

Dr Branislav Glavatović, van. prof.



OSNOVI GEONAUKE

2005. god.

PREDGOVOR

Primarnii cilj kursa **OSNOVI GEONAUKA** je upoznavanje studenata Geodetskog Smjera Građevinskog fakulteta sa osnovnim sadržajem, principima i metodama proučavanja svih tzv. geo-naučnih disciplina, odnosno nauka koje za objekat proučavanja imaju planetu Zemlju u cjelini, njene djelove ili njena fizička polja.

Kursom su, uglavnom na informativnom nivou, obuhvaćeni: osnovni pojmovi, principi i saznanja iz domena savremene kosmologije, dominantne hipoteze kosmogonije, sunčev sistem, zatim osnovni pojmovi i podaci o planeti Zemljiji: atmosfera i njena struktura, unutrašnja građa Zemlje, osnovni fizički parametri Zemlje kao planete, njeno gravitaciono i geomagnetsko polje (osnovne postavke, definicije, osobine, mjerjenje i interpretacija), gravitacioni uticaj i efekti Sunca i Mjeseca na Zemlju, rotacija Zemlje i plime. Ukratko su prikazani principi većine geo-naučnih disciplina, kao što su: geodezija, opšta i primjenjena geofizika, posebno njenih oblasti gravimetrije, geomagnetizma i seismologije, zatim geologija i naučne oblasti koje proističu iz nje: vulkanologija, geodinamika, geotektonika, geomorfologija, geohronologija, geohemija, geotermija i pedologija. Meteorologija je prikazana u okviru odjeljka o atmosferi, a okeanografija i hidrologija u odeljku o hidrosferi. Aeronomija, geostatistika i ekologija su diskutovane samo pojmovno. Sažeto je prikazana i istorijografija geodezije, kao i principi savremene geodezije, značajni geodetski datumi (epohe) te najzad, geodetske discipline i geodetske metode.

Eruptivan opšti tehnološki napredak tokom posljednjih nekoliko desetina godina i veoma buran i plodan razvoj brojnih naučnih geo-disciplina i prirodnih nauka uopšte, omogućili su postizanje zavidnih saznanja o Zemlji, njenom nastanku i razvoju kao planete, strukturi njene unutrašnjosti, magnetosferi, atmosferi, hidrosferi, porijeklu i razvoju organskog života na njoj, kao i njihovoj međusobnoj interakciji. Imajući u vidu da ta saznanja čine veliki dio prirodnih nauka uopšte, u ovom kursu bićemo u poziciji da se zbog toga samo ukratko, jezgrovito, osvrnemo na elementarna saznanja većine tih brojnih naučnih disciplina i pokušamo da informativno, ali dovoljno razumljivo, opišemo domen njihovog proučavanja. Koliko to bude moguće, obim i stepen detaljnosti izlaganju u ovom kursu, koji će biti posvećeni pojedinim naučnim oblastima i saznanjima, u najvećoj mjeri će biti proporcionalni njihovoj korelabilnosti sa opštom geodezijom i geodetskom geofizikom, kao ishodištima ovog kursa.

S obzirom da je kurs Osnovi geonauka namijenjen studentima prvog semestra Geodetskog odsjeka Građevinskog fakulteta, a imajući u vidu različitost nivoa prethodnog obrazovanja (posebno matematike i fizike) u srednjim školama iz kojih se upisuju studenti na ovaj fakultet, ali i kako ovaj kurs treba da tim studentima pruži samo opšti uvod u domen geonauka, u ovom udžbeniku su matematičke analitičke definicije redukovane na najmanju mjeru, a elementi integralnog i diferencijalnog računa uopšte nijesu korišćeni, iz istih razloga.

1. UVOD

Buran tehnološki razvoj ostvaren tokom šezdesetih godina XX vijeka, koji je omogućio spoznaju obilja novih naučnih činjenica o Zemlji i Kosmosu, stimulisao je revolucionaran razvoj nauka o Zemlji i istovremeno značajno izmijenio brojne temeljne naučne koncepcije o našoj matičnoj planeti.

Ranije stanovište u nauci bilo je da je Zemlja prilično statična planeta, sa povremenim epizodama formiranja planinskih masiva i nepoznatim uzročnicima tih procesa. Savremeni koncept, baziran na brojnim osmotrenim, naučno verifikovanim činjenicama, ukazuje da je Zemlja veliki dinamički sistem, sa litosfernim kontinentalnim i okeanskim pločama, koje se kontinualno pomjeraju, sa kompleksnom i dinamičnom dubokom unutrašnjošću, njenom evidentnom interakcijom sa rotacijom Zemlje, zajedno su odgovorni i zaslužni za njenu strukturnu, progresivnu evoluciju i stvaranje idealnih ambijentalnih uslova za razvoj živog svijeta na njoj.

Planeta Zemlja u cjelini, ili posmatrana parcijalno, predstavlja objekat proučavanja vrlo velikog broja naučnih disciplina. Geologija i Geofizika, zajedno sa svojim subdisciplinama, imaju posebno mjesto u grupaciji tih nauka, s obzirom da, kako sa aspekta obima, strukture i objekata istraživanja na Zemlji i u Zemlji, obuhvataju planetu u cjelini. Iz tih razloga, tim naukama je posvećen najveći prostor u ovom udžbeniku. Polje proučavanja brojnih geo-disciplina vrlo često se međusobno preklapaju, te ih je teško izdvojeno opisati. Iz tih razloga u narednom izlaganju više će se voditi računa o kontinuitetu i sveobuhvatnosti izlaganja, nego o striktnoj podjeli naučnih saznanja u oblasti geonauka na subdiscipline.

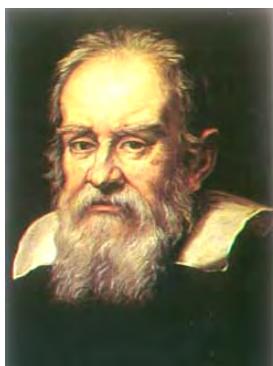
Dosadašnja intenzivna istraživanja Kosmosa još uvijek nijesu rezultirala opažanjem planete koja bi bila slična Zemlji po uslovima za razvoj organskog svijeta. Zemlja je kao planeta započela svoj život unazad nešto više od 4,5^{*} milijardi godina, koje su protekle u sporom, ali definitivno progresivnom stvaranju idealnih uslova za razvoj živog organskog svijeta na njoj. Količina vode, njeni oblici i distribucija, idealni sastav atmosfere i količina kiseonika u njoj, položaj Zemlje u sunčevom sistemu koji uslovjava optimalnu količinu toplove, zatim prisustvo mnogobrojnih prirodnih zaštitnih barijera od štetnih kosmičkih zračenja, reljefni oblici koji su stvorili savršen mikro i makro ambijent u sve tri dimenzije, kao i mnogobrojni drugi prirodni uslovi, zajedno su rezultirali savrešnim ambijentom za nastanak i buran razvoj cjelokupnog organskog svijeta na Zemlji i pojavu samog čovjeka. Neke od tih prirodnih uslova koji se izučavaju u geonačnim disciplinama, u narednom tekstu ćemo samo nakratko dodirnuti.

Iako Zemlja predstavlja ogroman, kompleksan, ali stabilan i harmonizovan sistem, koji besprekorno funkcioniše već milijardama godina, u toku samo nekoliko zadnjih decenija, čovjekov učinak spaljivanjem fosilnih goriva (uglja, zemnog gasa i nafte) koji su stvarani milionima godina, uslovjava već značajne i uočljive promjene u prirodnom ambijentu. Te okolnosti, kao i štetne posljedice intenzivne industrijske aktivnosti, uništavanje ogromnih šumskih površina, emisija štetnih gasova u atmosferu i brojni drugi efekti čovjekove djelatnosti, već se zabrinjavajuće manifestuju u vidu nepovoljnih globalnih ekoloških procesa, kao što su globalno zagrijevanje atmosfere, topljenje ledenih kapa na polovima, pojavu kiselih kiša, učestale pojave ekstremnih meteoroloških pojava, oštećenje ozonskog omotača itd. U bliskoj budućnosti ovakve pojave mogu značajno ugroziti životnu sredinu i imati dramatične posljedice po cijeli živi svijet na našoj planeti, neizbjegno uključujući i egzistenciju samog čovjeka.

* Napomena: u ovom udžbeniku će se za označavanje decimalnog zareza koristiti zapeta (,) a za razdvajanje hiljada – tačka (.). Takođe, imena elemenata i geoloških era i perioda, biće navođeni velikim slovom.

2. OSNOVNI ELEMENTI KOSMOLOGIJE

Od najranijih vremena ljudske civilizacije, mnogi mislioci sa ikonskim nagonom da se izdignu iznad horizonta svakodnevnice, pažljivo su posmatrali noćno nebo prepuno zvijezda, pokušavajući da odgonetnu brojne misterije Univerzuma. Međutim, do današnjih dana nije se mnogo promjenilo u laičkom shvatanju Svemira, a posebno ne u stalnoj želji čovjeka da spozna tajne nastanka materijalnog svijeta i shvati fenomen života.



Galileo Galilei

Još prije četiri vijeka, italijanski matematičar i astronom Galileo Galilei (1564.-1642.) je shvatio da put do saznanja i razumijevanja mora biti baziran na osmatranju Prirode i činjenica, umjesto do tada na dogmi koncipiranoj i neutemeljenoj filozofiji. Astronomi drevne Grčke postavljali su Zemlju u centar Univerzuma. Ali u XVI vijeku poljski kaluđer i astronom Nikola Kopernik (1473.-1543.) iznio je ideju da Zemlja i druge planete rotiraju oko Sunca. Zbog suprotstavljanja ove ideje stavu Crkve da je Zemlja centar Univerzuma i da se Nebesa nalaze iznad zvjezdane sfere, Kopernikov heliocentrični sistem nije dobio podršku Crkve za njegovog života. Galileo Galilei je konstruisao prvi teleskop dovoljne

jačine za proučavanje Mjeseca i planeta, uspijevši da dokaže ispravnost Kopernikovog stava. Iz tih razloga, Galileo se smatra arhitektom modernog koncepta pažljivog naučnog osmatranja i eksperimenta.

Posebno značajnu ulogu u razvoju savremene kosmologije imao je njemački astronom Johan Kepler (1571.-1630.) koji je uspostavio osnovne zakone kretanja planeta oko Sunca, koji se koriste i danas.



Johan Kepler

Tokom posljednjih dvadesetak godina, nakon izgradnje moćnih terestričkih* i orbitalnih teleskopa, prikupljeno je izuzetno veliko i vrijedno saznanje o dimenziji, strukturi i sadržaju Svemira, mehnizmu nastanka i razvoja kosmičkih objekata, njihovom položaju i uređenju Kosmosa, a posebno o sunčevom sistemu, kao i našoj galaksiji Mlječni Put. Savremena sistematska osmatranja Kosmosa i kosmičkih objekata doprinijela su i značajnom unapređenju saznanja o našoj matičnoj planeti, kao i o organskom životu na njoj.



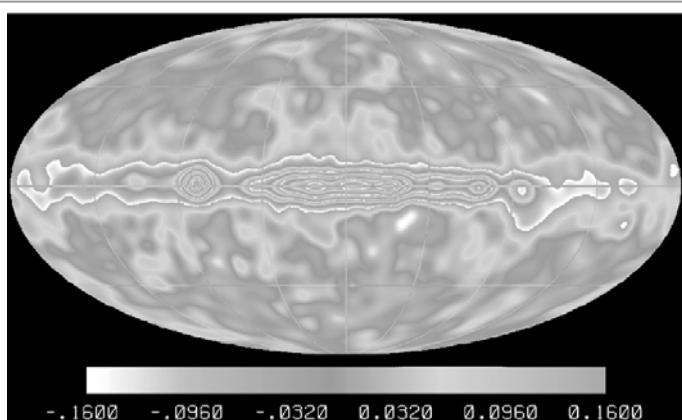
Kosmički teleskop "Habl".

Izgradnjom i lansiranjem kosmičkog teleskopa HST* nazvanog "Habl", koji kruži u orbiti iznad Zemlje, u astronomiji i astrofizici je praktično započela nova era izuzetno kvalitetnog osmatranja kosmičkih objekata i procesa. Ovaj teleskop, sa ogledalom prečnika 4,2 metra, zahvaljujući odsustvu raznih optičkih smetnji zbog prisustva atmosfere, koje

* Terestrički = zemaljski, pozicioniran na zemljinoj površi (Tera /lat./ - Zemlja).

* Hubble Space Telescope (NASA).

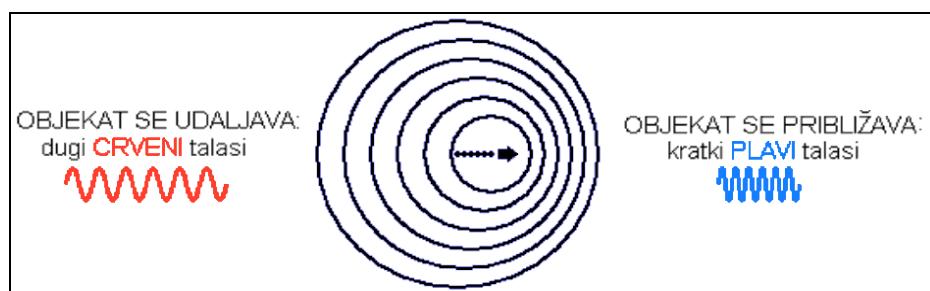
se javljaju pri terestričkom osmatranju, omogućava dobijanje vrlo jasnih snimaka čak i dubokog Svetlinskog zračenja. Tokom nekoliko godina njegove intenzivne primjene, snimljeno je veoma mnogo kvalitetnih fotografija kosmičkih objekata, koje se intenzivno proučavaju (na Internetu je moguće vidjeti veliki broj takvih fotografija, npr. na prezentacijama www.hubble.nasa.gov ili www.hubblesite.org).



Mapa pozadinskog zračenja Kosmosa. Galaksija Mlječni Put se uočljivo izdvaja u centralnom dijelu slike.

pravcima je veoma ujednačena. Ova činežnica nazvana je "Kosmološki princip". Svakako, Kosmološki princip važi za Kosmos posmatran u cijelini, dok su odstupanja rasporeda masa nebeskih tijela na lokalnom nivou – na relativno malim rastojanjima, sasvim razumljiva.

Mjeranjem mikrotalasnog zračenja* u svim pravcima specijalnim kosmičkim satelitom COBE*, konstatovano je da iz svake tačke u Kosmosu dopire vrlo homogeno energetsko zračenje, koje je takođe kao i raspored masa, veoma uniformno u svim pravcima. Odstupanje ovog zračenja je manje od 1/100000 u bilo kom pravcu, u kosmičkim razmjerama (slika). Ovo, tzv. pozadinsko, zračenje uslovjava da temperatura Svetlinskog zračenja nije na absolutnoj nuli[†], nego da ima vrijednost od $+2,7^{\circ}\text{K}$.



Slika 1. Promjena frekventnog spektra[‡] talasnog zračenja šematski prikazan za slučaj kada se tijelo – izvor svjetlosti – pomjera od posmatrača (lijevo) pri čemu se pomak spektra vrši ka crvenom dijelu (povećanje talasne dužine) i u slučaju približavanja objekta koji je izvor svjetlosti (desno) uz pomak ka plavom dijelu spektra (kraći talasi).

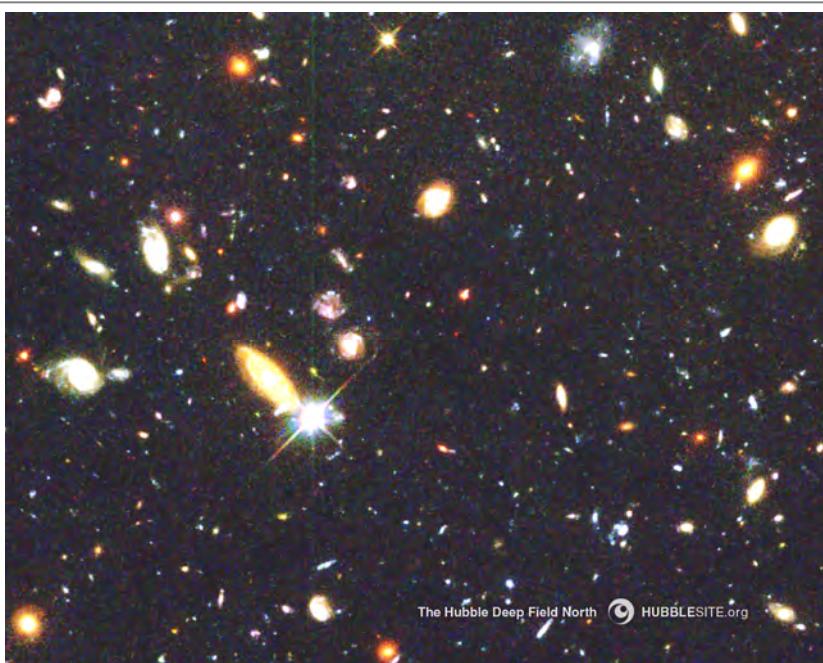
* Emitovanje energije u vidu talasnog zračenja vrlo visokih frekvencija.

