često javljaju duž većih razlomnih struktura.



Slika 427. Mikrosnimak serpentinita, Zlatibor; N+, 50x

V.6.1.6 LISTVENIT

Listvenit (sreću se i nazivi listvanit ili listvaenit) jeste metasomatska stena koja je nastala hidrotermalnom alteracijom, promenom ultramafita i, ređe, bazičnih stena koje se javljaju u ofiolitima (slika 428). Prema primarnom mineralnom sastavu, to su peridotiti i obično se svrstavaju u tektonite.

Listveniti su najčešće svetlozelene boje, ponekad žute ili sive, sa gustinom od 2,8 do 3,1 g/cm³. Prvi put su otkriveni na Uralu.

Izgrađeni su od karbonata, dolomita, ankerita, kalcita, kvarca, kalcedona, serpentina (antigorita), hlorita, fuksita, reliktnih zrna hromita itd. Prema mineralnom sastavu, pojedini autori ih dele na silicijske (gde dominiraju kvarc i kalcedon) i karbonatne, gde dominiraju kalcit, dolomit i ankerit.

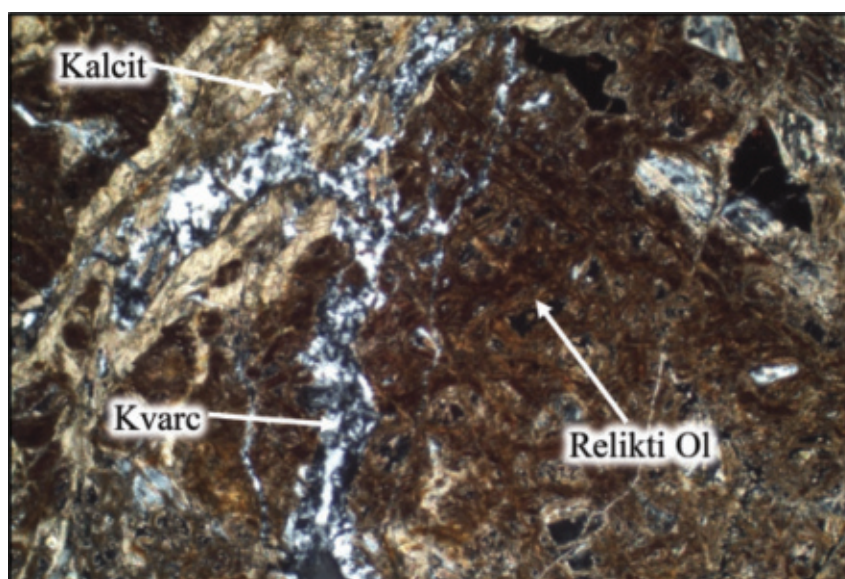
U petrografskom preparatu često se uočavaju reliktna zrna prvobitnih minerala olivina i piroksena, koji su delimično ili potpuno zamenjeni serpentinitom, a ponekad i talkom. U steni često ima i trovalentnog gvožđa, kada stena dobija crve-



*Slika 428. Izdanak listvenita na Kopaoniku;
gore desno: detalj stene*

nu boju. Od neobičnih, egzotičnih minerala pomenimo i fuksit, liskun sa hromom (slika 429). U listvenitima se često javlja i mineralizacija sa živom, antimonom, ali i zlatom, koji su došli hidrotermalnim rastvorima na niskim temperaturama (epizona) iz okolnih mladih vulkanita ili intruziva.

U našoj zemlji ih ima na više mesta, praćeni su i mineralizacijom. Veće, značajnije pojave su na Kopaoniku i na Fruškoj gori.



Slika 429. Mikrosnimak listvenita, Kopaonik; N+, 50x

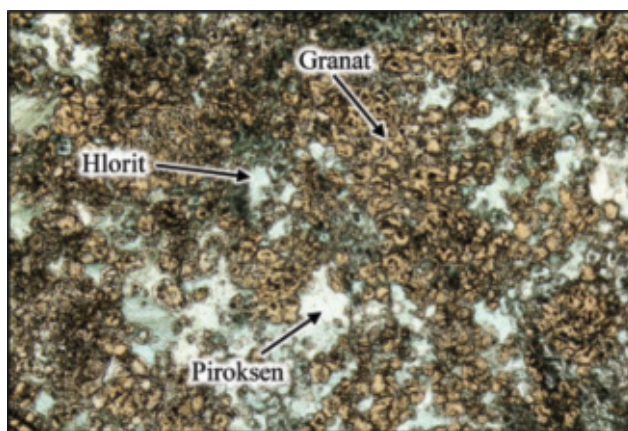
V.6.1.7 RODINGIT

Rodingit je kalcijum-silikatna stena koja nastaje metasomatskim procesima na kontaktu serpentiniziranih peridotita i gabrova, najverovatnije u „oceanskom” okruženju. Naziv rodingit potiče od nalazišta ovih stena na reci Roding, u okviru ofiolitskog pojasa planine Dun na Novom Zelandu. Stari naziv za rodingit je granatit (slika 430). Mineralni sastav peridotita „kontrolise” intenzitet, karakter i hemizam alteracionih procesa važnih za nastanak rodingita (slika 431). Ako peridotit sadrži više od 60 vol. % olivina, obično se raspadne i prelazi u serpentin i brucit. Ako peridotit ima više piroksena, onda prelazi u serpentin+talk+Ca itd. Peridotiti i serpentiniti imaju relativno jednostavan hemijski sastav i mogu se predstaviti sistemom **CaO-MgO-FeO-SiO₂**. Proces serpentinizacije i metasomatski procesi, tj. stvaranje rodingita, prema većini autora vezani su za „glavni” element Ca, koji se uglavnom dobija raspadaњem monokliničnog piroksena, koji je jedan od važnih minerala u ultrabazičnim stenama. Detaljna rasprava o metasomatizmu i formiranju rodingita iz „teorijske perspektive” je, rekao bih, apstraktna i van područja interesovanja većine čitalaca ove knjige. Zato ćemo se fokusirati na nastanak ovih stena sa „praktičnim” primerima.

Intenzitet i vrsta metasomatskih procesa zavise od sastava peridotita i fizičko-hemijskih karakteristika fluida i/ili zagreјane morske vode. Smatra se da su procesi infiltracionog tipa i rezultat cirkulacije fluida sa visokim pH vrednostima i



Slika 430. Dajk rodingita debljine oko 1 m u serpentinitu (ofiolitu), Novi Zeland



Slika 431. Rodingit, mikro snimak, N+, 40x

bogatim kalcijum-oksidiom (**CaO**) i hidroksidima (**OH⁻**), koji su nusproizvod procesa serpentinizacije, iz kojih nastaju i postaju rodingiti. U pojedinim udžbenicima i literaturi za pomenute procese sreće se i izraz „hidrotermalni procesi” jer su uzrokovani toplom vodom. Brzina obogaćenja **CaO** u procesu serpentinizacije pripisuje se reakciji razlaganja olivina i klinopiroksena. Za formiranje rodingita „odgovorni” su fluidi tipa **Ca-OH**, koji nisu kompatibilni sa **CO₂**, jer stvoreni minerali rodingita ukazuju na fluide koji su siromašni ovim oksidom. Serpentinizacijom, raspadanjem peridotita, stvara se „višak” **Ca(OH)₂** iz diopsida, koji odlazi preko fluida i reaguje sa mineralima gabra (ili bazaltnih stena), koji su bogati aluminijumom, pre svega bazičnim plagioklasima. Metasomatskim reakcijama stvara se nova stena rodingit, izgrađena od dominantnih **Ca**-alumosilikata: granata (hibšita), diopsida, prenita, volastonita, epidotske grupe, skapolita, tremolita, vezuvijana, hlorita, serpentinita, kalcita i drugih minerala. Klinopiroksen (diopsid) u rodingitima uglavnom je bogatiji **Ca** u poređenju sa istim mineralom u peridotitu. Od akcesornih minerala javljaju se magnetit i sfen. Reakcije ultrabazične stene i okolnih stena sa fluidom moraju biti istovremene i zahtevaju da protok bude duž kontakta. „Prepoznatljiv” hemizam rodingita je visok sadržaj kalcijuma i niska silicija (**SiO₂**). Proces koji dovode do formiranja rodingita, prema većini autora, vezuju se i za kasnu fazu hidratacije, kada se deo ultramafita „smestio” na okeansko dno ili tokom stvaranja ofiolita. Pojedini autori smatraju da su rodingiti metasomatski promenjene bazične stene pod uticajem rastvora sa visokim **pH** vrednostima i bogatim **Ca**, koji nisu produkt procesa serpentinizacije, već „nezavisni” hidrotermalni rastvori.

Proučavanja tečnih inkluzija u pojedinim rodingitima ukazuju na to da je „rodingitizacija” metasomatski proces ili, bolje reći, reč je o metasomatskim procesima koji se dešavaju na temperaturama 264–334 °C na 500 bara i 300–380 °C na 1 kbar.

Izotopska starost cirkona iz rodingita je u pojedinim područjima bliska bazaltima srednjeokeanskih grebena (**MORB**), što ukazuje na to da su „zajedno” stvarani. Pomenute stene se geohemijski značajno razlikuju. Rodingiti su, u odnosu na bazalte, obogaćeni **Sr** i osiromašeni velikim jonskim litofilnim elementima (**LIL**) kao što su **Cs**, **Rb**, **Ba** itd. Sadržaji elemenata iz grupe **HFS** (**Zr**, **Th**, **U**, **Nb**, **Ta**) slični su **MORB** bazaltima.

Rodingiti su sitnozrne, guste stene, bele, svetlozelene ili ružičaste boje, sa nepravilnim do školjkastim prelomom, ponekad i „masnim”, sličnom rožnacu ili kvarcitu. Strukture su srednje do sitno zrnaste, sa alotriomornim do hipidiomornim kristalima koji ponekad mogu biti veoma krupni, veći od nekoliko centimetara.

Rodingiti se javljaju kao žice, dajkovi, silovi, sočiva, retko grade manja tela duž oboda serpentinita, uglavnom na kontaktu sa gabrom. U ovoj kontaktnoj zoni često se, usled metasomatskih procesa, javljaju i „crni zidovi” (engl. *blackwall*). Ove stene javljaju se i na kontaktu sa dijabazima, pa čak i dioritima i granitima. Rodingiti su često članovi ofiolita, ofiolitskog melanža itd., gde se javljaju kao tela dužine i više stotina metara, obično u tektonskom kontaktu sa peridotitima ili gabrovima. U njima se uočavaju zone smicanja, tektonska kretanja, pukotine itd. One mogu biti i

glavni kanali za transport fluida između različitih stena, što omogućava metasomatozu, proces stvaranja rodingita. Na pojedinim mestima, peridotiti su samo lokalno serpentinisani, bez kalcita, ali su stvoreni granati sa malo diopsida i vezuvijana.

Intimne mešavine zelenih serpentinita i belih karbonatnih stena nazivaju se ofikalciti, od grčke reči *ophis* što znači „zmija”.

Primarni kontakti između peridotita (koji uglavnom potiču iz gornjeg omotača) i gabra ili bazalta, gde se javljaju (i gde su nastali) rodingiti, uglavnom nedostaju, verovatno zbog tektonskih procesa, kretanja, premeštanja tokom formiranja ofiolita ili ofiolitskog melanža.

Rodingiti se sreću i u akrecionoj prizmi, gde ima i metamorfnih procesa. Oni su, usled intenzivnih tektonskih procesa, „ekshumirani (izbačeni na površinu), i neki od njih su „doživeli i preživeli” subdukciju i metamorfizam visokog pritiska. Rodingiti su retke stene.

V.6.1.8 OFIOLITI

Ofioliti su asocijacije alohtonih (nisu na mestu stvaranja) stena koje nastaju u različitim tektonskim sredinama vezanim za tektoniku ploča: riftne zone, basene iza luka (engl. *back arc*), zone subdukcije, transformne rasede, tople tačke, plume itd. Naziv *ofiolit* dao je nemački geolog G. Štajnman 1905. godine (**Steinman, 1905**) za „trojni” skup stena: serpentinita, bazalta i rožnaca, koje je „prepoznao” u Alpima. U narednih nekoliko decenija, pomenuta asocijacija stena postaje poznata i kao „Štajnmanovo trojstvo”.

Ofioliti su tektonski „odvojeni” delovi okeanske kore i litosfere koji su „potisnuti”, „istisnuti”, „nabačeni” i obdukovani na kontinentalne i okeanske margine prilikom **zatvaranja okeanskog basena**. U „povoljnim” situacijama, delovi okeanskih ploča „beže od uništenja” u zonama subdukcije i tokom završnih faza zatvaranja okeana se navlače i obdukuju na kontinentalnu ili okeansku marginu da bi se formirao ofiolit. Pojedini istraživači smatraju da ofioliti nastaju i ekstenzionom tektonikom, tj. širenjem zadnjeg ili prednjeg dela luka, kada se stvara nova okeanska litosfera. Oni predstavljaju okeanske fragmente iz prednjeg (engl. *fore-arc*) ili zadnjeg (engl. *backarc*) dela luka. Nazivaju ih suprasubdukcionim ofiolitima (SSZ).

Ofiolit je po sastavu asocijacija stena okeanske litosfere, odnosno okeanske kore i tektonita, tj. peridotita koji vodi poreklo iz gornjeg omotača. Ova asocijacija stena je, zbog načina nastanka, **uvek u tektonskom odnosu sa okolnim stenama**.

U literaturi i pojedinim udžbenicima sreće i klasifikacija, bolje reći definicija u kojoj su ofioliti „samo” magmatski članovi okeanske litosfere, bez sedimenta okeanskog dna, dubokovodnih glina, karbonata, rožnaca itd. Ako se pomenute stene, tj. magmatski članovi i sedimenti javljaju zajedno, sreće se i izraz **ofiolitski melanž**.

Mnogo je diskusija i vremena „potrošeno” da se objasni kako su „rasparča-

ni” delovi guste okeanske litosfere (peridotiti, gabrovi, dijabazi, bazalti) tektonski smešteni, tj. „navučeni” i obdukovani preko „lakših” stena kontinentalne litosfere, ostrvskih lukova, u subdukcionim zonama itd. Jedan od odgovora (razloga) jeste jaka serpentinizacija (uticaj okeanske vode i/ili hidrotermalnih rastvora) stena ofiolita (okeanske litosfere), zbog čega su „smanjene” gustine olakšale proces smeštanja i navlačenja na okeansku ili kontinentalnu marginu. Zbog toga se naziv *ofiolit* odnosi na navedenu asocijaciju stena i ne bi ga trebalo koristiti kao genetski pojam, jer su to alohtone (tektonski izmeštene, pomerene) stene okeanske litosfere.

Kompletna ofiolitska sekvenca ima „stratigrafsku” sekvencu **okeanske litosfere** i uključuje sledeće vrste stena, „slojeva”:

Sloj 1: pelaški morski sedimentni, tanki glinci, silicijske stene (rožnaci) i krečnjaci;

Sloj 2A: *pillow* (jastučaste) lave;

Sloj 2B: serija subparalelnih dajkova dijabaza;

Sloj 3: kumulatni gabrovi i peridotiti i

Sloj 4: tektonizirani ultrabazni kompleks koji se sastoji od metamorfisanih harzburgita i dunita koji vode poreklo iz gornjeg omotača.

Potpuno navedena sekvenca na jednom mestu, lokalitetu, veoma je retko sačuvana, obično nedostaje jedan ili više „slojeva” (članova). Zbog tektonskih procesa, ova grupa asocijacije stena se tokom smeštaja u sadašnji položaj kretala, polomljena je, alterisana i metamorfisana. Intenzivnom tektonikom, pojedini litološki članovi ofiolita su transportovani (uglavnom duž raseda), pa ih na ispitivanom području nema ili se, ponekad, ponavljaju kada su veće debljine. Zbog raznovrsnosti tektonskih okruženja, debljina ofiolita značajno varira. Ponekad je teško, pa čak i nemoguće, „prepoznati” primarne stene ofiolita, gabra, dijabaz i bazalt, posebno kada su metamorfnim procesima tokom smeštaja „prešli” u eklogite, amfibolite itd.

Prosečna debljina „moderne” okeanske kore je oko 7 km, dok su ekvivalentne jedinice u ofiolitima manje, oko 3–5 km. Većina autora smatra da su ove razlike posledica tektonskog okruženja u kojem su ofioliti stvarani.

Seizmičke brzine u ofiolitima su niže od onih koje su merene u okeanskoj litosferi, a magnetna anomalija koja karakteriše okeansku koru nije pronađena u ofiolitima. Ove dve razlike mogu biti rezultat obimnih hidrotermalnih promena i vremenskih prilika koje utiču na većinu ofiolita. Proučavanja su pokazala da su u područjima sa bržim širenjem okeanskog rifta kompletnije ofiolitske sekvence nego u područjima sa sporim širenjem. Zbog navedene „bogate asocijacije stena, tektonskih i metamorfnih procesa itd.”, veliki broj istraživača, pre svega petrologa, koristi i pojedine inkompatibilne i kompatibilne mikroelemente kao petrogenetske pokazatelje za određivanje uslova nastanka i porekla članova (slojeva), kao i načina njihovog smeštaja.

Ofioliti se obično nalaze na ivici kontinenata ili grade planinske pojaseve, **ofiolitske komplekse** (*Coleman, 1971, 1977*). Oni često „markiraju” mnoge orogene i sutur zone, tj. pojaseve na našoj planeti na kojima su okeani „zatvarani”. Njihov položaj i prostorni raspored ukazuju i na fragmente okeanske litosfere koji su u određenom geološkom vremenu (na primer, mezozojska alpska orogeneza itd.) tektonski zahvaćeni i tu doneseni, pružajući ključne informacije u rekonstrukciji geoloških procesa koji su se dogodili uglavnom u okeanskom prostoru ili u područjima subdukcionih zona.

U literaturi se sreće izraz i **alpski orogeni pojasevi** (kompleksi). Oni su nastali tokom alpske orogeneze (počela u srednjem trijasu, traje i danas). To su asocijacije stena koje obeležavaju mesto sadašnjih ili nekadašnjih konvergentnih ivica, kontinentalnih margina (zone subdukcije). Uglavnom su omeđeni rasedima. Stene koje grade alpske orogene pojaseve su uglavnom daleko od mesta nastanka. Budući da je tektonika bila intenzivna, ovi kompleksi se obično javljaju kao ogromni blokovi (olistoliti) stena različitog sastava, okeanskih sedimenata (rožnaci, gline, karbonati) i fragmenata (komada) okeanske kore, litosfere: bazalta, kumulatnih bazičnih i ultrabazičnih stena, tektonita itd., koji su na „nesretan” način dospeli u međusobni tektonski kontakt.

Treba velikog geološkog znanja i umeća da se „vrata” u prvobitni položaj i da se rekonstruišu geološki procesi koji su ih doveli u sadašnji položaj. Pojedini autori smatraju da ove stene predstavljaju jednu vrstu alpskog melanža koji je sačuvan u orogenim pojasevima.

U našoj zemlji javljaju se dva ofiolitska kompleksa mezozojske starosti: Dinaridski ofiolitski pojas i ofiolitski pojas Vardarske zone, koji su slične starosti (Vardarska zona je nešto mlađa) i stvarani u sličnim tektonskim uslovima zatvaranja okeana Tetisa, koji je u to vreme postojao.

Na kraju recimo da proučavanja ofiolita omogućavaju i „rasvetljavanje” dubokih struktura okeanske kore i gornjeg omotača koje se još ne mogu „direktno” meriti. Ofioliti ne moraju predstavljati profile (preseke) „normalne okeanske kore”, pa čak ni omotača, već su „samo” fragmenti, ali su i dalje važni za rekonstrukciju geoloških procesa koji su se dogodili na proučavanom prostoru.

V.6.1.9 OFIOLITI ARHEANA („STARI” OFIOLITI)

Do 2001. godine nije bilo poznato da postoje stari, arheanski ofioliti, pa se smatralo da kora iz tog vremena nije sačuvana. Promena je nastala otkrićem kompletne ofiolitske sekvence stare 2,5 milijarde godina u severnom delu Kine. To su jako deformisani harburgitski tektoniti sa podiformnim hromitima, za koje se zna da nastaju u okeanskoj kori.