† COBE -

‡ Apsolutna nula je najmanja moguća temperatura i iznosi $-273,16^{\circ}\text{C}$ ili 0°K (Kelvinova temperatura se računa od absolutne nule – znači 0°C je $+273,16^{\circ}\text{K}$).

‡ Pod frekventnim spektrom se podrazumijeva zavisnost amplitude talasa od njegove učestanosti (frekvencije) prikazan u određenom dijapazonu tih učestanosti.

Direktnim opažanjem, na noćnom nebu možemo identifikovati ogroman broj nebeskih tijela. Smatra se da samo u našoj galaksiji broj zvijezda premašuje 100 milijardi. Pored izuzetno velikog broja zvijezda, sistematskim osmatranjem Kosmosa konstatovano je i niz činjenica koje su od velikog značaja za razumi-jevanje njegovog nastanka, njegove organizacije i strukture. Utvrđeno je, na primjer, da je raspored nebeskih tijela u cijelom Kosmosu izuzetno uniforman i izotropan. Naime, gustina nebeskih tijela na jedinicu površine neba u svim



Slika 2. Tipična skupina većeg broja galaksija (grupacija, klaster, grozd). Slika je snimljena kosmičkim teleskopom "Habl".

mo na nebu, okarakterisan različitim pomakom spektralnih linija* ka crvenom dijelu spektra i da je veličina tog pomaka proporcionalna rastojanju do objekta koji emituje tu svjetlost (slika 1). Iz opšte fizike je poznato da kada se objekat koji emituje talasno zračenje (svjetlost ili zvuk) udaljava od posmatrača, tada se to zračenje, koje stiže do (pasivnog) posmatrača, prima u izmijenjenom obliku – uz povećanje talasne dužine zračenja (smanjenje frekvencije) i obrnuto – pri približavanju izvora posmatraču, prividno se evidentira smanjenje talasne dužine (povećanje frekvencije). Intenzitet promjene talasne dužine je proporcionalan brzini relativnog kretanja izvora u odnosu na posmatrača (slika 1). Ova pojava u opštem obliku se naziva **Doplerov efekat**. Dakle, u svjetlosti sa objekta koji se udaljava od nas, registrovaćemo izvjesno pomjeranje sastava spektra ka njegovom crvenom dijelu, dok će objekat koji se približava, emitovati svjetlost sa pomakom ka plavom dijelu spektra (slika 1).

Svaa mjerena ukazuju da je crveni pomak spektra zračenja nebeskih tijela, univerzalan za cio Kosmos. Taj univerzalni princip crvenog opmaka za sva nebeska tijela nazvan je **Hablovim[♦] zakon**.

Dugotrajnim i preciznim osmatranjem kretanja nebeskih tijela, pouzdano je utvrđeno da se svi objekti međusobno udaljavaju jedan od drugog, kao i da je brzina njihovog kretanja proporcionalna njihovom rastojanju od nas, ili bilo koje druge tačke u Kosmosu. Ova činjenica nedvosmisleno ukazuje da se Kosmos konstantno širi, a zaključak se zasniva na opaženom "crvenom pomaku" svjetlosti koju emituje svako nebesko tijelo.

Naime, utvrđeno je da je svaki objekat koji opaža-

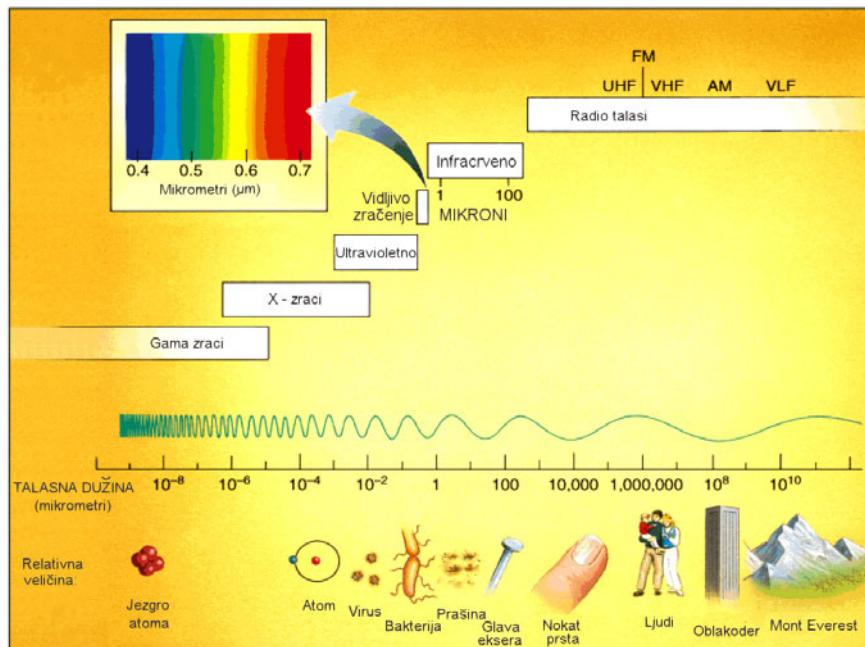


Slika 3. Glaksija NGC 5194 ili "Vrtlog", (ili "M51"), sa dva spiralna kraka i velikim brojem mlađih zvijezda, predstavlja jednu tipičnu spiralnu galaksiiju, kakva je i Mlječni Put.

* Mjerjenjem se identificuju apsorpcione linije u spektru, koje zapravo predstavljaju djelove spektra koji su upijeni (apsorbovani) određenim hemijskim elementom na objektu koji ih emituje, što se u spektru svjetlosti manifestuje prazninom – crnom linijom.

♦ Po američkom astronomu Edvinu Hablu (Edwin Hubble 1889.-1953.).

nom, a tzv. Hablova konstanta iznosi 71 km/s/Mpc^* . Recipročna vrijednost ove konstante predstavlja absolutnu starost Kosmosa, koja iznosi 13,7 milijardi godina. Ovako određena starost Univerzuma je potvrđena i većim brojem mjerjenja spektralnih karakteristika nekih radioaktivnih izotopa na mnogim zvijezdama (radiometrijskim datiranjem na osnovu odnosa količine izotopa, o čemu ćemo kasnije više govoriti).



Slika 4. Spektar elektromagnetskog zračenja. Ukupno energetsko zračenje pokriva ogromni dijapazon talasnih dužina: gama zraci obuhvataju opseg sa talasnim dužinama preko 10^{-5} mikrona (mikrometara, tj 10^{-6}m), zatim X-zraci od 10^{-6} (djelimično se prekrivaju sa gama zracima) do 10^{-2} , ultravioletno zračenje nalazi se u dijelu spektra između 10^{-3} do 0.5 mikrometara. Vidljivi dio spektra zauzima samo opseg između 0.5 i 1 mikrometar. Infracrveno zračenje se karakteriše talasnim dužinama između 1 i 400 mikrometara, a radio talasi zauzimaju ostatak spektra ka većim talasnim dužinama – preko 400 mikrometara.

Astronomskim opažanjem evidentiran je veliki broj raznovrsnih objekata, koji su svrstani u nekoliko grupacija. Pored običnih, standardnih zvijezda, kakvo je i naše Sunce, registrovani su i tzv. bijeli patuljci, supernove i crveni džinovi, koji zapravo predstavljaju stanje zvijezda u raznim fazama njihovog razvoja, zavisno od veličine mase zvijezde.

Velika skupina zvijezda i drugih nebeskih tijela, koje se nalaze u "jednom zvjezdanim jatu", koje predstavlja jednu izdvojenu strukturu uređenu međusobnim dejstvom gravitacionih sila objekata tog jata, naziva se **galaksijom**. Tipična takva skupina je i Mlječni Put, koji obuhvata preko 100 milijardi zvijezda i zauzima prečnik od oko 100 hiljada svjetlosnih godina. Zbog rotacije oko svog centra, galaksije često imaju spiralni oblik, kakva je i naša galaksija. Slika 2. sadrži snimak dubokog dijela Kosmosa na kojem se vide tzv. grozdovi galaksija (klasteri, grupacije). Na slici 3. je prikazana jedna tipična galaksija nazvana "Vrtlog" sa dva spiralna kraka, koja je u **Novom Galaktičkom Katalogu** (NGC) označena kao NGC 5194.

Naša zvijezda, Sunce, nalazi se na rastojanju od oko $2/3$ prečnika naše galaksije od njenog centra. Galaksiji Mlječni put potrebno je oko 200 miliona godina za jednu kompletну revoluciju (potpunu rotaciju oko svoje ose). Masa galaksije Mlječni Put je procijenjena na oko 140 milijardi masa našeg Sunca. Pored zvijezda i planeta, značajnu masu svake galaksije čine gasovi

* 1 Mpc (megaparsek) je astronomска jedinica. **Parsek** predstavlja rastojanje koje svjetlost pređe za 3,26 godina, a iznosi $3,086 \cdot 10^{19}$ km.

i prašina (koja može biti grafitnog, silikatnog ili vodoničnog sastava) koji se nalaze u ogromnom međuzvezdanom prostoru galaksije.

Još češće od spiralnih, u Kosmosu se zapažaju tzv. eliptičke galaksije, koje nemaju izdvojene spiralne krake, ali obično imaju izražen eliptični oblik. Računa se da u Svetmiru ima više od 100 milijardi galaksija svih vrsta. I pored ogromnih dime-nzija jedne galaksije, astronomska istraživanja su utvrdila da postoje i znatno veće kosmičke strukture, nazvane **Strukture velikih razmjera**, koje zapravo predstavljaju uređene skupine (grozdove ili klastere) više stotina i hiljada galaksija, čije razmjere prelaze nekoliko stotina miliona svjetlosnih godina. Način organizacije ovako velikih kosmičkih struktura nije jasan, s obzirom na zanemarljive vrijednosti gravitacionih sila na tako velikim rastojanjima. Pomenimo da se **maglinom** ili **nebulom** naziva dio velike galaksije, odnosno lokalna skupina zvijezda, zvjezdane prašine i gasa, u kojem se pretežno rađaju mlade zvijezde. Na slici 4a je prikazana jedna tipična maglina, koja se nalazi u našoj galaksiji, nazvana Karina.



Slika 4a. Nebula Karina u našoj galaksiji Mlječni Put

Od značajnih objekata u Kosmosu navedimo i tzv. **kvazare**, ili kvazi-stelarne objekte, koji su otkriveni tek 1963. godine. Odlikuju se veoma velikim crvenim pomakom, što ukazuje na njihovu veoma veliku udaljenost, a karakterišu se ogromnom količinom mase koju sadrže i izuzetno velikim energetskim zračenjem - pretežno X-zraka, gama zraka i radio-talasa (vidi sliku spektra zračenja). Do sada je evidentirano preko 5.000 takvih objekata, koji još uvijek nijesu u potpunosti izučeni.

U Kosmosu postoji i veliki broj drugih objekata (crne rupe, tamna materija, zvijezde tipa bijeli patuljci, crveni džinovi i td.) kojima se ovdje nećemo baviti.

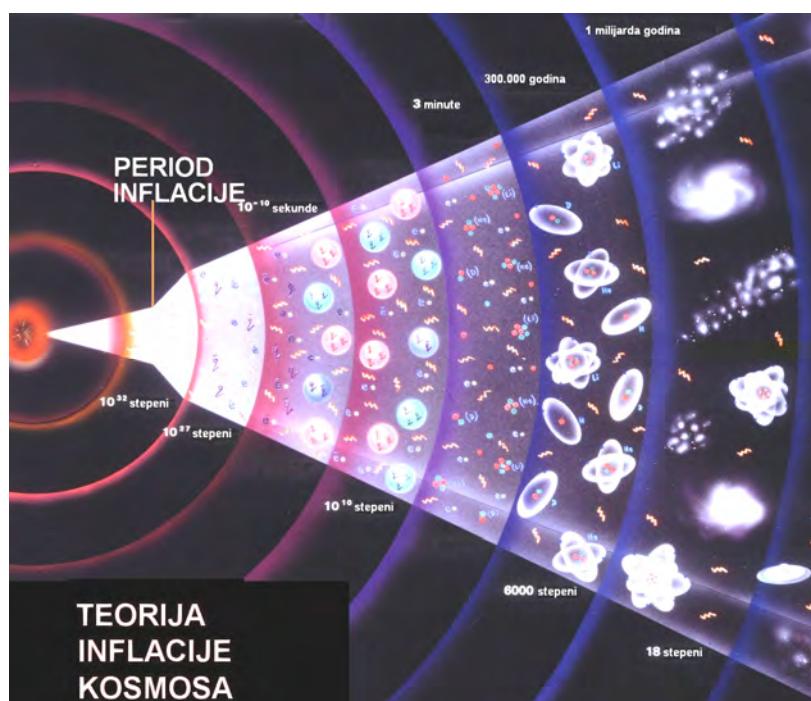
2.1. Nastanak Kosmosa

Tokom istorije naše civilizacije stvoreno je mnogo hipoteza i prepostavki o nastanku vidljivog dijela, a posljednjih decenija i cijelogupnog Kosmosa. Dosadašnja saznanja o Kosmosu, eliminisala su praktično sve ranije hipoteze osim hipoteze nazvane **Veliki Prasak** (enl. “the Big Bang”). Po prepostavkama te hipoteze, Kosmos je začet prije 13,7 milijardi godina, u obliku enormne eksplozije ekstremno guste materije, koja je praktično sadržala cijelogupnu masu

današnjeg Svemira u beskrajno maloj zapremini (tzv. singularitetu*) u kojoj nijesu važili današnji zakoni fizike, niti su prostor i vrijeme imali današnji smisao, s obzirom na enormne visoke temperature i pritiske koje su morale vladati u tako zbijenom Kosmosu. Odmah nakon eksplozije, kako predviđa ova hipoteza, započeo je proces formiranja elementarnih čestica, a zatim se obavlja rekombinacija elektrona i protona u **vodonik** (75 % ukupne mase) i **helijum** (preosatlih 25 % mase), kao osnovnih gradivnih elemenata Kosmosa (slika 5).

Prema teorijskim istraživanjima na numeričkom kosmološkom modelu, nakon oko 300 hiljada godina došlo je do razdvajanja korpuskularnog[†] od talasnog dijela materije i pada temperature Svemira na oko 6.000 °K (slika 5). Smatra se da pozadinsko mikrotalasno zračenje, koje smo pomenuli, zapravo predstavlja talasnu sliku stanja Kosmosa u tom momentu.

Tek nakon 100 - 200 miliona godina od Velikog Praska, započinje stvaranje zvijezda tipa supernova[‡], u čijim eksplozijama nastaju složeniji atomi: **ugljenik**, **azot**, **kiseonik**, **silicijum**, **magnezijum**, **gvožđe** i tako dalje (slika 5).



Slika 5. Šema nastanka Kosmosa po hipotezi Veliki Prasak i njenom modifikovanom obliku – “teorije inflatornog Kosmosa”.

Zbog pojave lokalnih nehomogenosti i gravitacionih posljedica tih nehomogenosti raspoređena tako stvorenih masa, zatim započinje proces lokalnog kondenzovanja materije u obliku ogromnih oblaka gasa i kosmičke prašine. Tokom narednih miliona godina, diferencijacija i kondenzacija primordijalnog (prvobitnog) difuznog gasa i prašine, dovela je do formiranja zvijezda kada je kondenzovana masa bila dovoljno velika da započne nuklearni fuzioni proces vodonika u helijum (što je pogonska snaga svake žive zvijezde, pa i našeg Sunca). U suprotnom, stvoreni su planetarni objekti koji nemaju tzv. kritičnu masu za nuklearnu fuziju, te su ostali na relativno niskim i stabilnim temperaturama.

* Singularitet, pojednostavljeno, podrazumijeva oblast nedefinisanosti.

[†] Korpuskula – čestica (lat. corpusculum – malo tijelo, atom).

[‡] Supernove su zvijezde veoma guste mase, koje eksplodiraju radi unutrašnjeg lančanog nuklearnog procesa. U fazi njihove eksplozije stvaraju se složeniji i teži hemijski elementi.

Zbog posljedica koje slijede iz prepostavke o začetku Kosmosa po modelu Velikog Praska – a to je potpuna homogenost cijele Vaspione (što u praksi nije slučaj) – tokom devedesetih godina prošlog vijeka, publikovano je nekoliko varijanti modifikovane hipoteze Velikog Praska, koje su poznate pod opštim nazivom **hipoteza Inflatornog Kosmosa**. Naime, ova hipoteza u veoma ranom stadijumu širenja Svemira (u periodu između 10^{-35} i 10^{-33} sekundi od početka Velikog Praska), uvodi prepostavku da je u lokalnim razmjerama singulariteta, moglo da dođe do formiranje nehomogenosti ograničenih razmjera, što je kasnije uslovilo pojavu nehomogenosti u današnjem Kosmosu (slika 5), koje su manifestovane kao Strukture velikih razmjera, koje su astronomski osmotrene, a koje smo već pominjali.