Vrlo mali broj kompletnih ofiolitskih sekvenci se „prepoznaje” u starim, arheanskim stenama koje grade zelene orogene pojaseve, koji obično sadrže dve ili više kompletnih ofiolitskih sekvenci (asocijacije stena). U to vreme, smatra se,

okeanska kora, tj. litosfera, bila je deblja nego danas, što je dovelo do akrecije (širenja) pretežno njenog gornjeg dela, izgrađenog od bazalta.

Ofioliti tipa **MORB**-a predloženi su kao mehanizam kontinentalnog rasta u brojnim arheanskim, proterozojskim i fanerozojskim orogenima. Ova svojstva su navela Maartena de Vita i dr. (*Maarten de Wit i dr., 1992*) da 1992. godine pretpostave, odnosno ukažu na to da su ofioliti tog „starog” vremena nastali u plićim uslovima i da su verovatno izgledali kao savremeni okeanski platoi.

Arheanski zeleni pojasevi sadrže ultramafite, mafite, uključujući i **pillow** lave i metamorfisane sedimente (parametamorfite). Pomenuta asocijacija stena, tektonika, stepen metamorfizma itd. ukazuju na to da je arheanska okeanska litosfera tokom subdukcije i kolizionih događaja učestvovala samo sa „gornjim delovima”, tj. debelom okeanskom korom. Stari ofiolitski kompleksi u severnoj Kini su najvećim delom sa metamorfisanim *pillow* lavama, dijabazima i gabrovima.

U našoj zemlji takođe ima „starih” ofiolita (izotopska starost 410 mil. godina, početak devona) na Deli Jovanu i Zaglavku, koji su izgrađeni od gabra, feldspat-peridotita i dijabaza. *Pillow* lave (za sada) nisu otkrivene. Njihova geneza i tektonski smeštaj u inače „složenoj” geološkoj građi Istočne Srbije nisu dovoljno jasni i zahtevaju obimna istraživanja velikog broja geologa različitih disciplina. Pozivam mlade kolege koje su željne novih znanja i saznanja o razvoju planete na našim prostorima da dođu i proučavaju ofiolite.

POJAVE RUDE U OFIOLITIMA

U ofiolitima se javljaju ležišta hromita (u peridotitima) i masivni sulfidi u bazaltima. Tela hromita u okviru ofiolita, usled duktilne deformacije unutar oмотача, imaju diskontinuiran oblik nalik na pod, zbog čega se nazivaju podiformnim naslagama hromita, kako bi se razlikovale od naslaga hromita povezanih sa slojevitim bazičnim intruzijama, koje se nazivaju naslagama stratiformnih hromita. Stratiformna ležišta hromita su mnogo veća od podiformnih ležišta i znatno su bogatija hromom (pomenimo ležišta u Kazahstanu, Turskoj, Indiji, južnoj Africi itd.). Sulfidi bakra se javljaju u *pillow* lavama. Prate ih pirit, svalerit, pirotin itd. Bila je velika misterija kako su one nastale sve do otkrića „crnih dimnjaka” na morskom dnu (*Corliss i dr., 1979*). Proces nastanka opisan je u poglavlju Tektonika ploča.

V.6.1.10 MELANŽ

Melanž (engl. *melange*) jeste „haotična” tektonska mešavina različitih vrsta blokova stena koje su vezane sedimentnim matriksom (grubozrnim vezivom). Naziv ove asocijacije stena potiče od francuske reči *mélange* („mešati”, „mešavina”). To su „raskomadani” ostaci stena okeanske litosfere, zbog čega i „liče” na ofiolite. Većina blokova stena je sočivasta i podseća na budene u duktilno deformisanom glinovitom matriksu.

Od blokova stena sreću se rožnaci, grauvake, metamorfisani ofioliti (serpentiniti, peridotiti, metagabrovi, metabazalti, amfiboliti), eklogiti i glaukofanski škripljci (detaljnije u poglavlju Metamorfne stene). Stene koje su „otpornije” na eroziju obično „vire” iz melanža. Pojedini autori smatraju da stene melanža mogu biti „unesene” subdukcionim procesima i u dublje delove omotača, gde se stapaju i vraćaju kao magme različitog sastava. U literaturi se za pomenutu asocijaciju stena sreće i izraz **ofiolitski melanž**, koji smo pomenuli u poglavlju o ofiolitima (slika 432). Neki melanži imaju dominantno sedimentno poreklo i nastali su padom ili klizanjem polukonsolidovanog ili konsolidovanog (očvrslog) sedimentnog materijala niz morsku padinu, kada se nazivaju olistostromima.



Slika 432. Ofiolitski melanž, put Nova Varoš – Prijepolje

U nekim udžbenicima sreće se i termin **tektonski melanž**. To je asocijacija različitih fragmenata, odlomaka i blokova stena koji leže u glinovitom matriksu, koji je obično jako deformisan i uškriljen. Formira se u zonama subdukcije, gde su blokovi i komadi stena pomešani sa stenama nastalim u prednjem delu luka. Raznoliki skup stena obuhvata: 1) promenjene (metamorfisane i alterisane) stene srednjeokeanskih grebena, bazalte okeanskih ostrva i okeanskih visoravni, 2) krečnjake, rožnace, glince i druge marinske sedimente i 3) komade i blokove eklogita, peridotita i blušista (plavih škripljaca) iz „uže” subdukcione zone.

Ove stene su jedno od obeležja konvergentnih margina (zona subdukcije). Često su veoma složene, haotične građe, sa nizom specifičnih struktura i kinematskih parametara, koji su često nerazumljivi za veliki broj istraživača koji proučavaju petrologiju i strukturni tektonski sklop subdukcionih zona, posebno u aktivnim kontinentalnim marginama. Pojedini geolozi, posebno oni koji „dugo” rade

na terenu, smatraju da je tektonski melanž previše deformisan da bi dao „korisne informacije” za rekonstrukciju tektonskog sklopa, pa ih „jednostavno” kartiraju kao melanž bez detaljnijeg kartiranja. Ostali, malo „uporniji”, izdvajaju matriks, blokove stena, traže fosile, minerale, posebno metamorfnih stena, na osnovu čega procenjuju izvor i prvobitnu prirodu primarnih stena. Istraživanja nekih melanža su postigla „napredak”, gde su se povezala neka strukturna svojstva sa kinematikom smera kretanja, što su faktori odgovorni za deformaciju na granicama ploča. Melanž može biti i jedinica navlake.

Jedno od „najtežih” pitanja u proučavanju melanža odnosi se na relativne uloge mekog sedimenta u odnosu na procese „poremećaja” i mešanja. Mnogi tektonski melanži se tumače kao deformirani olistostromi, dok drugi modeli pripisuju poremećaj isključivo tektonskim ili dijapirskim procesima.

Detaljne strukturne studije mogu razlikovati više modela kinematike smeštaja, pa i metamorfnih procesa. Analiza deformacija u tektonskom melanžu takođe daje informacije o kinematici i „interakciji” blokova, olistolita stena. Asimetrične strukture se generišu u ranim fazama procesa formiranja melanža i odnose se na pravce vektora klizanja, koji su korisni za rekonstrukciju kinematskih procesa.

V.6.2 ŽIČNE ULTRABAZIČNE STENE

V.6.2.1 PIROKSENITI I HORNBLENDITI

Pirokseniti i hornblenditi su retke stene. Javljaju se kao žice, debljine od nekoliko centimetara do najviše nekoliko metara, uglavnom u peridotitima. Zrnaste su strukture (slika 433).



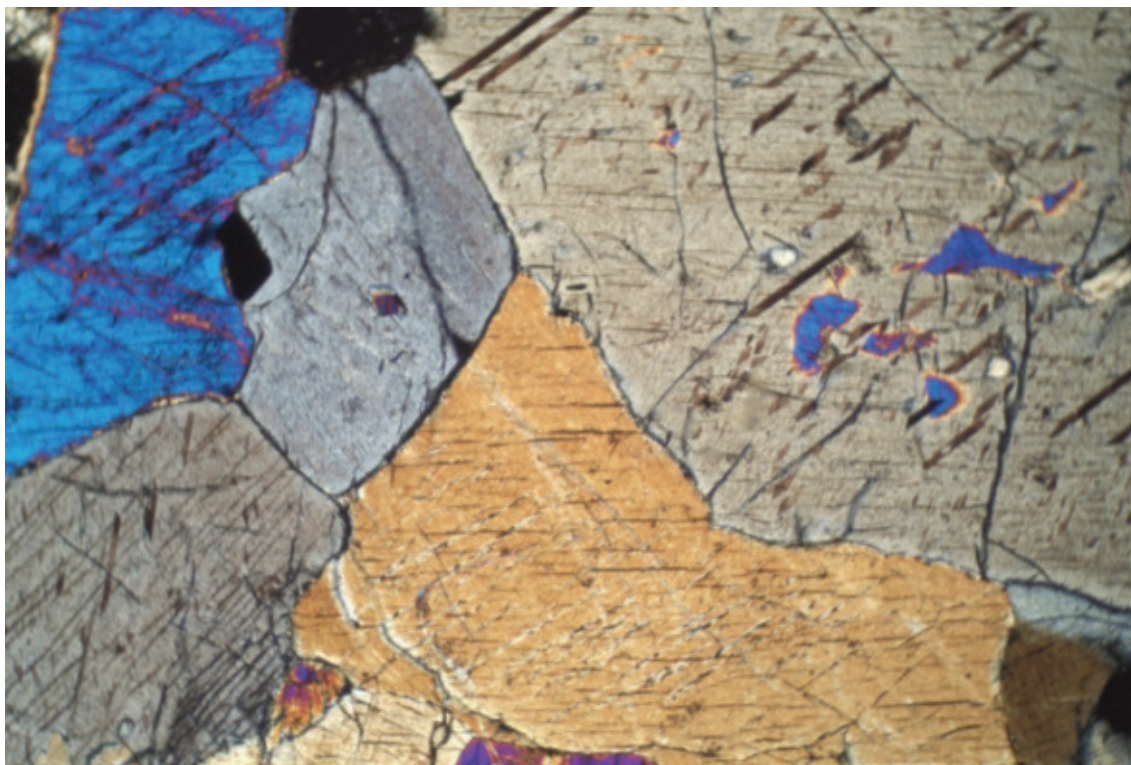
Slika 433. Žica piroksenita u peridotitu, Divčibare

Pirokseniti su krupnozrne stene, minerali se uglavnom vide i golim okom. Njihova veličina zrna varira od pegmatitske (ekstremno grube) do srednjezrne. Vrlo krupni kristali piroksena (i do 30 cm) javljaju se na Šar planini (Brezovica, lokalitet Šaldare). Vrlo krupnozrni pirokseniti često imaju spektakularne strukture eksolucije, gde se uočava izdvajanje dve grupe piroksena koji formiraju lamele neobičnih oblika.