Kao što smo vidjeli, hipoteze Velikog Praska i Inflatornog Kosmosa ne objašnjavaju zašto je nastala velika eksplozija, ali iznenađujuće dobro predviđaju posljedice takvog događaja i karakteristike današnjeg Kosmosa, uključujući prosječnu gustinu materije Kosmosa, nivo pozadinskog zračenja, kao i način i brzinu širenja Univerzuma. Ipak, ova hipoteza ne može da odgovori na pitanje dali je Kosmos konačan ili beskonačan, odnosno dali će nastaviti da se širi u beskraj? Odgovor na ovo pitanje je uslovljen ukupnom količinom materije u Kosmosu. Naime, ako u Kosmosu postoji dovoljno materije, ona će svojim gravitacionim djelovanjem nakon nekog vremena zaustaviti proces širenja, pa bi Kosmos u tom slučaju počeo da kolapsira nazad u početni singularitet. Međutim, dosadašnja osmatranja i proračuni ukazuju da postoji samo 1/3 mase od tzv. kritične mase koja bi izazvala zaustavljanje ekspanzije Vaspione.

U ovoj složenoj naučnoj oblasti, kosmologiji, savim je razumljivo da još uvijek ostaju otvorena brojna pitanja, kao na primjer: što je bilo prije Velikog Praska?, zatim - dali zaista postoje crne rupe u Kosmosu? Kakvo je porijeklo kosmičkih zraka i čestica enormno velikih energija koje su po prvi put registrovane nedavno (nazvane "kosmičkim mećima")? Zatim, kako i zašto nastaju mlade zvijezde pretežno u centrima galaksija?, ali i mnoga druga pitanja koja zadiru u oblasti koje u ovom kratkom izlaganju nijesmo ni dotakli.

Za osmatranje kosmičkih objekata i procesa, u astronomiji se koriste teleskopski instrumenti, koji u principu mogu biti: **refraktori**, **reflektori** ili kombinovani instrumenti koji su nazvani **katadiopteri** (slika 5a). Kod refraktora se koriste isključivo sočiva za formiranje slike nebeskog tijela, dok su reflektori ostvareni kombinacijom više ogledala. Kod katadioptera, koji se vrlo intenzivno primjenjuju tokom posljednje dvije decenije, koristi se kombinacija sočiva i ogledala.



Slika 5a. Izgled tipičnih astronomskih instrumenata tipa refraktora (lijevo) i reflektora (desno).

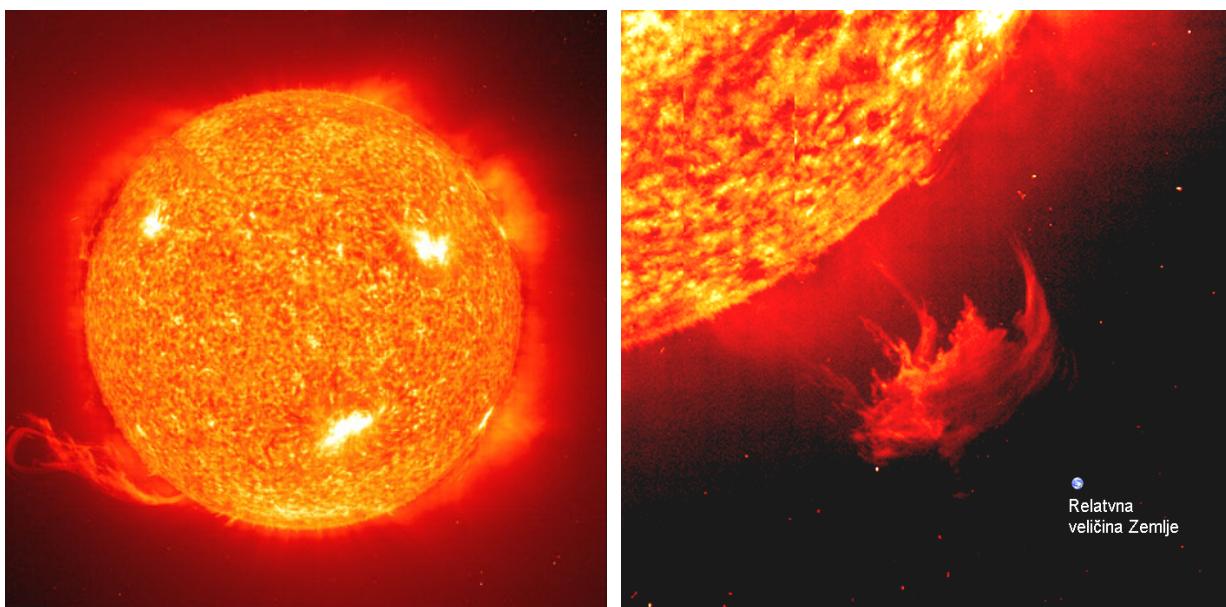
3. SUNČEV SISTEM

Način formiranja planetarnih sistema još uvijek nije pouzdano utvrđen, što važi i za naš Sunčev sistem. O načinu nastanka planetarnih sistema postoje 3 principijelno različite hipoteze: (1) nastanak iz hladne kosmičke magline, (2) iz vrele magline i (3) hipoteza sudara tijela.

Po prvoj, Sunce je nastalo kondenzovanjem primordijalne hladne materije koju su činile čestice kosmičke prašine i gasa velike globule koja se lagano okretala. U procesu gravitacionog sažimanja, materijal globule je uvećavao temperaturu (na račun potencijalne energije) i dobio veliku rotacionu brzinu. Pri tome su planete nastale sekvencijalno - otkidanjem djelova mase takvog primarnog Sunca.

Druga hipoteza pretpostavlja da je Sunce stvoreno kondenzovanjem vrele međuzvjezdane globularne mase u jedno centralno jezgro i nekoliko manjih perifernih. Daljim sažimanjem, od centralnog dijela globule nastalo je Sunce, a od perifernih - planete sunčevog sistema. Zbog velikih temperatura (oko 10 miliona stepeni) i pritisaka, kao što smo već ranije opisali, u Suncu je započeo proces termonuklearne transformacije vodonika u helijum, uz oslobođanje velikih količina energije. Planete su, zbog nedostatka mase (a time nedovoljnog pritiska i temperature) ostale na relativno niskim temperaturama, ili kako se u astronomiji kaže – postale su kosmička hladna tijela.

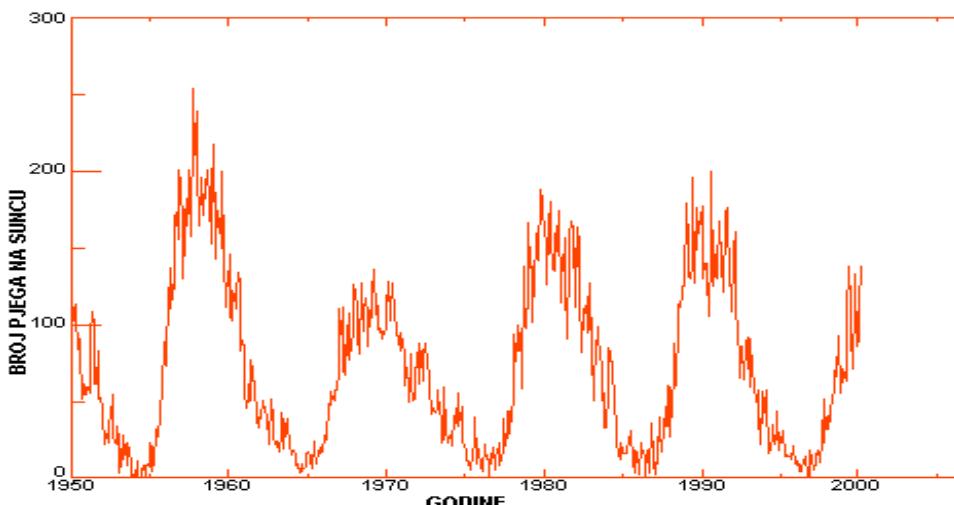
Najzad, hipoteza sudara, koju je lansirao Džeјms Džins* početkom XX vijeka, po kojoj je prije nekoliko milijardi godina, u neposrednoj blizini Sunca proletjela jedna zvijezda veoma velike mase, koja je uspjela da snažnim gravitacionim dejstvom od Sunca otrgne dio usijane mase. Ta masa je ostala u orbiti oko Sunca, rotirajući se i hladeći tokom vremena, nakon čega se raspala na veći broj djelova od kojih su nastale planete sunčevog sistema. U najnovije vrijeme hipoteza sudara je primjenjena i na modelu Zemlja – Mjesec, pri čemu su dobijeni vrlo uvjerljivi rezultati.



Slika 6. Protuberanca (erupcija usijane materije) na Suncu. Radi poređenja veličina, na slici desno (u donjem desnom uglu) je naznačena kontura Zemlje.

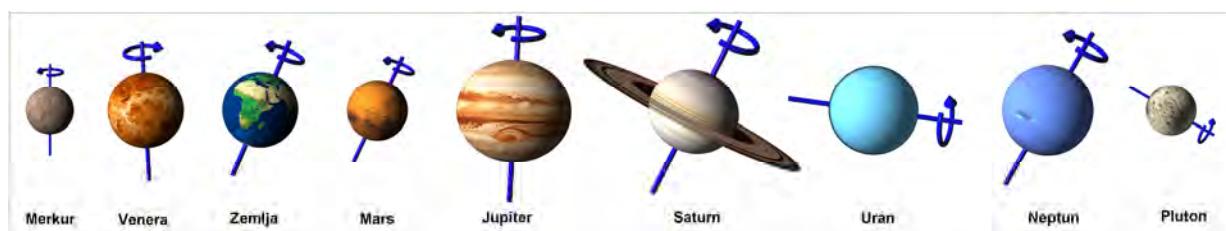
* James Jeans (1877.-1946.) engleski matematičar.

Kao što smo već pomenuli, energija Sunca se stvara nuklearnom reakcijom (fuzijom vodonika u helijum) u njegovom jezgru. Energija koju oslobodi Sunce u jednoj sekundi iznosi 3.9×10^{26} džula, za čiju proizvodnju je neophodno da fuzioniše oko 600 hiljada tona vodonika u helijum. Sobzirom na ukupnu masu, koja je oko 333 hiljade puta veća od zemljine i na učešće vodonika u toj masi od 91 %, to znači da postoji dovoljno fuzionog goriva za narednih najmanje 5 milijardi godina.



Slika 7. Sunčeva aktivnost izražena brojem sunčevih pjega tokom posljednjih 50 godina.

Sunčeva aktivnost nije uniformna, već se odvija u pravilnim ciklusima koji traju oko 11 godina (slika 7). Stepen aktivnosti se izražava brojem tzv. sunčevih pjega koje se mogu zapaziti na sunčevu površi, a koje zapravo predstavljaju regije protuberanci, eruptivnog izbacivanja usijane materije iz nižih sfera Sunca, u kosmički prostor. Ove erupcije su praćene emitovanjem snažnog zračenja nanelektrisanih visoko-energetskih čestica (uglavnom protona i ionizovanog* helijuma) i talasnog zračenja u širokom dijapazonu spektra. Ovo zračenje je poznato kao "sunčev vjetar", a prostire se duboko u Kosmos, "zaplijuskujući" i Zemlju, gdje može da izazove smetnje u radio-komunikacijama, značajne promjene u magnetskom polju Zemlje i druge efekte, o čemu ćemo govoriti kasnije. Sunčev vjetar, odnosno mlazevi čestica u njemu, kreću se brzinama između 300 i 600 km/s, sa temperaturama čak do 140 hiljada °C.



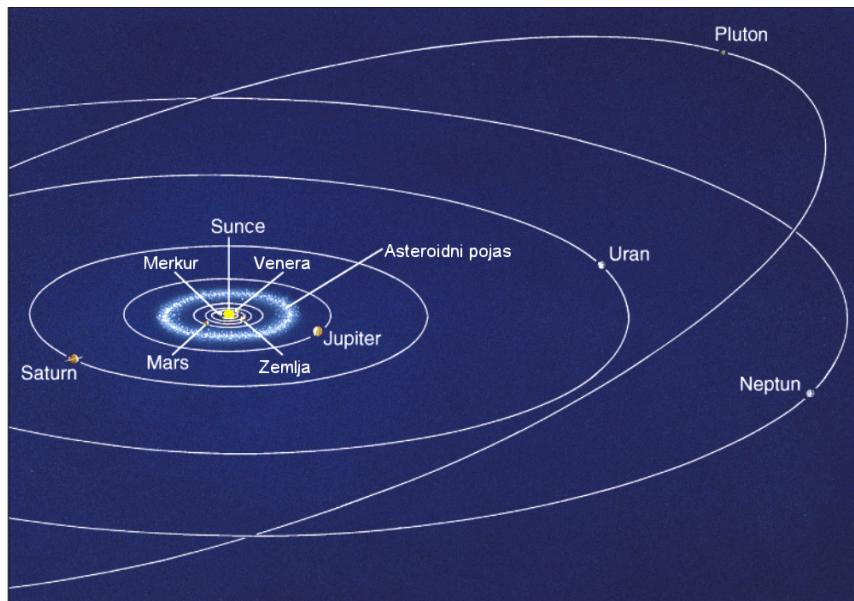
Slika 8. Planete sunčevog sistema sa indikacijom položaja ose u odnosu na ravan rotacije oko Sunca i oznakom smjera rotacije.

Oko Sunca rotira ukupno **devet** planeta[♦] koje se značajno međusobno razlikuju. Može se tvrditi da je o planetama više naučeno na osnovu njihove različitosti nego sličnosti. Ipak, postoji izvjesna međusobna sličnost dvije grupacije planeta (slika 8): četiri bliže Suncu (Merkur, Venera, Zemlja i Mars), koje formiraju tzv. unutrašnju grupu i pet koje su dalje od Sunca (Jupiter, Saturn, Uran, Neptun i Pluton), formirajući tzv. spoljašnju grupu. Zemlja pripada

* Ionizovan – nanelektrisan (pozitivno ili negativno) dejstvom sudara neke druge čestice.

♦ O postojanju desete planete vrlo malih dimenzija, na putanji znatno većoj od Plutonove, postoji više, još uvijek kontraverznih stavova.

unutrašnjoj grupaciji, pa se ova grupa zato naziva i terestričkom (nalik na Zemlju) ili stjenovitom. Planete u spoljašnjoj grupaciji su velike i dominantno gasovite, ali imaju satelite od čvrstog materijala. **Asteroidi*** u asteroidnom pojusu, koji su locirani između ovih grupacija planeta, odnosno između Marsa i Jupitera (slika 9) imaju sličnost u gustini sa terestričkim planetama. Pretpostavlja se da ovi asteroidi potiču ili od neke stare planete koja je razorenata u davnom kosmičkom sudaru ili predstavljaju ostatke nepotpuno formirane planete u fazi planetarne diferencijacije sunčevog sistema.



Slika 9. Relativan položaj orbita planeta i asteroidnog pojasa u sunčevom sistemu.

Rotiranje oko ose svih planeta se vrši u istom smjeru u kojem rotira i samo Sunce oko svoje ose, osim Venere, Urana i Plutona, koji rotiraju u suprotnom smjeru (slika 8). Rotiranje planeta oko Sunca se obavlja u gotovo koplanarnim ravnima, koje ne odstupaju za više od 7 stepeni za sve planete osim Plutona, čija **inklinacija**[♦] iznosi 17 stepeni.

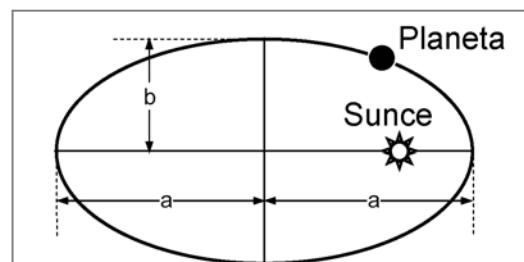
Još prije 400 godina, Johan Kepler je zapazio da putanje planeta oko Sunca nisu krugovi, već elipse, čija se spljoštenost (odstupanje od kruga) naziva ekscentricitetom, a definiše se jednostavnim izrazom:

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

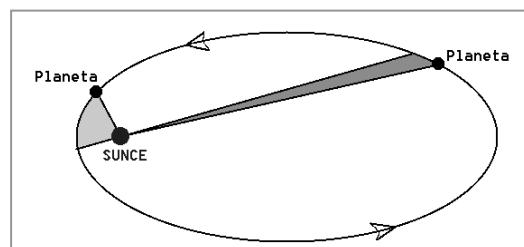
pri čemu **a** i **b** predstavljaju veliku i malu poluosu elipse putanje, respektivno. Za Zemlju ekscentricitet iznosi samo 0,01673, što znači da je zemljina orbita bliska krugu.

Kepler je svoja zapažanja uopštio, utvrđujući tri osnovna **zakona rotacije planeta**, koji glase:

1. Planete opisuju oko Sunca eliptične putanje; u



Eliptični oblik putanje planete oko Sunca (u živi elipse) sa naznakom velike i male poluose.



Uz drugi KeplEROV zakon.

* Asteroidi u asteroidnom pojusu predstavljaju pretežno stjenovite gromade (ima i metaličnih) vrlo različitih dimenzija – najveći je Ceres sa prečnikom 933 kilometra.

♦ Nagib u odnosu na zemljinu ravan rotacije oko Sunca, koja se naziva **ravan ekliptike**.

zajedničkoj žiži tih putanja nalazi se Sunce.

2. Linija koja spaja planetu i Sunce (radijus vektor), u jednakim vremenskim razmacima opisuje jednakove površine (slika).
3. Kvadriati perioda obilaska planeta oko Sunca srazmjeri su trećem stepenu njihovog srednjeg rastojanja do Sunca.

Prva dva zakona su dovoljno jasna na osnovu prikazanih slika, dok za treći zakon možemo navesti sljedeće pojašnjenje. Na trajektoriji putanje planete oko Sunca važi jednakost između centrifugalne sile planete i privlačne (gravitacione) sile između masa ta dva tijela:

$$m \frac{v^2}{r} = G \frac{m \cdot M}{r^2}$$

pri čemu je m masa planete, M masa Sunca, r rastojanje između ta dva tijela, a G gravitacijska konstanta, koja iznosi $6,67 \cdot 10^{-8}$ din·cm/g².

Nakon skraćivanja mase planete na lijevoj i desnoj strani gornje relacije, dobijemo izraz za brzinu planete oko Sunca u obliku:

$$v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$$

iz kojeg se vidi da brzina planete ne zavisi od njene mase, već samo od rastojanja do Sunca i svakako od njegove mase M . Ovo znači, da se masa Sunca može odrediti mjeranjem brzine bilo koje planete i njenog rastojanja do Sunca. Tako, na primjer, za slučaj Zemlje, koja se kreće brzinom od oko 30 km/s oko Sunca, na prosječnoj udaljenosti od 150 miliona kilometara, iz gornje formule dobijamo da masa Sunca iznosi $2 \cdot 10^{27}$ tona, što je za oko 333 hiljade puta veće od mase Zemlje. Na osnovu poznate mase Sunca, iz gornjeg izraza se mogu odrediti brzine ostalih planeta.

Trajanja jedne revolucije (potpune rotacije) planete oko Sunca (τ) jednak je količniku dužine te putanje $2\pi r$ i brzine planete v : $2\pi r/v$, pa zamjenom brzine gornjim izrazom, nakon kvadriranja možemo dobiti numerički izraz za treći Keplerov zakon:

$$\frac{\tau^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M}$$

koji, kao što smo pomenuli, izražava da je kvadrat trajanja obilaska planeta oko Sunca srazmjeran trećem stepenu njenog rastojanja do Sunca. Ovaj izraz je korektan i za eliptične putanje planeta, pri čemu r predstavlja veliku poluosu te elipse.

Ako se rastojanje planete do Sunca izražava u **astronomskim**

jedinicama*, a period njene rotacije oko Sunca u zemaljskim (siderijalnim) godinama, tada ovaj opšti izraz za treći Keplerov zakon postaje $\tau^2 = r^3$. U prikazanoj tabeli navedene su rezultujuće vrijednosti za sve planete sunčevog sistema, na osnovu astronomskog

Planeta	P (god.)	a (AU)	τ^2	r^3	τ^2 / r^3
Merkur	0,24	0,39	0,06	0,06	1,00
Venera	0,62	0,72	0,39	0,37	1,05
Zemlja	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Mars	1,88	1,52	3,53	3,51	1,01
Jupiter	11,9	5,20	142	141	1,01
Saturn	29,5	9,54	870	868	1,00
Uran	84,0	19,1	7056	6968	1,01
Neptun	165	30,0	27225	27000	1,01
Pluton	248	39,3	61504	60698	1,01

* Jedna **Astronomska jedinica** (skraćeno AJ) je mjera koja se koristi u Astronomiji i Astrofizici, a predstavlja srednje rastojanje između Zemlje i Sunca i iznosi oko 150 miliona kilometara (149.597.890 km).

opažanja. Mala odstupanja količnika τ^2/r^3 predstavljaju rezultat interakcije konkretnе planete sa ostalim planetama sunčevog sistema.

Pomenimo da, pored zakonitosti koja vlada u rotacionom kretanju planeta oko Sunca, koje je uređeno Keplerovim zakonima, takođe i srednja rastojanja planeta do Sunca se povicaju određenim pravilima, koja su još u osamnaestom vijeku proučavali i definisali astronomi Titius^{*} i Bode[♦], prema kojima je ova zakonomjernost nazvana Titus-Bodeovim zakonom, odnosno pravilom, s obzirom da se ne radi o fizičkom zakonu. Naime, srednje rastojanje planete sunčevog sistema, izraženo u astronomskim jedinicama, može se definisati jednostavnom relacijom:

$$D = \frac{3 \cdot 2^{n-2} + 4}{10} \text{ za } n \geq 2, \text{ dok za prvu planetu, Merkur važi: } n=1, D=0,4.$$

pri čemu **n** predstavlja indeks planete ($n = 2, 3, 4, \dots$), (treba računati i asteroidni pojas koji se nalazi na mjestu 5. planete od Sunca). Na primjer, za planetu Jupiter (šesta u nizu planeta sunčevog sistema, dakle sa indeksom 6), dobija se srednje rastojanje od 5,2 zemljinih rastojanja, što je potvrđeno astronomskim osmatranjem. Praktično sve planete sunčevog sistema zadovoljavaju Titius-Bode pravilo, izuzimajući dvije najudaljenije od Sunca – Neptun i Pluton. Do sada nije utvrđen razlog njihovog odstupanja od tog opšteg pravila.

Osnovni statistički podaci za Sunčev sistem (rastojanje od Sunca, izraženo u astronomskim jedinicama, poluprečnik planete, masa, dužina rotacije oko ose u odnosu na Zemlju, zatim broj mjeseca, nagib orbite planete u odnosu na zemljinu, kao i prosječna gustina planete) prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1.

	Rastojanje (astr.jed.)	Poluprečnik (Zemlja=1)	Masa (Zemlja=1)	Rotacija oko ose (Zemlja=1)	Broj mjeseca	Nagib orbite	Gustina (g/cm ³)
SUNCE	---	109	332.800	25-36	9	---	1,410
Merkur	0,39	0,38	0,05	58,8	0	7	5,43
Venera	0,72	0,95	0,89	244	0	3,394	5,25
Zemlja	1,0	1,00	1,00	1,00	1	0,000	5,52
Mars	1,5	0,53	0,11	1,029	2	1,850	3,95
Jupiter	5,2	11	318	0,411	16	1,308	1,33
Saturn	9,5	9	95	0,428	20	2,488	0,69
Uran	19,2	4	17	0,748	15	0,774	1,29
Neptun	30,1	4	17	0,802	8	1,774	1,64
Pluton	39,5	0,18	0,002	0,267	1	17,15	2,03

Velike planete imaju svoje satelite, koje nazivamo **mjesecima** (tabela). Zemlja ima najveći i najpoznatiji Mjesec, čiji sastav približno odgovara zemljinom. Na osnovu analize uzoraka stijena donijetih sa Mjeseca (u kosmičkim misijama – američke “Apolo” i ruske “Pionir”), kao i na bazi skorašnjeg numeričkog modelovanja sudarnog procesa dva viskozna kosmička tijela, on najvjerojatnije predstavlja jedan dio Zemlje, koji je odcijepljen u nekom davnom kosmičkom sudaru. O Mjesecu ćemo više govoriti kada budemo opisivali gravitacioni uticaj Mjeseca i Sunca na Zemlju. Marsovi mjeseci Fobos i Deimos su malih dimenzija i nepravilnog su oblika, a vjerovatno predstavljaju zarobljene asteroide. Za brojne Jupiterove satelite takođe se smatra da

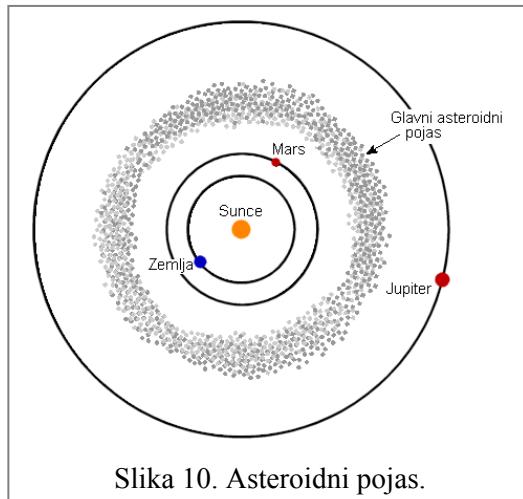
* Njemački matematičar Johan Titius (1729.-1796.).

♦ Njemački astronom Johan Bode (1747.-1826.).

predstavljaju zarobljene asteroide. Mnoge planete imaju prstenove finih čestica i prašine na određenom rastojanju, a takav prsten je posebno dobro izražen kod planete Saturn (slika 8).

Kometi predstavljaju objekte koji često imaju malo stjenovito jezgro, sa velikom količinom leda oko njega, ali mogu biti i isključivo od leda. Obično se kreću po vrlo izduženim eliptičnim putanjama oko Sunca, ali djelovi njihove putanje mogu biti i parabole na čiji oblik utiču gravitacione sile planeta pored kojih prolaze. Pod dejstvom sunčevog vjetra i topote, na kometi nastaje isparavanje leda, pri čemu se stvara dug gasoviti rep nasuprot Suncu. Pravci i ravni kretanja kometa nemaju pravilnosti, niti je smjer njihove rotacije saglasan sa globalnom rotacijom sunčevog sistema.

Asteroidi su kosmički objekti koji najčešće imajuju stjenovitu strukturu i sastav sličan stijenama na Zemlji, ali postoje i metalični asteroidi. Njihova dimenzija može da bude i više stotina kilometara u prečniku. Najpoznatiji i najveći asteroid u sunčevom sistemu je Ceres sa prečnikom od 918 km. Ogomorna količina asteroida različitih dimenzija, čini asteroidni pojasa (slika 9 i 10), koji smo već pominjali.



Slika 10. Asteroidni pojasi.

Najzad, **meteoriti** su stjenovita tijela koja se kreću po eliptičkim putanjama koje se protežu od asteroidnog pojasa do prostora između planeta Jupitera i Marsa. Za razliku od meteorita, meteori, predstavljaju male čestice i manje komade raznorodnog materijala (vjeruje se da potiču od kometa) koji prodru u atmosferu, gdje ostavljaju svijetli trag koji nastaje zbog njihovog sudaranja sa atomima vazduha u atmosferi. Zbog velike temperature koja tako nastaje, meteori ne stižu do Zemlje, već bivaju istopljeni i resorbovani u atmosferi.

4. PLANETA ZEMLJA

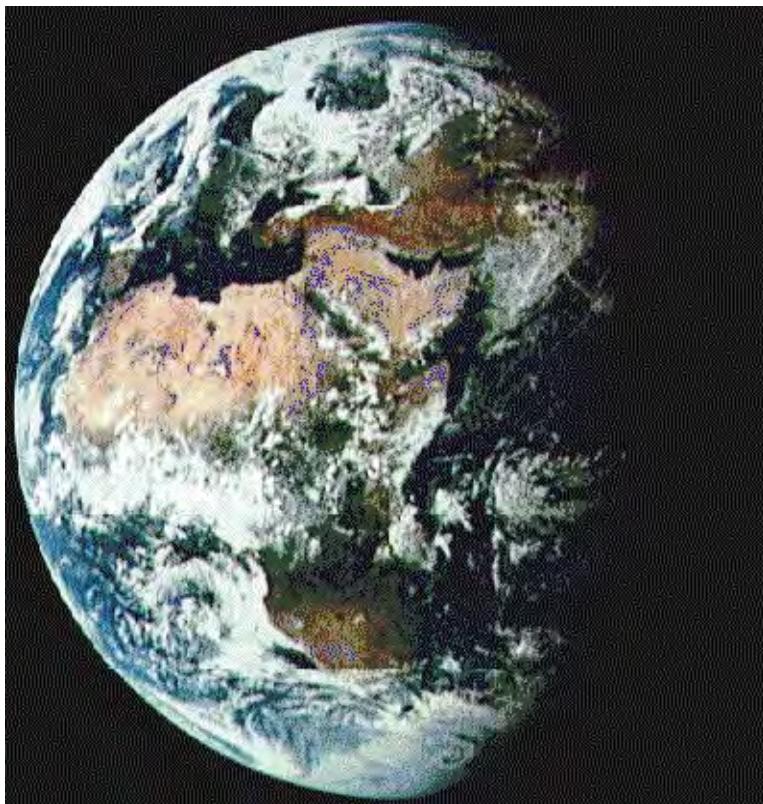
Naša matična planeta je veoma kompleksna kosmička tvorevina, nastala prije 4,55 milijardi godina, već stotinama miliona godina sa idealnim uslovima za formiranje i razvoj organskog svijeta. Planetu Zemlju odlikuje više jedinstvenih karakteristika, kojima se ona izdvaja od svih poznatih planeta, ali ono što je čini izuzetnom, svakako je enormna količina vode na njoj i velika količina kiseonika u njenoj atmosferi, kao dvije osnovne pretpostavke za uspješan razvoj organskog života.

Zemlja je dinamična planeta, kako na svojoj površi, tako i u unutrašnjosti. Njena površ se kontinualno mijenja dejstvom brojnih atmosferskih i geoloških procesa, kao što su erozija, pretaložavanje sedi-mnata, vulkanizam, tektonika i sl. Ovi procesi su aktivni praktično od njenog formirnja kao planete.

Nakon nastanka Zemlje kao planete, bilo je potrebno oko 700 miliona godina za stvaranje atmosfere sa odgovarajućom mješavinom kiseonika, vodonika, ugljenika i azota, potrebnom za formiranje prvih oblika života. Naučnici smatraju da je istovremenim dejstvom toplotne energije, svjetlosti i radioaktivnih elemenata, uslovljeno stvaranje kompleksnih proteina i kiselina, sa genetskim kodom sposobnim za repliciranje. Ovi molekuli su zatim evoluirali i formirali prve oblike života. Prije 3,8 milijardi godina stvoreni su uslovi za nastanak prvih jednoćelijskih organizama.

Na osnovu proučavanja ostataka organizama, utvrđeno je da se sastav atmosfere značajno mijenja tokom zemljine istorije. Danas atmosferski omotač u obimu od 99,96 % čine samo tri hemijska elementa i to: azot (78,08 %), kiseonik (20,95 %) i inertni gas argon (0,93 %). Relativno debeli sloj atmosfere predstavlja značajan zaštitni sloj za živi svijet, s obzirom da apsorbuje brojna štetna zračenja, kao i manje i veće čestice raznovrsnog materijala i meteorita, koji pod dejstvom gravitacione sile Zemlje bivaju privučeni iz okolnog Kosmosa. Istovremeno, reflektujućim dejstvom na toplotno zračenje same planete Zemlje, gasovi atmosfere sprječavaju njen pretjerano hlađenje. Bez tog efekta srednja temperatura na Zemlji bi bila niža za 33 stepena Celzijusa. Upijanjem ultravioletnih talasa u ozonskom sloju, atmosfera štiti cijeli živi svijet na Zemlji od štetnog dejstva tog visokoenergetskog tipa zračenja.

Zemlju možemo posmatrati i kao kompoziciju njenih međusobno interaktivnih djelova ili sfera: **magnetosfera, atmosfera, hidrosfera i geosfera**, koje ćemo nadalje nešto detaljnije opisati, a **ekosferu i biosferu** ćemo samo ukratko diskutovati kada budemo govorili o ekologiji. Savršena



Zemlja snimljena iz Kosmosa.

svojstva, sklad i harmonična interakcija ovih segmenata Zemlje, čini našu planetu idealnom za nastanak i razvoj živih vrsta.

Podsjetimo se nekih najznačajnijih parametara Zemlje kao planete: Zemlja kruži oko Sunca na prosječnom rastojanju od 1 AJ, sa srednjom orbitalnom brzinom od 29,784 km/s, po ekliptici u odnosu na koju je njena osa rotacije nagnuta za $23,45^0$. Ekscentricitet zemljine orbite iznosi 0,01673. Srednji poluprečnik Zemlje na ekvatoru je 6.378,136 km, a na polovima 6.356,751 km, dok spljoštenost* ima vrijednost od 1/298,257. Srednja gustina materijala koji gradi Zemlju iznosi $5,515 \text{ t/m}^3$. Srednji solarni dan ima 86.400, a siderijalni[†] 86.164,1 sekundi.