Pirokseniti su praktično monomineralne stene. Uglavnom su izgrađeni od klinopiroksena, veoma retko i od rombičnih, ortopiroksena.

Na osnovu bitnih minerala koji ih izgrađuju pirokseniti se dele na:

1. **dijalagite**, izgrađene od **dijalaga**;
2. **bronzitite**, izgrađene od **bronzita**;
3. **vabsterite**, izgrađene od dijalaga i bronzita (slika 434) i
4. **hornblendite**, kao posebnu grupu stena, izgrađenu od **hornblende**.



Slika 434. Mikrosnimak vebsterita, Divčibare; N+, 40x

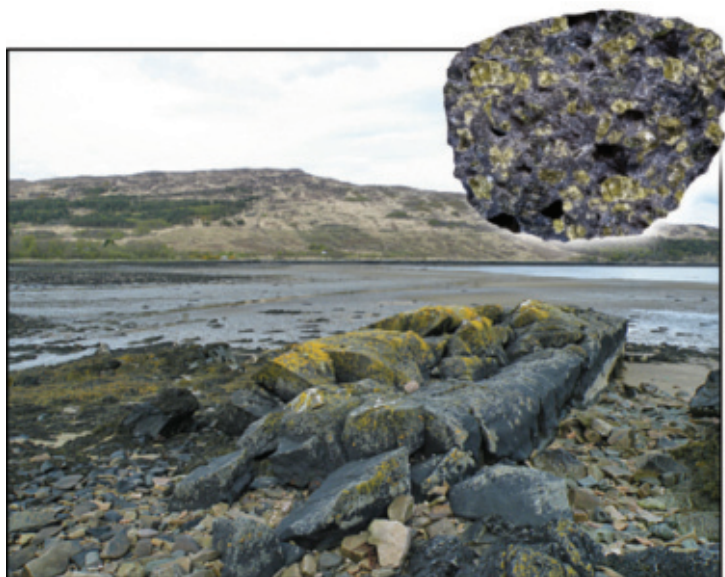
Sadržaj olivina, koji nije redovan sastojak, jeste mali, do 10%. Kao akcesorni minerali u piroksenitima javljaju se spinel, hromit i titanomagnetit.

Klino i ortopirokseni u ovim stenama su „redovno” alterisani, promenjeni.

V.6.3 VULKANSKE ULTRABAZIČNE STENE

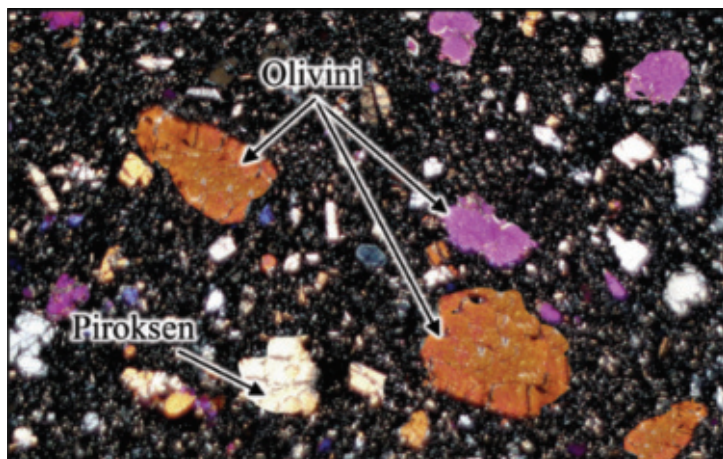
Vulkanske stene grupe peridotita vrlo su retke. Od matične stene se ne razlikuju po mineralnom sastavu, već samo po strukturi. Imaju **porfirsku** ili **porfiroidnu strukturu**. U ovu grupu stena spadaju **pikriti**, **pikritporfiriti**, **komatiti** i **kimberliti**. Osim izliva, često se javljaju i kao žice, debljine i do nekoliko desetina metara.

V.6.3.1 PIKRITI I PIKRITPORFIRITI



Slika 435. Dajk pikrita, Škotska; gore desno: uzorak stene

javljaju biotit, hornblenda i analcim. Smatra se da je olivin nastao uglavnom akumulacijom (frakcionom i gravitacionom diferencijacijom u bazaltnoj magmi. Ima dokaza da su pikritske lave bile visokomagnezijski rastopi (*Holm i dr., 1993*). Olivini u pikritima su forsteriti, obično alterisani, zamenjeni serpentinom i talkom, a pirokseni uralitom. Zbog dominantnog sadržaja olivina i piroksena, ove stene su tamne do crne boje i „teške”, imaju veliku gustinu. Često se javljaju, kako smo pomenuli, kao dajkovi, proboji, kada imaju porfiroidnu strukturu.



Slika 436. Mikrosnimak pikrita; N+, 50x

Pikriti i pikritporfiriti su izlivne i žične stene peridotitske grupe (slika 435), izgrađene od **olivina**, **monokliničnog piroksena** i retko, malo, **rombičnog piroksena** (slika 436). U pojedinim udžbenicima pikriti se svrstavaju u bazalte bogate Mg-olivinom, monokliničnim piroksenom (augitom), koji čini oko 20–50% volumena stene. Sadrže malo plagioklasa (ispod 5%), retko se

Zanimljivo je da se i neki alkalni bazalti svrstavaju u pikrite.

Pikriti se, za većinu bazalta, smatraju i za primarne (roditeljske) magme i nastaju „direktnim” i visokim stepenom parcijalnog stapanja (preko 20%) stena gornjeg omotača. Podsetimo se da se proces parcijalnog stapanja značajno menja sa prisustvom CO_2 i H_2O . U sličnim, istim uslovima nastaju i komatiti.

Istraživanja su pokazala da pikritske magme vrlo brzo (rano) frakcionišu još u omotaču, gde nastaju „nove” bazaltne magme, koje se javljaju u različitim geotektonskim sredinama, pre svega srednjeokeanskim grebenima, bazenima iza luka, unutar kontinentalnih riftova, kao tople tačke itd. Često se mešaju i sa magmama u plitko smeštenim magmatskim komorama dajući „druge” bazalte. Deo pikritskih magmi, zbog velike gustine, ostaje zarobljen unutar kore, litosfere. Pikriti i komatiti su sličnog mineralnog i hemijskog sastava, definisani sa, najčešće, $>20\%$ **MgO**. Po sadržaju alkalija se, međutim, razlikuju. Pikriti imaju 1–2% a komatiti $<1\%$ alkalija, pre svega kalijuma. Strukture su takođe različite. Komatiti imaju spinifeks strukturu (opisali smo je u poglavlju o strukturi i teksturi magmatskih stena) i uglavnom su vezani za stare stene, dok su pikriti porfirski i mnogo „mlađi”.

Klasifikacija **IUGS**-a je nastojala da napravi razliku između komatita i pikrita na osnovu čisto hemijskog sastava, kriterijuma (*Le Bas, 2000; Le Maitre, 2002*), ali su Ker i Arnd (*Kerr i Arndt, 2001*) osporili ovaj pristup i pokazali da predloženi kriterijumi nisu uvek pouzdani za klasifikaciju pomenutih stena. Stoga treba uzeti u obzir i njihovu strukturu kako bi se „sigurnije” razlikovale, odvojile.

V.6.3.2 KOMATITI

Mogućnost postojanja ultrabazičnih rastopa bila je tema mnogo rasprava između sredine 20-ih i kasnih 60-ih godina 20. veka. Većina petrologa tog vremena smatrala je akumulaciju mafičnih minerala iz bazaltnih rastopa za verodostojno objašnjenje magmatskih ultrabazičnih stena. Stav je korigovan istraživanjima koja su u dolini reke Komati (južna Afrika) utvrdila da postoje peridotitske lave sa sadržajem **MgO** ponekad preko 30%. Po ovom tipičnom lokalitetu dat je i naziv stene – komatit.

Komatiti su ultrabazične vulkanske stene koje sadrže više od 18% **MgO**. Izgrađeni su od fenokristala olivina, monokliničnog i rombičnog (retko) piroksena i vrlo malo plagioklasa (ispod 5%) koji leže u rekristalisanoj (devitifikovanoj) osnovnoj masi. Od akcesornih minerala sreće se i hromit. Sličnog su sastava kao i pikriti. Smatra se da komatiti nastaju visokim stepenom parcijalnog stapanja „visokotemperaturnog” gornjeg omotača, procenjuje se na temperaturi od 1600–1800 °C. Robin-Popije i dr. (*Robin-Popieul i dr., 2012*) predložili su još veće **P-T** uslove formiranja komatitske magme iz granat harzburgita i minimalno 50% parcijalnog stapanja.

Komatiti se generalno prihvataju kao vulkanske stene. Javljaju se kao tokovi lava, debljine preko 100 m, kao *pillow* lave, brečaste lave, hijaloklastične lave itd.,

ponekad mogu biti i manji intruzivi, silovi (*Beresford i Cas, 2001, Arndt i dr., 2004*; slika 437). Najistaknutija karakteristika tipičnih komatita je „univerzalno” poznata spinifeks struktura (aluzija na australijsku travu), po čemu se, važno je istaći, razlikuju od pikrita (čiju smo strukturu opisali). To su krupni, do nekoliko centimetara, pločasti ili nagriženi kristali olivina ili klinopiroksena (slika 292) koji leže u sitnozrnoj osnovnoj masi od izmenjenog stakla. Pomenuta svojstva ukazuju na brzu kristalizaciju iz rastopa. Prisustvo krupnih zrna (fenokristala) olivina, pre-



Slika 437. Sil komatita debljine oko 1 m u komatitskoj lavi; gore levo: uzorak stene, Ontario, Kanada

ko 5 centimetara, u vulkanskim stenama „krši” svaku petrološku „logiku” fizičko-hemijskih i termodinamičkih procesa i ukazuje na vrlo „neuobičajene” uslove kristalizacije nastanka ovih stena. Prema eksperimentalnim podacima, komatitske magme su uravnotežene sa ostatkom granat harzburgita i ukazuju na duboko poreklo (120–300 km) i velike stepene (> 50%) topljenja izvora (parcijalnog stapanja). Ove stene često su metamorfisane, pa je bilo ide-

ja da je ekstremno visok sadržaj **MgO** (18–30%) posledica metamorfnih procesa (*Milovanović i dr., 2001*). Komatiti su retke stene, uglavnom veoma stare, koje grade orogene pojaseve. Lave iz brojnih područja opisane su kao bazaltski komatiti ili komatitski bazalti, ali su tipični komatiti ograničeni na arhajske pojaseve u južnoj Africi, zapadnoj Australiji i istočnoj Kanadi. Oni spadaju među najstarije stene na Zemlji. Komatitske lave Barbertona su, na primer, probijene granitima čija je starost 3,2 do 3,4 milijarde godina. U mlađim formacijama komatiti su znatno retki. Među najmlađim predstavnicima ove grupe stena su bazaltni komatiti kredne ili tercijarne starosti u Kolumbiji, sa sadržajem **MgO** od 15–20%. Javljaju se u asocijaciji sa pikritima i bazaltima. Jedna od interesantnijih ideja o stvaranju komatita na Zemlji je da su ove stene nastale udarom meteorita, kada su spoljni delovi naše planete pretrpeli intenzivno stapanje, kao što se to verovatno dogodilo na Mesecu.