Ukupna površina okeana i mora iznosi 362 miliona kvadratnih kilometara, dok je njihova prosječna dubina 3,8 kilometara. Dakle, ukupna zapremina vodene mase na Zemlji iznosi oko 1,36 milijardi kubnih kilometara, što je ekvivalentno zapremini sfere prečnika 1.370 kilometara.

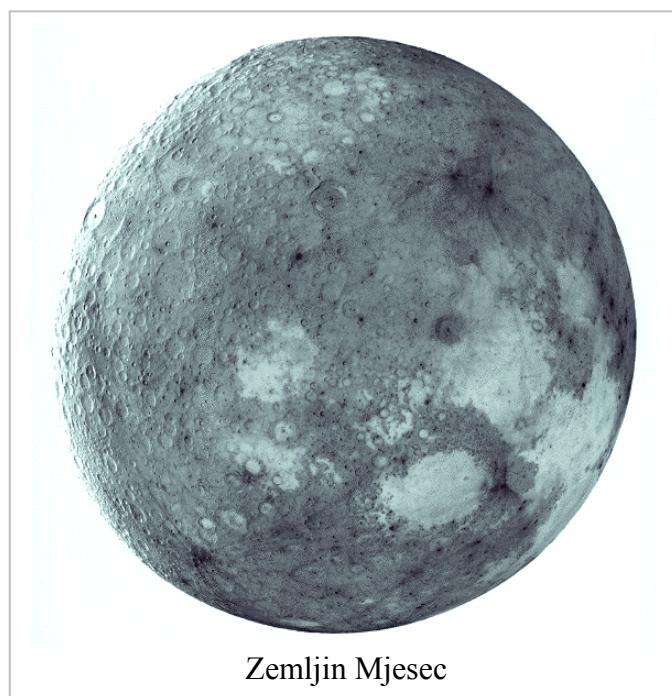
Od značajnijih fizičkih parametara Zemlje, pomenimo još da prosječna visina reljefa kontinenata iznosi 825 metara, dok najveći amplituda reljefa na Zemlji iznosi 19.891 metar, što je zapravo zbir između najviše planine – Mont Everesta u Aziji, sa 8.856 metara i najveće dubine koja je utvrđena u okeanskom rovu Marijana u zapadnom dijelu Tihog Okeana, od 11.035 metara (postoji i nekoliko malo različitih podataka).

Horizontalna orbitana brzina, koja je neophodna da bi tijelo izbačeno u orbitu oko Zemlje započelo da kruži oko nje iznosi 7,8 km/s, dok tzv. prva kosmička brzina, ili minimalna brzina tijela neophodna da tijelo napustilo gravitaciono polje Zemlje iznosi 11,2 km/s.

Mjesec

Kao što smo konstativali, Zemlja ima jedan prirodni satelit, Mjesec (inače najveći od mjeseca svih ostalih planeta sunčevog sistema), prema kojem su (opšti) naziv dobili i sateliti ostalih planeta. Mjesec oko Zemlje kruži po eliptičkoj putanji (saglasno Keplerovom zakonu) sa malim ekscentricitetom (0,0549) na prosječnom rastojanju od 384.400 kilometara i nagibom orbite u odnosu na zemljinu od $5,14^0$. Poluprečnik Mjeseca iznosi 1.738 km, a srednja gustina $3,35 \text{ t/m}^3$ (što odgovara gustini bazaltnih stijena, odnosno magme).

Gravitacija na zemljinoj površi je oko 6 puta veća u odnosu na mjesecu na njegovoj površi, iako je masa Zemlje 81,3 puta veća od mjesecove (Tabela I). Međutim, mjesecova masa je čak 26 miliona puta manja od sunčeve, ali i pored toga, zahvaljujući činjenici da je njegovo rastojanje od Zemlje 390 puta manje u odnosu na Sunce, ovaj prirodni zemljin satelit na Zemlju



Zemljin Mjesec

* Spljoštenost tijela definiše odnos razlike poluprečnika na ekvatoru i na polovima prema poluprečniku na ekvatoru.

[†] **Siderijalni dan** je vrijeme koje protekne dok tačka na zemljinoj površi napravi punu rotaciju oko zemljine ose u odnosu na isti astronomski pravac, za razliku od **solarnog** ili **sunčevog dana** koji označava vrijeme rotacije tačke na Zemlji - u odnosu na Sunce. Sunčev dan traje tačno 24 časa (86.400 sekundi), dok je siderijalni kraći za 5 minuta i 55,90 sekundi, dakle traje 86.164,10 sekundi.

vrši dvostruko veći gravitacioni uticaj, što se na primjer, neposredno manifestuje kroz plime okeana i druge pojave.

Uporedne karakteristike parametara Mjeseca i Zemlje

Tabela I

Parametar	Mjesec	Zemlja	Odnos
Masa (10^{24} kg)	0,07349	5,9736	0,0123
Zapremina (10^{10} km 3)	2,1958	108,321	0,0203
Poluprečnik na ekvatoru (km)	1738,1	6378,1	0,2725
Poluprečnik na polovima (km)	1736,0	6356,8	0,2731
Spljoštenost	0,0012	0,00335	0,36
Srednja gustina (kg/m 3)	3.350	5.515	0,607
Površinska gravitacija(m/s 2)	1,62	9,80	0,165
Prva kosmička brzina (km/s)	2,38	11,2	0,213
Albedo (koeficijent refleksije svjetlosti)	0,11	0,306	0,360
Raspon topografije min.-maks.(km)	16	20	0,800

Period obilaska Mjeseca oko Zemlje iznosi 27 dana i 19 minuta na putanji koja u odnosu na ravan rotacije Zemlje oko Sunca mijenja nagib sa amplitudom od $5^{\circ}09'$, sa periodom od 18,6 godina. Mjesečeva unutrašnjost je gotovo u cijelosti ohlađena, te zbog toga ne rotira oko svoje ose (uvijek ima istu stranu okrenutu prema Zemlji). Stijene sa mjesečeve površi su vrlo slične zemljinim. Bazaltne stijene sadrže nešto više titana, a manje gvožđa. Na osnovu snimanja i analize mjesečevih potresa, izazvanih plimskim naperzanjem njegove unutrašnjosti gravitacijom Zemlje, utvrđeno je da i Mjesec, kao i Zemlja, ima malo centralno jezgro (pretežno gvožđevitog sastava) prečnika 360 km, zatim omotač debeo oko 1.000 kilometara (u plastičnom, polutečnom stanju) i koru, debelu oko 65 kilometara.

Temperatura na mjesečevoj površi varira od minimalne u toku noći – oko 100°K (oko -173°C) do maksimalne u toku dana 400°K (oko $+127^{\circ}\text{C}$), što je posljedica potpunog odsustva atmosfere na tom nebeskom tijelu. Ipak, Mjesec posjeduje vrlo rijetku atmosferu koju čine gasovi u veoma razrijeđenom stanju. Ukupna težina slobodnih gasova na Mjesecu je procijenjena na samo 25 tona, a atmosferski pritisak varira oko $3 \cdot 10^{-15}$ bara. U njegovoј atmosferi se prosječno nalazi samo 200.000 atoma gasa u kubnom centimetru, što je gotovo zanemarljivo. Tako razrijeđenu atmosferu čine: Helijum (${}^4\text{He}$) u obimu od 20 %, Neon (${}^{20}\text{Ne}$) takođe 20 %, Vodonik (H_2) oko 17 %, Argon (${}^{40}\text{Ar}$) oko 15 % i veći broj drugih gasova u znatno manjoj količini.

4.1. Atmosfera i Meteorologija

Još u XVII vijeku Džon Dalton* je utvrdio da vazduh čine kiseonik i azot, kao i mala "količina nezapaljivog gasa", a nešto kasnije je potvrđeno da je to većim dijelom inertni gas argon. Pronalaskom masenog spektrometra početkom XX vijeka i razvojem tehnike uzimanja uzoraka na velikim visinama atmosfere, utvrđen je vrlo detaljan i precizan sadržaj i struktura zemljine atmosfere (tabela 2). Takođe, utvrđeno je da koncentracija izvjesnog broja gasova, koji imaju vrlo malo relativno učešće u atmosferi, varira zavisno od tačke posmatranja (takvi su ugljen dioksid /CO₂/, sadržaj vlage, metan /CH₄/, sumpor dioksid /SO₂/, ozon /O₃/ i dr.).

Tabela 2.- Sadržaj gasova u atmosferi

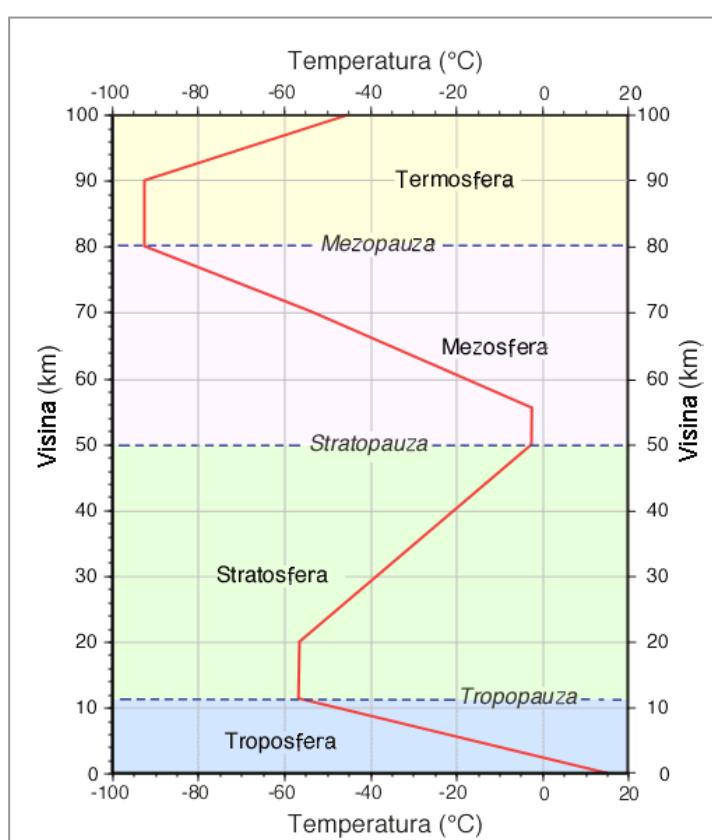
Gas	Učešće u atmosferi (%)
Azot	78,08
Kiseonik	20,95
Argon	0,93
Neon, Helium, Kripton	0,002
Ugljen dioksid	0,0003-0,0360
Metan, Vodonik, azotni oksidi	0,00025



Naučna oblast koja se bavi proučavanjem atmosfere, atmosferskih procesa i vremenskom (meteorološkom) prognozom naziva se **Meteorologijom**. a njena istorija seže u daleku prošlost - do grčkog filozofa Aristotela, od koga i potiče naziv ove nauke.

Atmosferu, koja predstavlja osnovni objekat proučavanja meteorologije, sačinjava vrlo kompleksna kompozicija slojeva gasova. Prema stanju temperature u atmosferi, ona je izdijeljena u 4 osnovna sloja (slika 11):

- **troposfera** (koja se prostire od zemljine površi do prosječne visine od 11 kilometara (visina ovog sloja zapravo varira između 8 i 16 kilometara, zavisno od geografske širine), sa stalnim smanjenjem temperature do -56°C na gornjoj granici), zatim
- **stratosfera** (između 11 i 50 km i promjenom temperature od -50 do -3°C),
- **mezosfera** (između 50 i 80 km i smanjenjem temperature od -3 do -95°C) i
- **termosfera** (koja se prostire od 80 km naviše, sa naglim porastom



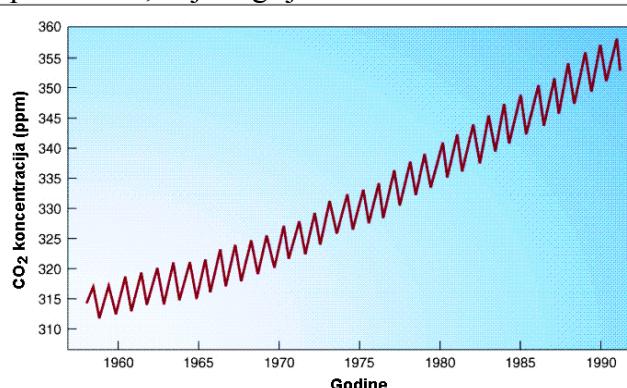
Slika 11. Temperaturni pojasevi atmosfere.

* John Dalton (1766.-1844.) engleski hemičar.

temperature od -95°C do preko 1.000°C na visinama preko 300 km).

Svaki temperaturni sloj se završava tzv. pauzom u kojoj se mijenja karakter promjene temperature.

Troposfera obuhvata oko 80 % ukupne mase atmosfere i u njoj nastaje većina meteoroloških procesa. Ona sadrži i ogromne količine vlage i čestica prašine. Temperatura u ovom sloju opada do tropopauze uniformno po stopi od $-6,5^{\circ}\text{C/km}$. Troposfera se zagrijeva posredno – zračenjem topote iz tla, koje zagrijeva Sunce u toku dana.



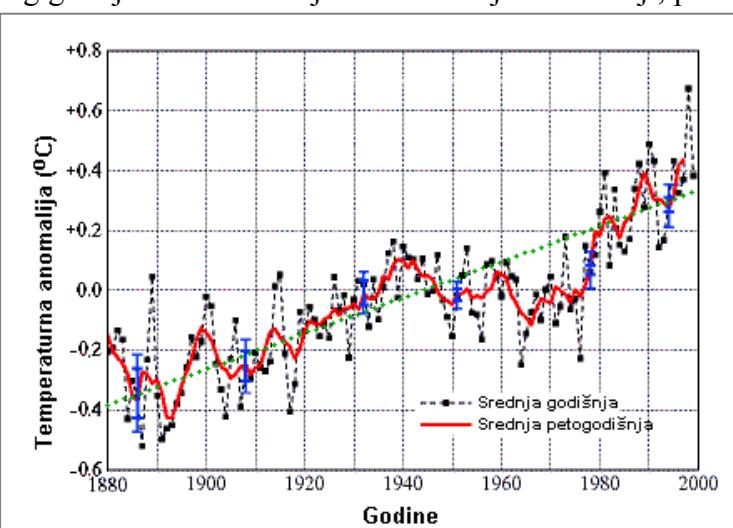
Slika 12. Rast koncentracije ugljen-dioksida u atmosferi tokom nekoliko zadnjih decenija.

Gornji dio mezofere i donji dio termofere čine poseban atmosferski sloj nazvan **jonosferom**, pošto ovaj sloj sadrži veliku količinu nanelektrisanih atoma i molekula, koji se nazivaju **jonima**^{*}. Joni se u atmosferi stvaraju kada molekuli gase kiseonika ili azota preuzmu veliku količinu energije iz ultravioletnih zraka koji dopiru sa Sunca, koja uslovjava da otpuste (izgube) jedan ili više svojih elektrona. Tokom dana, sunčevi ultravioletni zraci stalno ionizuju veliku količinu atoma, tako da je jonosfera najviše nanelektrisana u smiraj dana. Do

zore jonosfera lagano slabi na nanelektrisanju, zbog ponovne rekombinacije elektrona i jona tokom noći. Pošto su joni nanelektrisani, jonosferski sloj je sposoban da reflektuje radio talase, posebno tzv. kratke talase, u frekventnom opsjegu od nekoliko magaherca.

Gas **ozon** (O_3) je u atmosferi koncentrisan u sloju koji se prostire između 15 i 55 kilometara iznad Zemljine površi. Egzistencija ovog gasa je veoma značajna za živi svijet na Zemlji, pošto apsorbuje štetno ultravioletno zračenje sa Sunca, koje bi inače razorilo organske molekule kada bi prodrlo do zemljine površi. Satelitska osmatranja ukazuju na značajno smanjenje debljine ovog sloja, odnosno koncentracije ozona u njemu, tokom posljednjih nekoliko godina, posebno u predjelu Antarktika. Smanjenje ozona je izazvano emisijom gasa hlor-fluoro-ugljenika zbog industrijske aktivnosti.

Tri gase, koja samo u minornom obliku učestvuju u građi atmosfere: metan, ugljen-dioksid i azotni oksid, imaju svojstvo upijanja infra-crvenog dijela zračenja sa Zemljine površi, stvarajući **efekat "staklene baštice"**. Ovaj efekat uslovjava povećanje temperature u atmosferi. Bez njihovog prisustva, srednja temperatura na Zemlji bi bila -18°C umjesto sadašnjih $+15^{\circ}\text{C}$. Međutim, od početka tzv. industrijske revolucije, zbog intenzivnog sagorijevanja fosilnih goriva (od sredine prošlog vijeka) nivo ovih



Slika 13. Promjena (anomalija) prosječne godišnje temperature, kao odstupanje od dugogodišnje srednje vrijednosti.

* Jon je opšti naziv za atom ili molekul nekog elementa koji je izgubio ili dobio jedan ili više negativno nanelektrisanih elektrona.

gasova u atmosferi značajno je porastao (slika 12), što je rezultiralo podizanjem srednje temperature iznad optimalnog nivoa, odnosno lagano pregrijevanje atmosfere (slika 13). Dalja moguća posljedica ovog efekta je intenzivno topljenje velikih ledenih kapa na polovima, podizanje nivoa vode u okeanima i druge ekološke efekte.

Pritisak u atmosferi lagano opada od zemljine površi (slika 14), gdje, na nivou mora iznosi prosječno 1.013 milibara* (normalni pritisak), pa praktično do nule na visini od blizu 500 kilometara, gdje se atmosfera još može detektovati, ali samo u tragovima njenih gasova.

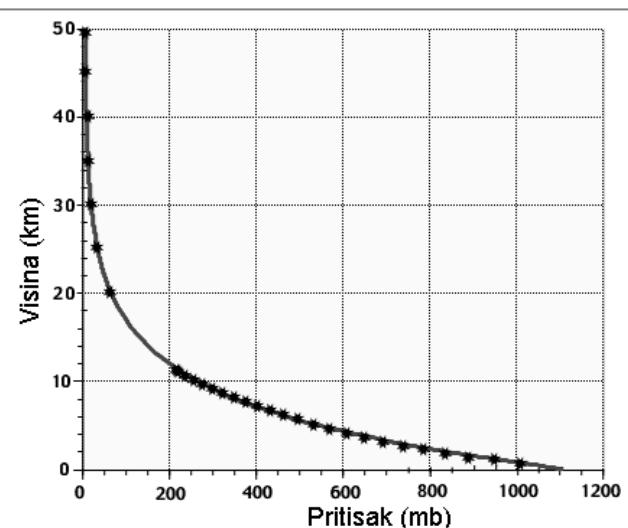
Količina sunčevog zračenja koje prima Zemlja varira, zavisno od brojnih faktora vezanih za međusoban položaj i rastojanje Sunca i Zemlje, zemljину rotaciju, kao i razliku u transparentnosti (prozračnosti) zemljine atmosfere. Posebno je značajno ciklično smjenjivanje osunčanja zbog promjene položaja ose obrtanja Zemlje u odnosu na Sunce, što uslovljava godišnje

klimatske cikluse. Ulaskom (kratkotalasnog) sunčevog zračenja u atmosferu, nastaje proces njegovog **rasipanja**, zatim **upijanja** (apsorpcije) i **reflektovanja** na atomima gasova atmosfere, što značajno umanjuje efekat direktnog kratkotalasnog zračenja. Samo 51 % od ukupne količine sunčeve energije koja ulazi u atmosferu, zadržava se na Zemlji i biva iskorišćeno za grijanje zemljine površi, isparavanje vode, otapanje snijega i leda, fotosintezu u biljkama, itd (slika 15). Od ostalih 49 %, oko 4 % biva reflektovano nazad u kosmički prostor sa zemljine površi, 26 % reflektovano i rasuto na oblacima, atomima i česticama atmosfere, dok preostalih 19 % biva apsorbovano u gasovima atmosfere, česticama i oblacima.

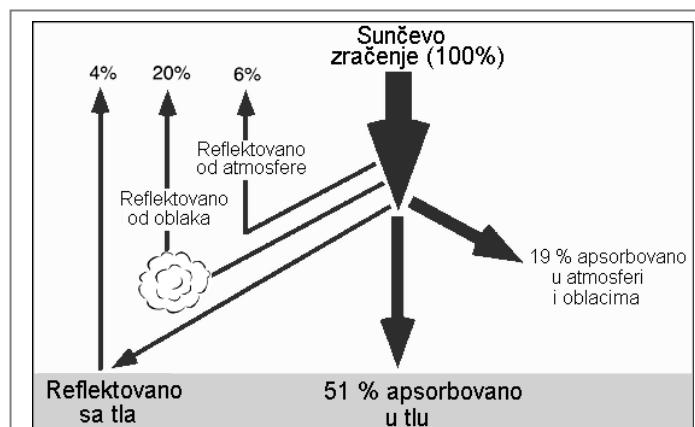
Na slici 16 prikazan je efekat apsorpcionog dejstva atmosfere preko spektra sunčevog zračenja registrovanog na tlu. Sa slike se vidi da kiseonik i ozon u cijelosti eliminisu štetna kratkotalasna i vrlo kratkotalasna zračenja (ultravioletna i dr.)

ispod 0,3 mikrona, odnosno mikrometara po SI sistemu (10^{-3} mm), zatim vлага (H_2O) u vazduhu, ugljen dioksid (CO_2), metan (CH_4) i azotni oksid (N_2O) značajno redukuju dio spektra između 0,33 i 15 mikrona. Najzad, vлага u vazduhu praktično u cijelosti upija sva zračenja iznad 15 mikrona. Vidljivi dio spektra (0,4 do 0,7 μm) pri tome ostaje praktično bez promjene.

Porijeklo gasova atmosfere i njen sadašnji sastav, još uvijek predstavljaju predmet izučavanja meteorologije i drugih naučnih disciplina. Smatra se da je rana atmosfera, praktično bez učešća



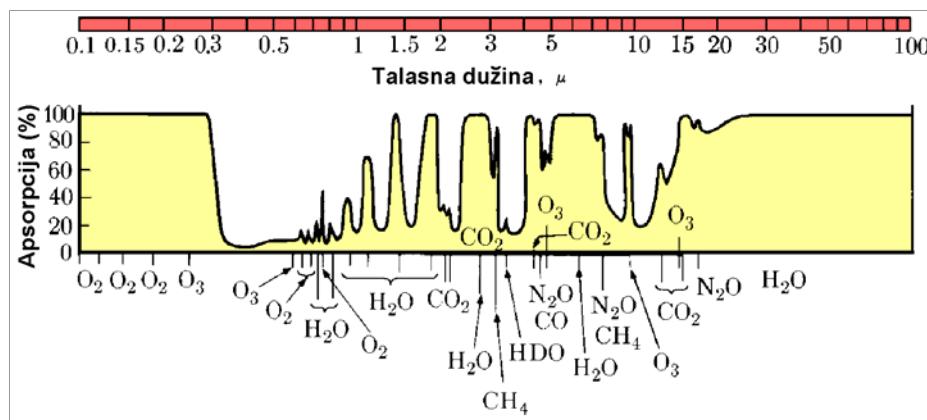
Slika 14. Promjena atmosferskog pritiska sa visinom.



Slika 15. Proces apsorpcije i reflektovanja sunčevog zračenja u atmosferi i tlu.

* Bar je jedinica za pritisak, dok se za mjerjenje atmosferskog pritiska koristi 1.000 puta manja jedinica – milibar (mb), koja iznosi 1 g/cm^2 . Ranije korištene jedinice za vazdušni pritisak su atm (atmosfera) koja iznosi 1.013 mb, što je ekvivalentno težini 760 mm živinog (Hg) stuba.

slobodnog kiseonika, stvorena od gasova i para izlučenih iz magme. Tokom stotina miliona godina formiranja zemljine kore i primitivnih oblika života na Zemlji, putem fotohemijске disocijacije vode pod dejstvom ultravioletnih zraka, a kasnije fotosintezom biljaka, nastajala je atmosfera današnjeg sastava. Postoji i hipoteza po kojoj je najveća količina kiseonika i drugih gasova u atmosferi, donijeta putem kontakta neke komete i Zemlje.



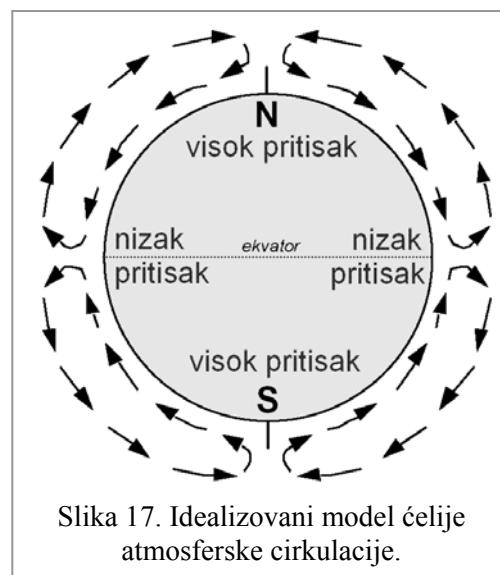
Slika 16. Apsorpciono dejstvo atmosfere na spektar zračenja sa Sunca.

Karakteristična plava boja atmosfere posljedica je zakonitosti rasipanja talasnog zračenja na molekulima vazduha. Naime, stepen rasipanja vidljivog i drugog zračenja u atmosferi, obrnuto je proporcionalan četvrtom stepenu talasne dužine zračenja ($1/\lambda^4$ pri čemu je λ talasna dužina tog zračenja). Plava boja se upravo nalazi na dnu spektra, sa najmanjom talasnom dužinom, pa je recipročna vrijednost četvrtog stepena tako male veličine – vrlo veliki broj.

Za razliku od Meteorologije, za koju smo konstatovali da se bavi proučavanjem atmosferskih procesa i prognozom atmosferskih vremenskih prilika, *Aeronomija* je multidisciplinarna naučna oblast u kojoj se vrši proučavanje strukture, dinamike i hemije jonosfere, termosfere i mezosfere, odnosno ionizacionih fenomena pod uticajem sunčevog vjetra, u prostoru koji se prostire između Zemlje i Sunca. Oštećenje ozonskog omotača, efekat staklene baštice, pojava i ponašanje aerosola nastalih u vulkanskim erupcijama, prostiranje radio-talasa u jonosferi, magnetske bure i stanje radiacionih pojaseva, predstavljaju objekte istraživanja ove nauke.

4.1.1. Kretanje vazdušnih masa

Energija kratkotalasnog spektra sunčevog zračenja, značajnim dijelom se u atmosferi transformiše u dugotalasno zračenje koje se emituje nazad u Kosmos, čime se ostvaruje tzv. energetski balans u atmosferi. U pojasu između 30 stepeni sjeverno do 30 stepeni južno, količina ulazne kratkotalasne energije znatno nadmašuje količinu dugotalasne reflektovane energije u kosmički prostor, dok je na preostalom dijelu planete (između 30 i 90 stepeni sjeverno i južno) energetski bilans suprotan – u ovom dijelu se javlja deficit energije. Zbog toga se u zonama bliže ekuatoru, zbog pregrijavanja vazduha atmosfere, javljaju polja niskog vazdušnog pritiska i stvaraju snažne uzlazne vazdušne struje (slika 17). Zagrijani vazduh će se kretati ka polovima, gdje će se hladiti (čime će postajati gušći) i tamo se spuštati ka Zemlji, povećavajući u tim zonama vazdušni pritisak, a zatim - vraćajući se ka ekuatoru duž zemljine površi. Relativno brza rotacija Zemlje i **Koriolisov**



Slika 17. Idealizovani model čelije atmosferske cirkulacije.

efekat će razbiti ovakvu globalnu cirkulaciju na više čelija i proizvesti turbulentna kretanja. Ova kretanja vazdušnih masa, kao i okeanska cirkulacija djeluju na redistribuciju primljene energije na taj način što iz tropskih krajeva, strujanjem vrši premještanje toplotne energije u regije na većim geografskim širinama (sjeverno i južno).

Koriolisov efekat ima značajan uticaj na meteorološka zbivanja na Zemlji i drugim planetama. Na Zemlji, koja se okreće u smjeru kazaljke časovnika, gledajući iz sjeverne hemisfere, objekat u svom pravolinijskom kretanju na sjevernoj polulopti biva otklonjen na desno, a na južnoj ulijevo. Ovo skretanje (otklon) je samo prividno, pošto bi posmatrač koji osmatra to kretanje iz spoljnog prostora, vidi da je putanja kretanja tog predmeta prava linija. Ovakav utisak se javlja zato što mi posmatramo događaje iz okvira “referentne” rotirajuće Zemlje, gdje vidimo prividno skretanje objekta. Isti utisak ćemo steći na rotirajućoj platformi na kojoj pokušamo da loptu uputimo u određenom pravcu po toj platformi: na sjevernoj hemisferi ona će prividno skrenuti desno, ali ako se taj proces posmatra van platforme (na primjer odozgo), vidjeće se da se lopta kreće pravolinijski.

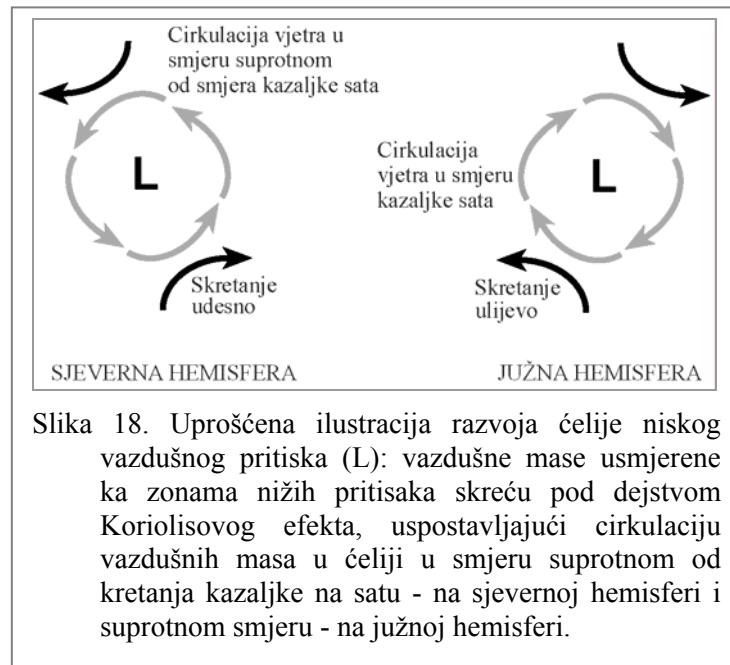
Ovaj koncept ima značajne implikacije na kretanje okeanskih struja, bura, pa čak i projektila, ali je zanemarljiv u malim razmjerama. U kombinaciji sa pritiskom, Koriolisov efekat utiče na rotaciju vazdušnih masa u smjeru suprotnom od kretanja časovnika na sjevernoj hemisferi, kod velikih bura, orkana i uragana (zone niskog vazdušnog pritiska), a u suprotnom smjeru na južnoj hemisferi (slika 18).

Energija zračenja apsorbovana u zemljinoj atmosferi konvertuje se u različite forme energije i biva korišćena u raznovrsnim, brojnim prirodnim procesima i ciklusima. Jedan od značajnih vidova konverzije dijela te energije uključuje stvaranje toplotne energije koja zagrijeva zemljinu površ i samu atmosferu. Stvaranje ove energije je striktno vezano za količinu kratkotalasnog zračenja primljenog sa Sunca. Stepen zagrijanosti, odnosno temperatura zemljine površi i atmosfere značajno variraju sa visinom, okeanskim i vazdušnim strujanjem, površinskim karakteristikama tla, periodom godišnjeg doba, zatim doba dana i sl.

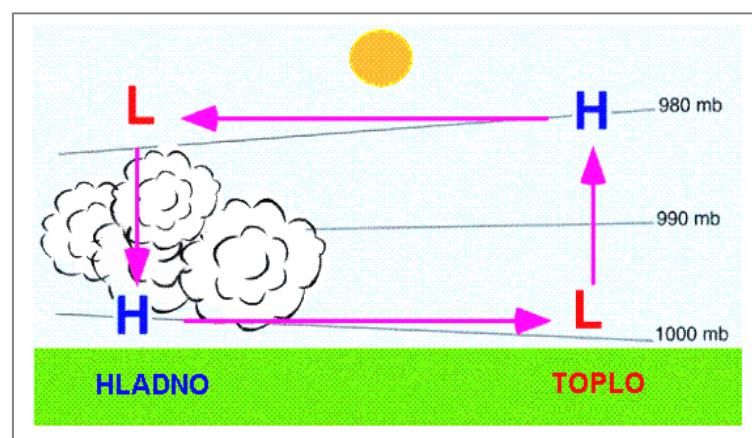
4.1.2. Formiranje oblaka

Samo kretanje (strujanje) vazduha uslovljeno je brojnim faktorima i silama, kao što smo vidjeli, primarno razlikom u temperaturi između ekvatorijalnih i polarnih predjela, ali i razlikom u pritiscima, odnosno postojanjem tzv. gradijenta (priraštaja) pritiska u atmosferi.