Mlađi primeri su poznati sa ostrva Gorgona na zapadnoj obali Kolumbije. Ove stene su takođe nađene i na sadašnjem okeanskom dnu (veoma retko).

Komatitske magme su, smatra se, bile izuzetno vruće, guste i ekstremno nisko viskozne, što im je olakšalo laki uspon kroz litosferu, a posebno manje gustu koru. Veruje se da je većina komatitskih lava bila suva, bez vode, tj. da volatili nisu imali ulogu u njihovom kretanju.

Pojedini istraživači koriste komatite kao dokaz da je arheanski omotač bio mnogo topliji nego danas. Grouv i Parman (**Grove i Parman, 2004**) ukazuju na relativno visok sadržaj silicijum-dioksida u nekim komatitima i pridruženim komatiitskim bazaltima. Uzimajući u obzir da komatiitski bazalti imaju sličan sadržaj SiO_2 kao i boniniti koji se nalaze u ostrvskim lukovima, Grouv i Parman (**Grove i Parman, 2004**) predložili su i uticaj subdukcije (voda, kontaminacija).

Komatiti su poznati nosioci masivnih nikl-bakar-PGE (elementi platinске grupe) sulfidnih ruda i čine oko 14% izvora za svetsku proizvodnju nikla (ležišta Kambalda, Zapadna Australija).

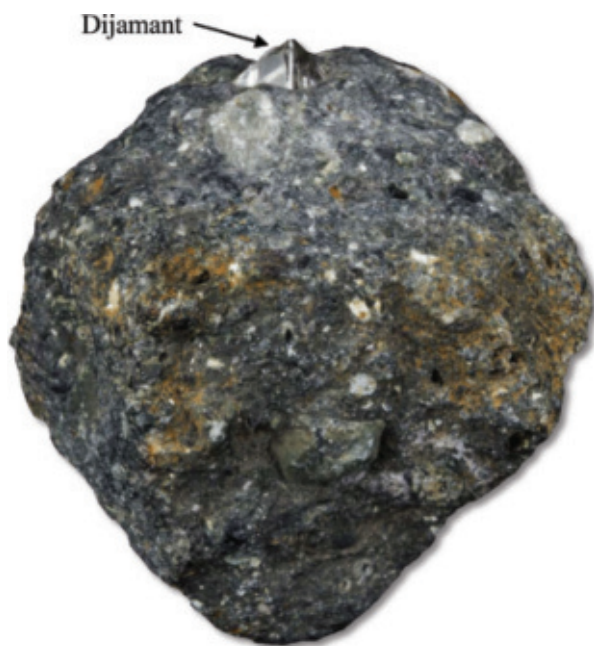
V.6.3.3 KIMBERLITI

Kimberliti su „fascinantne” ultrabazične vulkanske stene siromašne SiO_2 , bogate fluidima (CO_2 , H_2O), sa vrlo visokim sadržajem kompatibilnih (npr. **Ni**, **Cr**) i inkompatibilnih (**Ti**, **P**, **LREE**) mikroelemenata. Hemijski sastav kimberlita jako varira. Sadržaj SiO_2 se kreće od 20% do 50%, **MgO** od 14% do 40%, **CaO** od 2% do 14%, a K_2O do 0,5%, zavisno od količine i vrste ksenolita, odnosa kristala i matriksa i količine volatila.

Specifično svojstvo ovih stena je da imaju brečastu teksturu i da sadrže fragmente uklopljenih okolnih stena (ksenolite) i dijamante.

Dobili su naziv po gradu Kimberli (Kimberley) u Južnoafričkoj Republici, gde su prvi put otkriveni 1869. godine.

Petrografski, kimberliti imaju brečastu teksturu, koju čine krupni (od 1 cm do 10 cm, retko i više) uklopci, komadi okolnih stena (ksenoliti) ultrabazičnog sastava koji po sastavu odgovaraju dunitima, harcburgitima, spinel-lerzolitima, granatskim lerzolitima i eklogitima, kao i megakristali olivina, ilmenita, hromnog spinela, piropskog granata, hrom-diopsida i enstatita, flogopita, koesita itd., koji čine i do 50% mase stene (slika 438). Pomenuti ksenoliti i minerali leže u fino zrnastoj osnovnoj masi sastavljenoj uglavnom od olivina (druga, mlađa generacija), diopsidskog piroksena, monticelita, apatita, spinela, perovskita, ilmenita, karbonata (obično kalcita) i serpentina, što ukazuje na to da je kimberlitska magma bila bogata fluidima (uglavnom CO_2). Karbonati u kimberlitima su primarni minerali, a ne minerali supergenog (sekundarnog) nastanka. Kalcit se javlja kao mineral osnove, ponekad ima forme tipične za magmate (izdužena zrna) ili dendritske kvenč (quench; naglo hlađene) kristale. Način pojavljivanja kalcita, zajedno sa ostalim svojstvima, ukazuje na to da su se kimberliti naglo izdizali na površinu, zbog čega su manje frakcionisani od magmi koje su „normalno” izdvojene iz omotača. Kimberliti su često promenjeni i alterisani atmosferskim procesima, pa je ponekad teško utvrditi njihov primarni sastav. Većina ksenolita ima ovalni oblik i po sastavu odgovara granatskim lerzolitima, harcburgitima, eklogitima, ponekad granulitima, pa čak i gnajsevima, koji se ne smatraju primarnim materijalom omotača. Oni su



*Slika 438. Kimberit, Rusija;
veličina uzorka 10 cm*

doneti, zajedno sa nekim kristalima minerala, iz okolnih stena za vreme kretanja kimberlitske magme ka površini. Prema pomenutom hemijskom sastavu, a i termodinamičkim podacima, većina njih vodi poreklo iz dubljih delova gornjeg omotača, posebno ispod kontinenata, tj. ispod kontinentalne litosfere. Zbog toga se smatra da ove stene potiču iz znatno većih dubina u odnosu na većinu ostalih magmatskih stena. Izgleda da postoji opšta saglasnost da ksenoliti predstavljaju duboku litosfersku zonu koja je najmanje duboka do 200 km ispod kratonskih područja.

Neki kimberliti nose dijamante (njihovo prisustvo nije obavezno). Smatra se da nastaju na dubinama

između 150 km i 200 km iz magmi bogatih fluidima.

U kimberlitima je ponekad teško utvrditi primarne minerale iskristalisane iz matične magme od unetih ksenokristala, što otežava jednostavno definisanje, kada se koriste negenetski termini. Strogo petrološki, minerali za koje se pouzdano zna da su ksenokristali (uzeti sa strane) ne bi trebalo da budu uključeni u definiciju stene, jer nisu kristalisali iz matične magme.

Kimberliti su nastali uglavnom eksplozivnim vulkanizmom lave (magne) koja je iz dubljih delova gornjeg omotača duž raseda i pukotina vulkanskim kanalima došla na površinu Zemlje. Oni predstavljaju hibridne vulkanske stene, koje su mešavina materijala (stena) iz gornjeg omotača i magme bogate vodom, i sa različitim sastavom.

Najvećim delom javljaju se u drevnim (starim) kratonima (kontinentalnoj kori) i nisu uočeni u okeanskom prostoru ili u mladim subdukcionim pojasevima.

Pomenimo i drugačija mišljenja o genezi. Pojedini autori smatraju da kimberliti kristališu iz „kapljica” (pluma) neosiromašenog dela omotača ispod starih kratonskih jezgara. Pretpostavlja se da je mala količina flogopita i karbonata već bila u izvornom području i da su ovi minerali izdvojeni u prvoj fazi stvaranja parcijalnog stapanja. Međutim, neki autori osporavaju ovu mogućnost zbog teškoća pri izdvajanju tako male količine rastopa od čvrstog ostatka.

Postoje mišljenja da su kimberliti ultrabazične vulkanske stene koje sadrže najmanje 35% olivina, uz prisustvo drugih minerala: flogopita, karbonata, diopsida, serpentina itd. Leucit nije „dozvoljen” u kimberlitima.

Mičel (*Mitchell, 1995*) definisao je kimberlite kao ultrabazične stene boga-

te isparljivim gasovima (uglavnom ugljen-dioksidom) odnosno karbonatima, koji obično pokazuju karakterističnu „neuravnoteženu” porfirsku strukturu. Krupni kristali olivina, magnezijuskog ilmenita, hromtitanskog diopsida, piropa, flogopita, enstatita i hromita leže u sitnozrnoj (finozrnoj) osnovnoj masi izgrađenoj od olivina (druga, mlađa generacija), monticelita, flogopita, perovskita, spinela, apatita i serpentina. Mnogi kimberliti sadrže i poikilitске liskune (flogopit) koji su nastali u kasnoj fazi kristalizacije, a ponekad su bogati i barijumom. Pomenimo da su „rano” formirani olivin, flogopit, monticelit i apatit najčešće zamenjeni sa serpentinom i karbonatom.

Mičel (*Mitchell, 1986*) napisao je sjajnu knjigu o mineralogiji kimberlita, iz koje ćemo prikazati petrografiju ovih stena.