Osnovni sistem lokalne cirkulacije vazduha uprošćeno je grafički prikazan na slici 19. Zona na desnom dijelu slike prima znatno više zračenja od Sunca, s obzirom da je na lijevom dijelu pozicioniran sistem oblaka. Solarna radijacija uslovljava zagrijevanje vazduha preko toplotne energije emitovane iz zagrijanog tla. Radi toga, rastojanje između izolinija istog pritiska (izobare) biva povećano, kako se topli vazduh izdiže (slika 19). Zbog prisustva oblaka, na lijevom dijelu slike 19, kao što je rečeno, taj prostor biva hladniji od onog na desnoj strani. Razlika u pritisku u gornjim djelovima atmosfere između lijeve i desne strane na ovoj slici,



prouzrokovane kretanje vazduha iz zone visokog (H) ka zoni niskog (L) pritiska, a zatim iz gornjih djelova atmosfere i zone niskog pritiska - ka zemljinoj površi i rashlađenoj zoni, visokog vazdušnog pritiska. Najzad, iz ove zone visokog vazdušnog pritiska (H), vazdušne mase nastavljaju kretanje ka pripovršinskoj zoni niskog vazdušnog pritiska (L) u toplijoj zoni, čime se zatvara kružni ciklus njegovog kretanja. Kretanje vazduha u prirodi je ipak znatno kompleksnije od ovog jednostavnog modela. Naime, na stvarno kretanje vazduha značajno utiče i njegovo trenje sa tlom, kao i prisustvo izražene topografije (planina, kanjona), te najzad uticaja Koriolisovog efekta koji se manifestuje, kako smo vidjeli, otklonom pravca kretanja vazdušnih masa i rotiranjem masa u poljima niskog vazdušnog pritiska.



Slika 19. Kretanje vazduha izazvano razlikom u temperaturi i pritisku u pripovršinskim zonama i atmosferi. H označava polje visokog, a L niskog pritiska (od engl. H-High, L-Low).

Cikloni su osnovni mehanizmi turbulencije vazdušnih masa, koji značajno utiču na formiranje meteoroloških prilika. Oni predstavljaju ogromne vazdušne centre niskih pritisaka, koji se formiraju duž granice vazdušnih masa različitog fizičkog stanja (temperature, pritiska, vlažnosti) koja se naziva **vazdušnim frontom**. Pojačanjem ciklona, odnosno njegovih fizičkih karakteristika, i uzgonom toplih vazdušnih struja u više, hladnije zone, započinje stvaranje sistema oblačnosti, vjetra, smanjenje temperature, kao i padavina (kiše, snijega, grada). Kada vazdušne mase dospiju do ciklonskog centra, zbog dejstva Koriolisovog efekta, započinje njihova cirkulacija oko centara niskog vazdušnog pritiska (slika 18). Konačni rezultat je spiralno kretanje vazdušnih masa (suprotno kazaljci na satu na sjevernoj polulopti) ka centru niskog pritiska.

U najnižem sloju atmosfere, troposferi, turbulencija (virtloženje) je dominantan fizički proces, koji rezultuje nastajanjem oblaka. U načelu, oblaci nastaju u bilo kojoj vazdušnoj masi koja postaje zasićena vlagom (kada vlažnost dostigne 100%). Zasićenje vlagom može nastati u atmosferskim procesima koji uslovjavaju hlađenje vazdušnih masa do tačke rošenja (kondenzacije vlage) ili tačke mržnjenja (0°C). Postoji više mehanizama koji mogu usloviti pojavu oblaka. Tako, na primjer, **orografsko izdizanje**, koje se javlja kada vazdušne mase bivaju primorane da se izdižu na veće visine zbog prisustva izdignutog reljefa na njihovom putu kretanja. Takođe, **konvekciono izdizanje** je proces koji uslovjava izdizanje vazdušnih masa usled zagrijevanja vazduha na tlu, pri čemu zagrijane vazdušne mase počinju da se šire, pa postaju lakše od masa u okolini, te se zbog toga izdižu na više nivo, gdje se dalje šire i rashlađuju. Kada se ostvari dovoljan stepen hlađenja, nastaje saturacija i formiranje oblaka, koji zapravo tada postaju vidljivi, pošto počinju da reflektuju svjetlost na sitnim česticama vode i leda. Pomenimo i **frontalno** ili **konvergentno izdizanje**, koje se stvara kod kontakta dvije vazdušne mase različitih temperatura i vlažnosti, pri čemu se hladnija masa (sa manje vlage) kao teža, podvlači pod toplu (i vlažniju) i izdiže je.

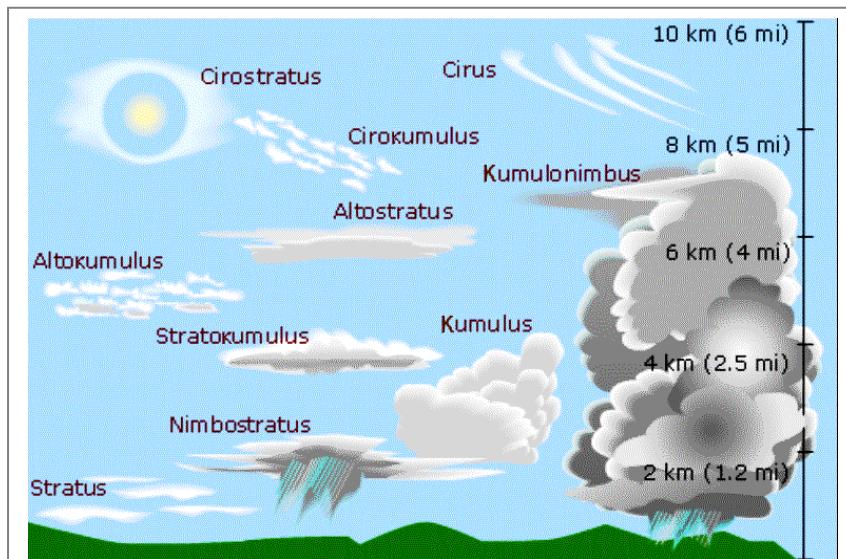
U meteorologiji se razlikuju tri osnovne vrsta oblaka i više podvrsta, zavisno od njihovog oblika i položaja u atmosferi. Osnovni tipovi su: **cirusi**, **stratusi** i **kumulusi** (slika 20).

Cirusi se nazivaju i “visoki oblaci” i većinom su komponovani od sitnih kristala leda, koji su rijetko tanji od 1 kilometar, a zauzimaju visinu između 5 i 13 kilometara. Oni su obično prethodnica oluja, posebno ako dolaze iz pravca jugozapada i sjevero-zapada.

Stratusi su najčešće tanki oblaci, koji (u obliku tankih slojeva)*, zaližežu na visinama ispod 2000 metara, a grade ih čestice vode, a u hladnjim klimatima - ledeni kristali. Nastaju kada se topli i vlažan vazduh lagano izdiže preko mase hladnog vazduha. U visokim planinskim područjima ovi oblaci se prepoznaju po svojstvu da teže da “obuhvate” planinske vrhove. Njihov izgled je taman i najčešće nose kišu.

Kumulusi su mali, talasasti, sa ravnom osnovom, bijeli oblaci, obično rasuti po nebu. Kumulusi obično leže na visinama ispod 2 kilometra (čak i do 500 metara) i obično najavljuju dobre vremenske prilike.

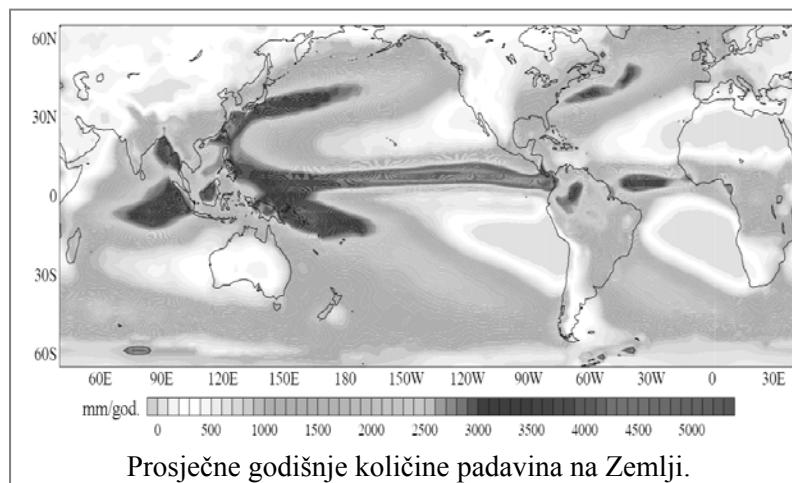
Kao i stratuse, čine ih sitne čestice vlage. Stvaraju se obično kada Sunce zagrijeva “džepove” vlažnog vazduha (npr. u dolinama pored rijeka ili jezera) izazivajući njegovo brzo uzdizanje, kada se taj vazduh hlađi i stvara jastučaste i paperjaste oblike na nebu, zbog kondenzacije čestica vlage.



Slika 20. Vrste i tipovi oblaka.

Kombinacijom naziva ove tri osnovne vrste (stratokumulusi, cirostratusi, cirokumulusi, kumulonimbusi, nimbostratusi itd.) označavaju se brojni mogući varijeteti formi i položaja oblaka (slika 20).

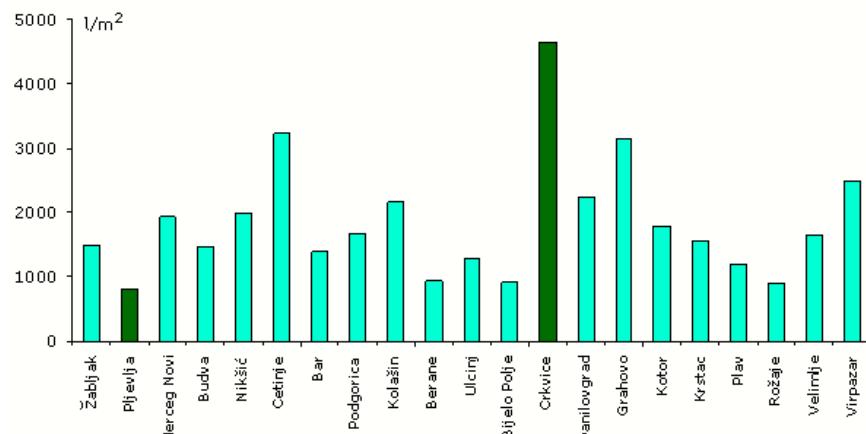
Padavine u meteorološkom smislu se mogu definisati kao vodeni depozit u tečnom ili čvrstom stanju, koji se stvara u vlagom saturisanim atmosferskim uslovima – oblacima. Padavine obuhvataju: kišu, ledenu kišu, snijeg i grád. Magla predstavlja zapravo oblak zasićen vlagom uz samu zemljinu površ. Raspored padavina na zemljinoj površi, kao što smo to već opisali, generalno je kontrolisan odsustvom ili prisustvom mehanizama koji uzdižu vazdušne mase, što uslovjava saturaciju vlage, kao i samim sadržajem vlage u vazduhu. Na raspored padavina na tlo može uticati prisustvo vegetacije na taj način što zadržava dio padavina, zavisno od strukture grana drveća, kao i količine lišća na drvetu. Dio padavina uopšte ne dospijeva do tla, pošto se isparava sa lišća direktno nazad u atmosferu. Manji dio padavina može preko lišća, stabla i korijenog sistema drveta, dospijeti u tlo.



Prosječne godišnje količine padavina na Zemlji.

* po čemu su i dobili ime: **stratos** na grčkom znači sloj.

Evaporacija (isparavanje) i **transpiracija** su dva procesa koja prevode vodu sa zemljine površi u atmosferu. Evaporacija je proces isparavanja slobodne vode u atmosferu u vidu gasa (pare), za što je potrebna velika količina energije. Transpiracija je mehanizam prevođenja vode kroz biljke do atmosfere. Korsiti se i kovanica evezotranspiracija, za istovremeno opisivanje oba procesa.



Srednja godišnja suma padavina (litara/m²) za klimatski period 1961.-1990. godina (Hidrometeorološki zavod Crne Gore). Ekstremi: Crkvice (maksimum) i Pljevlja (minimum) su posebno istaknuti.

Od meteoroloških pojava, pomenimo i **grmljavinu**, koja predstavlja oblik manifestacije lošeg vremena, okarakterisana prisustvom stvaranja munja. Često se javlja zajedno sa pljuskovima. Grmljavina se manifestuje kada su ostvarena tri uslova: dovoljno vlage akumulirane u donjem dijelu atmosfere, značajan pad temperature sa povećanjem visine i prisustvo sile uzgona, kao što je hladan front, koji će pomjeriti vlažni vazduh u niskotemperaturne, visoke nivoje atmosfere. Razvoj procesa stvaranja grmljavine teče na taj način što vlažne vazdušne mase bivaju izdignute u oblasti gdje se vlaga naglo hlađi i kondenuje u kapljice vode i sitne kristale leda, (tada se takve vazdušne mase manifestuju kao oblaci tipa kumulusa). Kada količina kondenzovane vode i kristala leda postane velika, gornji sloj oblaka će se raširiti, tako da oblak dobija formu nakovnja, a ta forma oblaka se naziva kumulonimbusom. Sitne kapljice vode i kristala leda će se kondenzovati dalje u veće kapljice i kristale, koji će zatim započeti da padaju uslijed dejstva gravitacione sile Zemlje. Zbog još uvijek prisutnog uzgona toplog vazduha iz donjih slojeva, tada će nastati turbulentacija zbog sudara ova dva suprotno orijentisana procesa, stvarajući turbulentiju, buru i snažni vjetar, grmljavinu, pa čak i uragane. Zbog međusobnog trenja kristala leda u procesu turbulentacije, stvara se snažno statičko nanelektrisanje. Pozitivno nanelektrisani kristali teže da se pozicioniraju u gornjem dijelu oblaka, izazivajući u tom dijelu oblaka pozitivno nanelektrisanje, dok se negativno nanelektrisani kristali leda i formirane grudvice grada spuštaju u središnje i donje djelove oblaka, stvarajući negativno statičko nanelektrisanje u tom dijelu.

Kumulonimbusi koji ne stvore dovoljno kristala leda neće biti u stanju ni da proizvedu dovoljno statičkog nanelektrisanja za stvaranje grmljavine, odnosno munja. Zemlja je negativno nanelektrisana u odnosu na atmosferu, ali kada se nanelektrisani oblak kumulonimbus kreće iznad tla, negativno nanelektrisanje na dnu oblaka će



Električno pražnjenje između oblaka i tla.

izazvati pozitivno nanelektrisanje u tlu, više kilometara uokolo. Kada pozitivno i negativno nanelektrisanje značajno narastu, tako da postignu dovoljnu razliku potencijala između tla i oblaka, nastaje električno pražnjenje između njih, stvarajući grom, odnosno varnicu između oblaka i tla, ili munju. Ovakvo pražnjenje se događa ne samo između oblaka i tla, već vrlo česti i između samih oblaka.

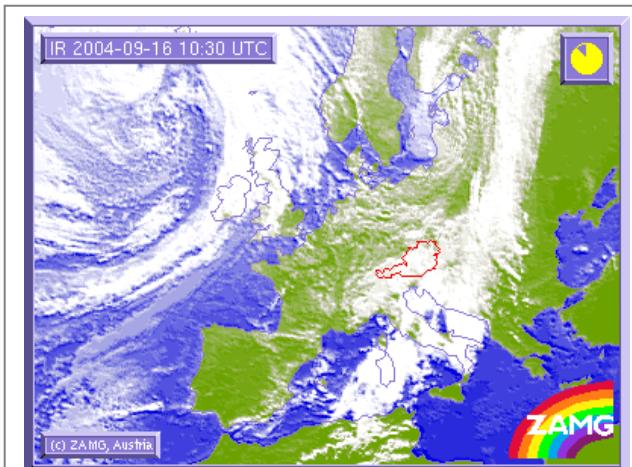
4.1.3. Vremenska prognoza

Značaj uspješne kratkoročne prognoze meteorološkog vremena, posebno olujnog nevremena, gráda, orkana i slično, je izuzetno veliki, posebno za oblast poljoprivrede, transporta, ali i svakodnevnih životnih potreba.