Kimberliti su kalijumske ultrabazične stene bogate volatilima. Javljaju se kao breče, vulkanske dijatreme, pajpovi, silovi i dajkovi. Kimberliti sa dijamantima nađeni su u područjima izgrađenim od kontinentalne kore starije od 2,4 milijarde godina, dok su kimberliti koji se javljaju u mlađim terenima obično bez dijamantata.

Kontaktни metamorfizam sa okolnim stenama je slabo razvijen jer su intruzije male, pa se veći oreoli ne očekuju.

Ove stene se najčešće javljaju duž reaktiviranih prekambrijskih rasednih zona. U zapadnoj Africi, Angoli i Namibiji kimberliti su intrudovani nakon otvaranja Južnoatlantskog okeana. Smeštaj kimberlita u istočnom delu severne Amerike verovatno je vezan za otvaranje severnog Atlantika, koji je reaktivirao staru frakturu. Kimberliti su često udruženi i sa bazaltnim magmatskim stenama. Kimberlitski „pipe” (cev, dajk, proboj) u Transvalu sadrži gabro, a u Namibiji dolerit. U Kvebeku je uočen postupan prelaz od kimberlita ka karbonatitima. U severnom Sibiru pikritске lave se smatraju ekstruzivnim ekvivalentom kimberlita koji se javljaju u istom području.

Za kimberlite je karakteristično više intruzivnih i vulkanskih „stilova” pojavljivanja, uključujući i neke ekstremno eksplozivne. Većina ovih stena je na površini piroklastičnog karaktera (eksplozivni vulkanizam) i one pokrivaju vertikalne vulkanske cevi sa oreolom, prstenovima tufa i srodnim stenama. Stvoreni krater i gornji deo vulkanske cevi blizu površine tokom vremena eroduju, kada nastaju jezera koja „sakrivaju” pomenute stene. Ispod kratera su „čuvane” dijatreme, koje se spuštaju do područja izvornog kimberlita. Neke od njih, prema rezultatima istraživanja, stvorene su na niskim temperaturama, što predstavlja veliku enigmu među geolozima. Proučavanja kimberlita ukazuju na to da dublji delovi vulkanskih kanala (dijatrema, koje će biti opisane kasnije) nisu bili eksplozivnog, piroklastičnog karaktera. Smatra se da je kimberlitska magma iz gornjeg omotača došla duž niza pukotina do plitkih nivoa, gde se mešala sa vodom i postala „izuzetno” eksplozivna. Kada fluidi (gasovi) dođu u pliće područje, naglo povećavaju zapreminu, ubrzavaju kretanje lave, dok ona ne „eksplodira” na površini.

Neke dijatreme mogu biti eksplozivnije od drugih. Ima i mišljenja da ulogu fluida „igra” i podzemna voda, koja se zagrevanjem širi i zajedno sa lavom eksplo-

dira kada se izlije. Bitna karakteristika nastanka ovih stena je eksplozivna vulkanska erupcija koja se razlikuje od „tipičnih”, klasičnih vulkana.

Kimberliti se javljaju samo na kontinentima. Njihovo postojanje ukazuje na sastav potkontinentalnog omotača (ispod astenosfere) na dubinama od najmanje 150 km, odnosno u uslovima na kojima je dijamant stabilan. Brzo kretanje lave usled prisustva fluida omogućava da se ovaj mineral „sačuva” jer bi pri sporom kretanju prešao u grafit. Temperatura i dubina na kojoj se kimberlitska magma izdvaja iz izvora u omotaču može se odrediti na osnovu termostabilnosti flogopita, dijamanta, koesita, piroksena, ultramafitskih ksenolita itd.

Struktura (i tekstura) ovih stena je neujednačena (varira, različita je) zbog ksenolita i makrokristala, koji uključuju i ksenokristale i fenokristale visokih pritiska. U literaturi se sreće nekoliko definicija, podela kimberlita. Pomenimo neke od njih. „Starije” su bile „široke” i uključivale široki spektar stena koje se nalaze, javljaju u dijatremama (eksplozivnim cevima), uključujući i prisustvo ksenolita „uzetih” iz omotača.

U ovu grupu su svrstavani lamprofiri, olivinski lamproiti, nefeliniti, meliliti itd.

Kimberliti su, prema sastavu i strukturi, podeljeni (*Smith i dr., 1985; Skinner, 1989*) na dve grupe stena:

Kimberliti grupe I su „klasična” dijamantska stena koja odgovara tipičnim stenama iz Kimberlea u južnoj Africi, koje su ranije nazivane bazaltni kimberliti (*Wagner, 1914*). To su ultrabazične vulkanske stene bogate fluidima (uglavnom CO₂) i kalijumom (zbog prisustva flogopita). Sadrže ksenokristale i ksenolite i imaju neujednačenu strukturu zbog prisustva okruglastih (anhedralnih) i fragmentiranih makrokristala (negenetski izraz za kristale prečnika od 0,5 mm do 10 mm), ponekad čak i megakristala prečnika do 20 cm, koji leže u sitnozrnoj (finozrnoj) osnovnoj masi.

Neki od ovih kristala su sigurno ksenokristali (verovatno odvojeni, razdvojeni iz ksenolita lertzolita, harcburgita, eklogita i metasomatski promenjenog peridotita), dok su drugi komagmatski, tj. fenokristali, koji su se formirali kao kumulati.

Olivin (bogat forsteritom) jeste dominantan i karakterističan mineral ove grupe kimberlita. Prate ga Cr-pirop, Cr-diopsid, flogopit, enstatit i magnetitski ilmenit i hromit. Smatra se da neki od njih potiču sa strane (uklopljeni prilikom kretanja magme kroz okolne stene – lertzolite, harcburgite, eklogite i metasomatski promenjene peridotite). Neki od pomenutih minerala nisu uvek prisutni u steni. Veliki broj kimberlita iz **grupe I** sadrži „kasni” Ba-bogati flogopit, koji pojedinačno uklapa prethodno pomenute minerale.

Dijamanti su retki i nisu redovni sastojci ovih stena. Na osnovu izotopske starosti dijamanta potvrđeno je da je ovaj mineral „stariji” od stene „domaćina” u kojoj se javlja, što ukazuje na to da je „uzet” iz okolnih stena omotača kroz koje je prošla kimberlitska magma.

Osnovna masa kimberlita **grupe I** je fino zrnasta, izgrađena od druge generacije olivina, a prate je monticelit, ilmenit, flogopit, perovskit, spinel (magnezijski

ulvospinel-**Mg**-hromit-ulvospinel-magnetit), apatit, karbonat i serpentin. Poslednja dva navedena su ujedno i najmlađa.

Mnogi kimberliti sadrže okruglaste agregate, globule od 1 mm do 10 mm, izgrađene od kalcita+serpentina, čiji nastanak nije dovoljno jasan (nemešljivost rastopa, kondenzacija fluida, kasnija zapunjavanja itd.).

Nikl-sulfidi i rutil su „uobičajeni” akcesorni minerali.

Alteracija, serpentinizacija olivina je česta, a od sekundarnih minerala sreće se i kalcit. Evoluirani, diferencirani članovi **grupe I** mogu biti siromašni ili bez pomenutih makrokristala. Izgrađeni su od „druge” generacije olivina, kalcita, serpentina i magnetita, zajedno sa malo flogopita, apatita i perovskita.

Kimberliti grupe II nazivaju se i **liskunski kimberliti** i po sastavu odgovaraju ultraalkalnim, peralkalnim stenama bogatim vodom, tj. lamprofirskim kimberlitima (*Wagner, 1914*). Ova grupa stena je „trenutno” ograničena na južnu Afriku, gde su, zanimljivo i važno, starije u odnosu na kimberlite grupe I u istom području.

Izgrađeni su od flogopita (dve generacije) i olivina, diopsida, perovskita bogatog **Sr** i **REE**, apatita bogatog **Sr**, monacita bogatog **REE**, kalijum-barijum titanata, rutila sa **Nb** i ilmenita sa **Mn**. Imaju negativnu anomaliju **Nb** i više radiogenog **Sr**.

Pomenuti minerali javljaju se i u sitnozrnoj osnovnoj masi, koja sadrži i kalcit, dolomit, ankerit i druge karbonate retkih zemalja, sorit, norsetit i serpentin. „Evoluirani” članovi grupe sadrže sanidin i kalijum-rihterit. Cirkon-silikati (vadeit, cirkon, kimzeitski granat, **Ca-Zr**-silikat) mogu se pojaviti kao minerali u kasnim fazama. Ponekad mogu sadržati i sanidin, rihterit, pa čak i kvarc.

Barit je uobičajeni sekundarni mineral. Mičel (*Mitchell, 1986, 1994, 1995*) predložio je da ove stene ne treba nazivati kimberlit, već **oranžerit**, u znak priznanja posebnog sastava i jedinstvene pojave u Slobodnoj Državi Oranje (engl. *Orange Free State*) u južnoj Africi. I u ovim stenama se javlja dijamant (retko).

Imajmo na umu da su ove stene po sastavu bliske, slične lamproitima, bliže nego „klasičnim” kimberlitima **grupe I**. Ali, ove stene se značajno razlikuju i od lamproita (*Mitchell, 1994, 1995*). Na kraju recimo da su kimberliti **grupe I** mnogo češći, više rasprostranjeni od kimberlita **grupe II**.

Pomenimo i geohemijska svojstva obe grupe kimberlita. Većina minerala ima visoke sadržaje pojedinih mikroelemenata. Najveći deo je, smatra se, zbog prisustva liskuna (flogopita), granata, apatita i karbonata. Ima mišljenja da je obogaćenje **LREE** i zbog uticaja subdukcionih procesa. Diferencijacija pomenutih stena utvrđena na osnovu sadržaja **HREE** ukazuje na to da je granat bio rezidualna faza u njihovim izvornim regionima (što ukazuje na to da se stvaraju u području omotača sa granatskim lerzolitom).

Sadržaji mikroelemenata, kada se normalizuju na hondrite, opadaju sa desna nalevo. Pikovi mogu odražavati „nestandardne” izvore omotača ili preostalu fazu, ostatak rastopa. I kimberliti i oranžeriti imaju negativne anomalije **K**, **Rb** i **Sr**, koje su „kompatibilne” sa „zaostalim” flogopitom u izvoru. **Sr** može biti uzrokovan

rezidualnim fosfatom ili ranijim uklanjanjem klinopiroksena. Flogopit lamproiti imaju drugačiji obrazac, s naglašenim negativnim anomalijama za **Ta** i **Nb** (svojstva subdukcione zone, procesa). Slično je i sa **U-Th**. Ova hemijska svojstva ukazuju na to da kimberliti i oranžeriti imaju drugačiji izvor omotača nego lamproiti. Izotopski podaci pružaju jake „dokaze” za različite izvore kimberlita (**grupe I**) i oranžerite (**grupe II**), posebno sadržaje izotopa **Sr** i **Nd**, kao i **Pb**. U literaturi dominiraju zaključci da su arheanski kimberliti izvedeni iz astenosfere, oranžeriti potiču iz obogaćene „kratonske” litosfere, a lamproiti iz kontinentalne litosfere koja je modifikovana subdukcionim procesima.

Pomenimo da se u udžbenicima sreću i druge podele kimberlita (**Dawson, 1987**). Oni se dele na dva petrografska tipa kimberlita: kimberliti sa flogopitom i kimberliti bez flogopita. Kimberliti sa flogopitom u matriksu (osnovnoj masi) imaju značajnu količinu kalcita i diopsida. I još jedna klasifikacija ovih stena ih na osnovu načina pojavljivanja deli na tri tipa kimberlita, to su:

- **masivni kimberliti**, koji su intrudovani dajkovi ili grade pajpove;
- **intruzivne kimberlitske breče**, izgrađene od fragmenata minerala i stena koji leže u kimberlitskom matriksu; najčešće se javljaju u pajpovima, i
- **kimberlitski tufovi i tufobreče** (pod tufovima i brečama podrazumeva se sitno drobljen kimberlitski materijal), izgrađene od fragmenata minerala i stena koji su cementovani sekundarnim mineralima; uočeni su samo u pajpovima.

DIJAMANT

Evo i „kratke” priče o dijamantu. Ovaj „lepi” (i veoma skupi) mineral se uglavnom javlja u kimberlitima, oranžeritima i nekim lamproitima (slika 439). Poznate su pojave dijamanta i u alkalnim bazaltima, lamprofirima, alpskim peridotitima, pa čak i u nekim korenskim (kontinentalnim) stenama metamorfoisanim na ultravisokom pritisku. Prosečan prinos iz produktivnih dijatrema je oko 25–50 karata na 100 tona stene, ali njihova estetska vrednost povećava ekonomski značaj. Verovatno se zbog njihovog uobičajenog pojavljivanja euhedranog, idiomorfog oblika, oktaedra, u početku verovalo da su to fenokristali, primarni minerali. Izotopske analize **Sr-Nd** i **U-Pb** inkluzija u dijamantu su pokazale da je ovaj mineral stariji od „domaćina”, što ukazuje na to da su dijamanti došli iz „originalne” (primarne)



Slika 439. Dijamant u kimberlitu

stene, kao što su granat harcburgiti, eklogiti itd. Ovi drugi (eklogiti) mogu biti metamorfisani bazalti podvrgnuti tektonskom transportu subdukcijom i drugim procesima, „zarobljeni” na granici litosfere i astenosfere. Sličnost dijamana sa istim mineralom otkrivenim u meteoritima ukazuje na to da je ugljenik primordijalan (primaran), dok u eklogitima ima „morskog” ugljenika, što ukazuje na uticaj subdukcije.

Kosmo-hemijski podaci ukazuju na to da gornji omotač može sadržati 1000–3700 ppm ugljenika (*Pearson i dr., 2007*), koji se „raznosi” tokom transporta kimberlitske magme ka površini, uz „pomoć” fluida. Euhedralni (idiomorfni) oblik dijamana možemo pripisati velikoj tvrdoći ovog minerala i otpornosti na eroziju, mada ga spori uspon magme u kojoj se nalazi može resorbovati u rastop ili prevesti u grafit.

Podsetimo da je kriva stabilnosti dijamant–grafit na oko 140 km, što ukazuje na minimalnu dubinu stvaranja. Pojedini autori, na osnovu načina pojavljivanja, potvrđuju da su dijamaniti genetski vezani za okolne ultramafite sa granatom.

NASTANAK KIMBERLITA

Hemijski sastav ukazuje na to da su kimberlitske magme nastale pri veoma malom stepenu parcijalnog stapanja peridotita pod visokim pritiskom.

Prema eksperimentalnim podacima, flogopit je stabilan na pritiscima do 50 kbara i temperaturama iznad 900 °C. Na višim P-T uslovima on prelazi u granat koji sadrži kalijum.

Dijamant je stabilna forma ugljenika na pritiscima iznad 45 kbara i temperaturama od 1000–1200 °C. Inverziona kriva grafit–dijamant pokazuje da je za stvaranje dijamanta neophodna dubina od oko 135 km, pa se smatra da kimberliti koji nose dijamante moraju biti stvoreni ispod ove dubine.

Eksperimentalna petrologija je pokazala da je sadržaj Al_2O_3 u čvrstom rastvoru u ortopiroksenima, koji je prisutan u granatskim lerzolitima, dobar geobarometar. On zavisi od uslova stvaranja, pre svega pritiska, što je potvrđeno i eksperimentalno (*MacGregor, 1974*). Na taj način, na osnovu sadržaja aluminija, može se izračunati i dubina na kojoj je kristalisao, nastao u dubljim delovima gornjeg omotača.

Sadržaj CaO u piroksenima takođe je dobar geotermometar. Temperatura nastanka ksenolita pre „ulaska” u kimberlite može se izračunati na osnovu sadržaja CaO u klinopiroksenima koji koegzistiraju sa ortopiroksenom. Na osnovu toga se može izračunati i temperatura kristalizacije pomenutih minerala, tj. magme. Uopšteno, primena piroksenskih termobarometara na ksenolite kimberlita ukazuje na to da većina kimberlitskih ksenolita dolazi sa dubine od oko 200 km, mada ima podataka da mogu biti i dublji. Pomenimo da su eksperimentalna proučavanja na stapanju peridotita koji „nose” (sadrže) CO_2 značajno „suzila” ograničenja na poreklo kimberlitske magme. Parcijalnim stapanjem peridotita uz prisustvo CO_2 nastaju magme različitog sastava, od karbonatita, nefelinita, melilitita do kimberlita. Stapanje sistema K_2O i H_2O dalo je uslove stabilnosti flogopita i amfibola u

litosferi, kalijskoj metasomatozi i poreklu pojedinih kalijjskih magmi. Gudfinson i Presnal (*Gudfinnsson i Presnall, 2005*) predstavili su studiju o sistemu **CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-CO₂** u opsegu pritiska 3–8 GPa.

Eksperimenti na sistemu lerzolit-**C-OH** pokazuju da malim stepenom parcijalnog stapanja granat lerzolita koji sadrže flogopit ili rihterit, magnezit ili dolomit mogu „proizvesti” kimberlitske magme na dubinama od 100 km do 300 km, na temperaturama od 1000 °C do 1300 °C (*Wendlandt i Eggler, 1980; Wyllie i dr., 1990* – preuzeto iz *An introduction to igneous and metamorphic petrology*, J. Winter, second edition, 2010). Visoke sadržaje **REE, P, Sr, Th, U, Zr i Ta** teško je „postići” bez „dodavanja” apatita ili titanita, koji su bogati izvorom **REE**. Stoga pojedini istraživači smatraju da postoji i neki oblik metasomatskog obogaćivanja „primordijalnih” (primarnih, nepromenjenih) peridotita omotača koji je „neophodan prekursor” za stvaranje kimberlit-oranžeritnih magmi. „Uvođenje” **CO₂** i **H₂O** smanjuje temperaturu solidusa i nastaju složeni procesi stvaranja, kretanja magme, promene sastava, uslova kristalizacije, što definiše i način njihovog smeštaja i izlivanja.

Pirokseni su takođe pogodni za određivanje nastanka kimberlita jer se na osnovu njihovog hemijskog sastava, sadržaja kalcijuma u klinopiroksenu i sadržaja aluminijuma u enstatitu, može izračunati temperatura i pritisak na kojima su ovi minerali kristalisali. Dobijene vrednosti slažu se sa prethodno pomenutim rezultatima.

Uslovi nastanka kimberlita dobijeni na osnovu asocijacije minerala u ksenolitima i nodulama, međutim, daju niže vrednosti, tj. manju dubinu stvaranja, zbog čega postoji značajno neslaganje o uslovima nastanka kimberlita (*Mitchell, 1986*).

Sačuvana stabilna forma ugljenika (dijamant), kao i delimično stopljeni peridotitski ksenoliti i ultramafitske nodule, dokaz su brzog kretanja kimberlitske magme ka površini. U toku kretanja ka površini, na oko 60 km dubine (što odgovara pritisku od 20 kbara) karbonat počinje da disocira oslobađajući **CO₂**. Sa dizanjem magme nastavlja se izdvajanje **CO₂**, prouzrokujući eksplozivnost erupcija u plićim nivoima. Sličnost kimberlita širom sveta ukazuje na to da su izvorne stene verovatno flogopit-granatski lerzoliti sa „malim” dodatkom **Ti, K i Ba**. Pojedini istraživači smatraju da kimberlitske magme nastaju znatno dublje, na granici spoljašnjeg jezgra i donjeg omotača.

Sveprisutni, pretežno olivinski megakristali u kimberlitima pokazuju razlike u sastavu i veličini, čak i unutar istih kimberlita. Strukture ovih stena ukazuju na to da su pomenuti minerali (olivin, piroksen itd.) kumulatni kao fenokristali, dok su ostali (istog sastava) ksenokristali, uklopljeni sa strane. Nedostatak ortopiroksenskih makrokristala ukazuje na to da ovaj mineral potiče iz granatskih dunita (uključujući i pojave sa dijamantima).

Brzina uzgona, kretanja magme ka površini procenjena je na osnovu dekompresije rastvaranja granata i difuzije argona u flogopitu (kombinovano sa **Ar** datiranjem, *Wartho i Kelley, 2003*). Put od dubine od 400 km prema dobijenim rezul-

tatima je 0,9–6,9 dana za južnoafričke kimberlite i 2–15 sati za sibijske kimberlite (preuzeto iz *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*, second edition, John D. Winter, 2010).

„Najbolji” geohemijski modeli za oranžerite predlažu osiromašeni izvor harzburgita koji je obogaćen astenosferskim rastopima (magmom) sa **K**, **Pb**, **Rb**, **Ba**, **LREE**, **SiO₂** i **H₂O**. Nedostatak ortopiroksenskih ksenokristala ukazuje na to da je izvor bio dunitskog sastava, tj. obogaćen flogopitom, K-rihteritom, apatitom i karbonatom.

Proučavanja ksenolita i dijamanta pokazuju da oranžeriti nastaju u blizini litosfere u polju dijamantske stabilnosti na dubinama od 150 km do 200 km.

Lamproiti takođe mogu nastati u sličnim uslovima, ali sa obogaćenim izvorom u kojem su **K-Ti** rihterit, diopsid i **K-Ba** titaniti, koji mogu biti rezultat subdukcionih procesa.

Lamproiti se uglavnom javljaju u starim orogenim pojasevima, gde su visoki odnosi **LIL/HFS** mikroelemenata. Neki od njih mogu biti i na ivici kratona. Dijamantske inkluzije su uglavnom eklogitske (ostatak subdukovane ploče). Mičel (*Mitchell, 1995*) „pomenuo” je da čak i neki retki alkalni bazalti i meliliti to čine. Pomenimo da se najveći deo rastopljene mase kreće dovoljno sporo da „uništi” dijamante. Nefeliniti i većina drugih alkalnih magmi „zahtevaju” veće stepene parcijalnog stapanja na manjim dubinama nego kimberliti, oranžeriti i lamproiti.

NAČIN POJAVLJIVANJA

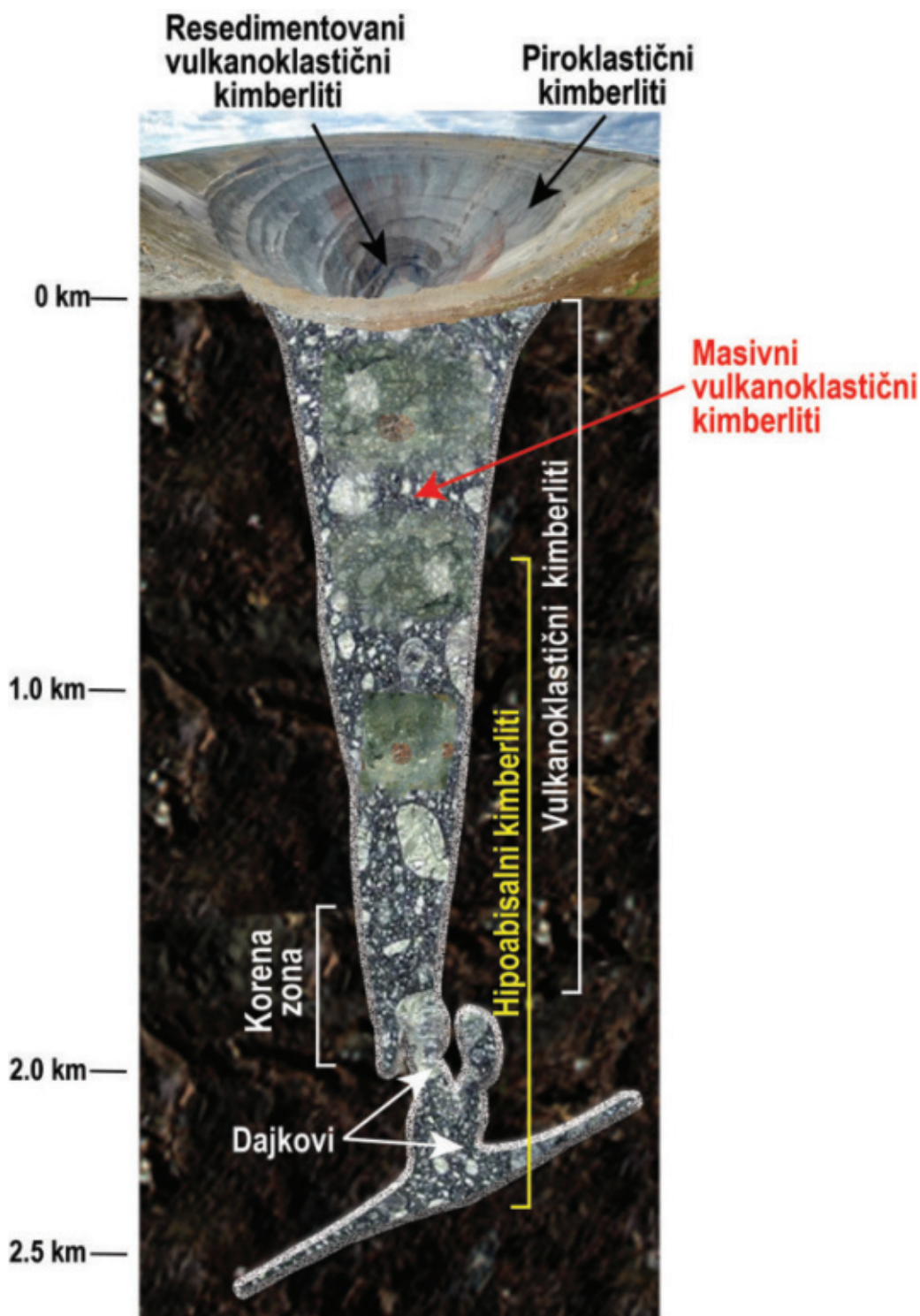
Kimberliti i oranžeriti su najvećim delom nastali su u drevnim, starim kratonima. Smatra se da je u to vreme (arhean) bio visok pritok toplote i „obilna” proizvodnja komatita.

Kimberliti i oranžeriti obično se javljaju u „grozdovima” u većim provincijama, gde se, poput karbonatita, javljaju u „ponavljanim” ciklusima.

Kimberliti i oranžeriti nisu vezani za ekstenzije, širenje ploča, transformne rasede ili zone subdukcije. To su hipoabisalne intruzije, dajkovi, silovi, dijatrema sa kraterom i piroklastičnim prstenom. Njihova „dostupnost” (vidljivost) uglavnom zavisi od dubine i stepena erozije.

Kimberliti se javljaju kao dijatrema, retko kao male intruzije, dajkovi, silovi itd. (slika 440).

Dijatrema ima oblik šargarepe, dužine preko nekoliko kilometara, sa kružnim presekom i vertikalnim do subvetrikalnim stranama. Sa dubinom se sužava i završava u „zoni korena”, području intruzije nepravilnog oblika, kada kimberliti prelaze u hipoabisalne kimberlite i oranžerite. Nastanak dijatrema još uvek je predmet rasprave. Smatra se da su područja ekspanzije (širenja) fluida (gasova) oslobođenih u završnoj fazi izlivanja. U modelu Klementa (*Clement, 1984*), magma oslobađa **CO₂** zbog smanjenog pritiska, „razbijajući” okolne stene i stvarajući breče prilikom formiranja dijatrema. Pojedini autori smatraju da u stvaranju dijatrema učestvuje i podzemna voda. Ona se zagreva, povećava zapreminu i stvara



Slika 440. Dijatrema

eksplozivnu erupciju. U dubljim delovima stvaraju se breče, koje dostižu dubinu od nekoliko kilometara ispod površine, stvarajući karakterističnu faciju dijatrema koja prolazi kroz hipoabisalnu faciju, tj. područje površinskog dela, plitko smeštene intruzije.

Dijatrema facija blizu površine su „fragmentiranije” (više brečizirane) od hipobisalnih ekvivalenata i poprimaju vulkanoklastični izgled. Breče koje sadrže obilne inkluzije okolnih stena veličine su od nekoliko centimetara do mikroskopske. Česti su i megakristali. Kimberliti su retko sačuvani na površini. Dominiraju prstenovi od tufa, koji su loše sortirani, i breče (vulkanske), koje se često smenjuju s njima.

Dijatrema može biti površine od nekoliko stotina kvadratnih metara do nekoliko kilometara. Neke od njih su delimično iskopane, i otkrivaju da se sužavaju ka dole (dubini) i prelaze u dajk ili seriju dajkova. Područje dijatrema odnosi se na površinski deo kimberlita.

Dajkovi su obično debljine od 1 m do 3 m. Javljaju se pojedinačno ili u rojevima, zbog višestrukog utiskivanja, kada imaju tendenciju bifurkacije (nepravilnog račvanja). Obično su u blizini korena dijatrema. Najčešće su uski, ponekad i „prošireni”. Ne sadrže izbačeni materijal ili fragmente, koji se najčešće nalaze u dijatremi. Većina dajkova je tanja blizu površine, a deblja idući ka dubini.

Silovi su retki, verovatno i zbog sadašnjeg nivoa erozije. Međutim, poznato je da se javljaju u južnoj Africi, Zimbabveu, Tanzaniji i Grenlandu.

Istraživanja ovih stena su pokazala da se ove magme „uzdižu” „nadzvučnom” brzinom (veoma, veoma brzo) iz velikih dubina u omotaču, razbijajući okolne stene u omotaču i kori na putu ka površini.

Postojala je (i još uvek postoji) značajna debata o tome na koji način i koliko brzo se kretala magma i kako su formirani kanali duž kojih se kretala i izlivala na površinu. Ključni momenat je da su ove „brze” erupcije uzrokovane prisustvom fluida, za koje se smatra da su i atmosferskog porekla, što je imalo značajan uticaj na stvaranje dijatrema. Različite hipoteze mogu se grupisati u dve grupe: magmat-ski procesi i freatomagmat-sko poreklo kimberlitnih cevi.

Magmatska ideja sugerše da su fluidi primarni i „pokretački”, dok freatomagmatska ideja sugerše da su podzemne vode došle u kontakt sa kimberlitskom magmom u završnoj fazi izlivanja.

Vilson i Hed (*Wilson i Head, 2007*) predložili su da se kimberlitska magma uzdigla kao dajk, sa gasom (CO_2) koji se izdvaja na vrhu dajka. Na izlasku lave na površinu CO_2 odlazi, naglo i u velikim količinama, povećavajući zapreminu mnogo puta i uzrokujući eksplozivnu erupciju, urušavanje i fragmentiranje stena, pri čemu se formiraju pomenuti morfološki oblici, pre svega, dijatrema. Ceo proces, smatra se, može trajati manje od sat vremena.