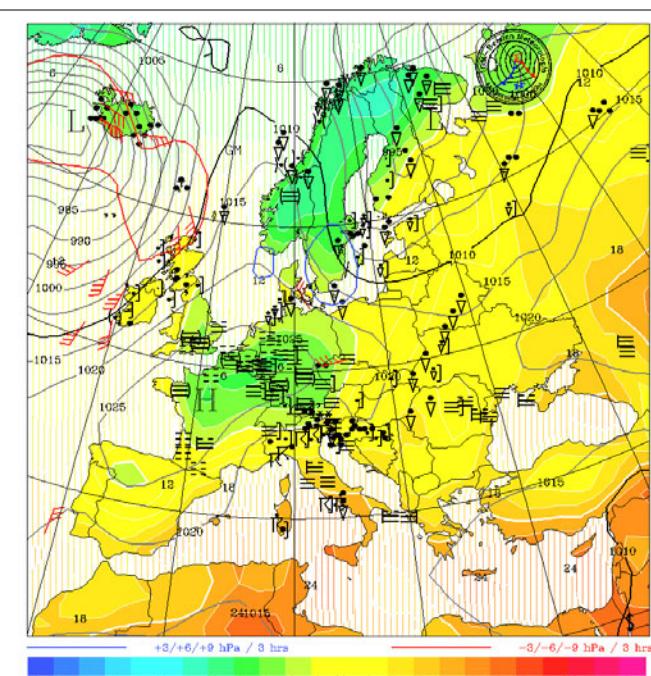
Prognoza vremena, odnosno meteoroloških prilika, je vrlo kompleksan proces koji obuhvata primjenu matematičkih metoda baziranih na numeričkom modelovanju meteoroloških procesa i interpretaciju (tumačenje) modelovanih rezultata. Numerički model je zapravo hidrodinamički model, sa gustom mrežom podataka u horizontalnoj ravni, sa većim brojem atmosferskih slojeva, prilagođen orografskim regionalnim i lokalnim uslovima. Model mora biti funkcionalno izražen kroz vremensku (temporalnu) komponentu kako bi mogao sadržati prognozni karakter procesa koji se modeluje. Zbog brzih meteoroloških promjena i potreba povećanja tačnosti prognoza, u većim meteorološkim centrima, numeričko modelovanje se obavlja nekoliko puta u toku 24 časa, svakog dana.

U takvom proračunu se primjenjuju najmoćniji računari (sada su to računari sa paralelnim procesorima i tzv. superkompjuteri) zbog ogromnog broja parametara i računskih operacija koje takvo modelovanje mora da obuhvati. Kvalitetni meteorološki model integriše čak i hidrološke elemente (sa podacima o stanju vodenih statičkih i dinamičkih površina), kao i stanje atmosferskog zagadenja u regionu.

Proces pripreme proračuna prognoze obuhvata ogromnu količinu podataka osmatranja meteoroloških pojava na velikom broju meteoroloških stanica širom Sjevera, kao i podataka dobijenih snimanjem posebnim meteorološkim sondama (vezanim za balone) koje se svakodnevno lansiraju sa Zemlje u visoke slojeve atmosfere. Posebna pomoć kvalitetnijem



Slika 21. Satelitski snimak sistema oblaka nad Evropom u IC (infracrvenom) domenu (austrijska meteorološka služba ZAMG), na dan 16. septembra 2004. godine u 16:30 časova (UTC).



Slika 22. Izgled prognozne karte vremena za 17. septembar 2004. godine, sa prognozom pada-vina, temperature i vazdušnog pritiska.

prognoziranju vremena ostvaruje se osmatranjem meteoroloških pojava i procesa pomoću specijalnih meteoroloških geostacionarnih* i polarnih satelita, opremljenih posebnim uređajima za praćenje i snimanje brojnih fizičkih parametara u atmosferi. Na slici 21 prikazan je satelitski snimak u IC (infracrvenom) talasnom dijelu spektra za područje Evrope na dan 16. septembra 2004. godine (u 16:30 UTC[†]). Na tom snimku se uočavaju dva fronta niskog vazdušnog pritiska, koji nose padavine.

Kratkoročne meteorološke prognoze (za nekoliko narednih sati do nekoliko narednih dana) se obično prikazuju na tzv. kartama vremena, sa simbolički izraženim meteorološkim parametrima: očekivanim padavinama (intenzitetom i vrstama), temperaturama i sl. Slika 22 sadrži jedan primjer takve prognozne karte (24 časa unaprijed) za područje Evrope, za 17. septembar 2004. godine (predviđa dalji razvoj sistema oblačnosti sa slike 21). Ova prognoza izražava očekivane vrste i količine padavina, maksimalne temperature, kao i pravce kretanja vazdušnih masa. Ispostavilo se da je ova kratkoročna prognoza bila potpuno uspješna. Stepen uspješnosti današnjih meteoroloških kratkoročnih prognoza, koje su bazirane na osmatranju više od 6.000 meteoroloških stаница и мрежи meteoroloških satelita, dostiže 86% за jednodnevne, dok stepen tačnosti za višednevne prognoze naglo opada, pa se može smatrati da prognoze za preko 5 dana nijesu pouzdane.

Klasifikacija klimata: Prema srednjoj godišnjoj i srednjoj mjesечноj temperaturi i količini padavina, izvršena je klasifikacija klimatskih oblasti, ili klimata na Zemlji u sljedećem obliku:

- **Tropska vlažna klima**, u kojoj svi mjeseci imaju srednju temperaturu iznad 18°C . Ovaj klimat zahvata pojas od ekvatora do geografskih širina između 15° i 25° (sjeverno i južno). Ukupne godišnje prosječne padavine u ovim oblastima prelaze 1.500 mm.
- **Suvi klimat** se odlikuje deficitom padavina tokom većeg perioda godine, te je potencijal evaporacije i transpiracije znatno iznad realnih količina padavina. Ovaj klimat se prostire između 20° i 35° geografske širine, sjeverno i južno od ekvatora, a u prostranim kontinenatalnim regionima srednjih geografskih širina, često je okružen planinama.
- **Vlažni suptropski klimat** srednjih geografskih širina u većini ima topla i vlažna ljeta i blage zime. Zauzima prostor između 30° i 50° geografske širine, većinom na istočnim i zapadnim granicama kontinenata. Za vrijeme zime, glavna meteorološka karakteristika tih prostora su cikloni na srednjim geografskim širinama, dok turbulentne oluje dominiraju ljetnjim mjesecima.
- **Vlažni kontinentalni klimat srednjih širina** ima topla do hladna ljeta i hladne zime. Prostire se na širinama iznad prethodnog – vlažnog suptropskog klimata. Srednje temperature najtoplijeg mjeseca su iznad 10°C , a najhladnijeg ispod -30°C . Zime su oštре, sa sniježnim mećavama i ledenim vjetrom iz polarnih oblasti.
- **Polarni klimat** ima cjelogodišnje niske temperature, sa srednjom temperaturom u najtoplijem mjesecu ispod $+10^{\circ}\text{C}$. Polarni klimat se nalazi na sjevernoj obalskoj liniji sjeverne Amerike, Evrope, Azije, kao i na kopnenom dijelu Grenlanda i Antarktika.

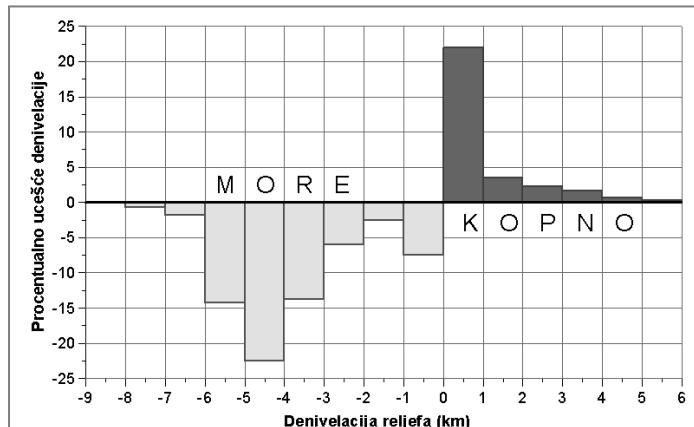
* Geostacionarni meteorološki sateliti rotiraju na orbitama 36.000 kilometara iznad Zemlje, sa istom ugaonom brzinom kao Zemlja, tako da oni prividno stoje iznad jedne tačke na Zemlji. Polarno orbitirajući meteorološki sateliti rotiraju na gotovo kružnim orbitama, na znatno manjoj visini - između 800 i 1.500 kilometara, pri čemu njihove orbite prolaze blizu zemljinih polova.

† UTC (universal time coordinated) svjetsko referentno vrijeme, prema nultom meridijanu Grinič (Greenwich).

4.2. Hidrosfera i Hidrologija

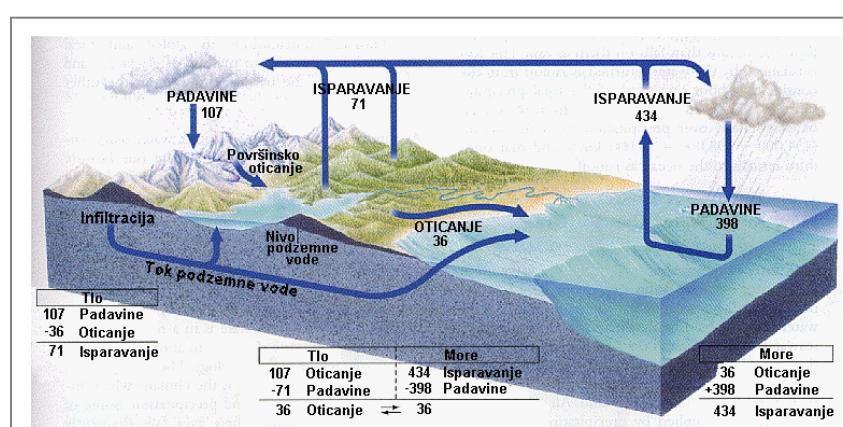
Pod hidrosferom se podrazumijeva dio Zemlje u kojem dominira voda. To su zapravo okeani, morske, jezerske i rječne površi i relativno plitki dio zemljine kore natopljen podzemnom vodom. Kao što smo već vidjeli, značajan dio vode nalazi se i u atmosferi, u stalnom kružnom ciklusu, od velikog značaja za očuvanje i razvoj živog svijeta na Zemlji.

Postoje samo tri velika okeana: **Tihij, Atlantski i Indijski**, a svi zajedno se često nazivaju i svjetski ocean. Okeani pokrivaju čitavih 71 % ukupne zemljine površi, kako smo već konstatovali, dok je prosječna dubina okeana 3,8 kilometara, sa najvećom dubinom u okeanskem rovu Marijana kod filipinskih ostrva u Tihom Okeanu, od 11 kilometara. Ukupna zapremina vode u okeanima od oko 1,3 milijarde kubih kilometara (ili 97,0 % od ukupne količine vode na Zemlji) se mijenja tokom vremena, zavisno od količine vode koja učestvuje u formiranju glečera, odnosno koja se oslobođa njihovim topljenjem. Oko 29 miliona kubnih kilometara vode je zarobljeno u glečerima i ledenim kapama na polovima (što čini oko 2 % od ukupne količine vode na Zemlji). U obliku podzemne vode u tlu nalazi se oko 9,5 miliona kubnih kilometara (0,7 % ukupne količine). Ostatak od samo 200 hiljada kubnih kilometara kruži u ostalim prirodnim rezervoarima: jezerima, rijekama, atmosferi i biosferi.



Procentualno učešće stepena denivelacije reljefa na kopnu i moru - u ukupnoj površini Zemlje.

Slično kao i za porijeklo atmosfere, smatra se da je voda na Zemlji nastala najvećim dijelom kondenzovanjem iz vrele magme i njenih gasova tokom prvih nekoliko stotina mili-ona godina. Po drugoj hipotezi, vodu je na Zemlju (prije više od 3,5 milijardi godina) donijela neka veća kometa (za koje je inače poznato da nose znatne količine zamrznute vode u svom jezgru) u nekom davnom bliskom kontaktu sa



Slika 23. Šematski izgled kružnog toka vode u prirodi sa bilansom padavina, isparavanja i oticanja na kopnu i moru. Cifre predstavljaju hiljade kubnih kilometara, odnosno milijarde kubnih metara vode (10^{12} m^3) u toku jedne godine.

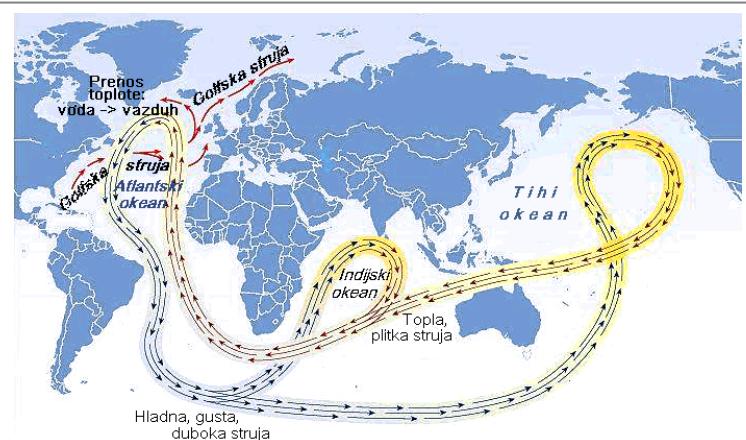
Kružni tok vode u prirodi, koji izražava konceptualni model kretanja vode između atmosfere, litosfere* i hidrosfere, poznat nam je iz gradiva geografije iz srednje škole. Ipak, radi kratkog

* Pod litosferom se u geologiji podrazumijeva sloj očvrslih stijena (*litos* /gr./ - kamen, stijena) koji se prostire od zemljine površi do dubine od oko 140 kilometara, iako ta granica nije oštra, s obzirom da razdvaja materijal

podsjećanja, na slici 23 ovaj proces je ilustrovan primjerom numerički izraženog bilansa hidrološkog ciklusa, preko padavina, isparavanja i oticanja na moru i kopnu. Cifre u bilansu iskazuju količinu vode u milijardama kubnih metara, odnosno hiljadama kubnih kilometara u toku jedne godine. Sa vodenih površi, tokom jedne godine ispari ukupno 434 hiljade kubnih kilometara vode, od čega se putem padavima na iste te površi vrati 398 hiljada kubnih kilometara. Razlika od 36 hiljada kubnih kilometara biva vjetrovima transportovana ka kopnu, gdje se u vidu padavina ukupno obori 107 hiljada kubnih kilometara, dok sa te površine ispari ukupno 71 hiljadu kubnih kilometara. Putem površinskog i podzemnog oticanja (dreniranja), u more se vraća 36 hiljada kubnih kilometara (upravo onoliko koliko je transportovano sa površina okeana) i na taj se način hidrološki ciklus zatvara, svakako - bez gubitaka.

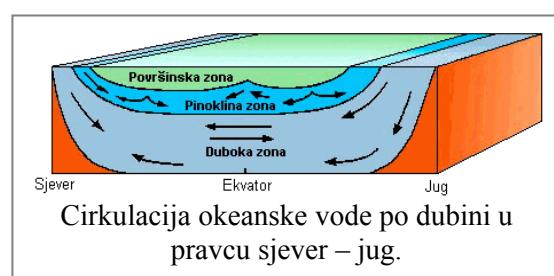
Značajna razlika u količini energije koje stiže sa Sunca u područje ekvatora u odnosu na polarne predjele, kao što smo vidjeli u prethodnom poglavlju o atmosferi, stvara velike temperaturne razlike između tih prostranih regiona. Pokretanje vazdušnih i vodenih masa okeana kontrolisano je upravo postojanjem tog termičkog gradijenta, a krajnji rezultat je sadržan u transportu toplotne energije iz pojasa ekvatora u polarne predjele. Polovina toplotnog toka na prostoru cijele planete obavlja se u procesu okeanske cirkulacije, te su zato okeani izuzetno važan dio cijelog klimatskog sistema na Zemlji. Eventualna promjena režima okeanskih cirkulacija globalnim zagrijevanjem planete, sigurno bi značajno uticala i na globalne klimatske promjene.

Okeanska cirkulacija omogućuje i značajan transport kiseonika – iz vazduha u okeane, omogućujući život cijelog morskog svijeta. Morska voda u okeanima se praktično bez prekida kreće na svom dugom putu oko Zemlje, strujanjem duž širokih pojasa, kontrolisanih razlikom u temperaturi. Računa se da je okeanskoj vodi potrebno oko 1.000 godina za jedan cijelokupan kružni ciklus oko Zemlje. Na slici 24 prikazan je šematizovan izgled globalne okeanske cirkulacije, odnosno označena trasa globalnog toka površinskih toplih i hladnih voda u dubljim djelovima okeana, pri čemu je posebno naznačen položaj i pravac kretanja Golfske struje ka prostoru sjevernog Atlantika, kao i prostor hladnih voda Antarktika.



Slika 24. Šema cirkulacije okeana: Golfska struja, duboke vode sjevernog Atlantika i hladne vode Antarktika.

Cirkulacijom se transportuju površinske tople vode okeana u polarne regije, gdje se njenim hlađenjem oslobađa toplota koja zagrijeva vazduh. Rashlađena voda postaje gušća i teža, zbog čega tone ka dnu okeana, stvarajući struje koje potiskuju te dublje vode ka ekuatoru. Na tom putu, duboke okeanske struje nailaze na neravno okeansko dno, koje značajno modifikuje njihovo kretanje, izaziva njihovu turbulenciju i djelimično izdizanje. Kao što smo pomenuli, vjetar takođe značajno utiče na kretanje vodenih masa, ali i na njihovo miješanje. Dakle, ukupno kretanje

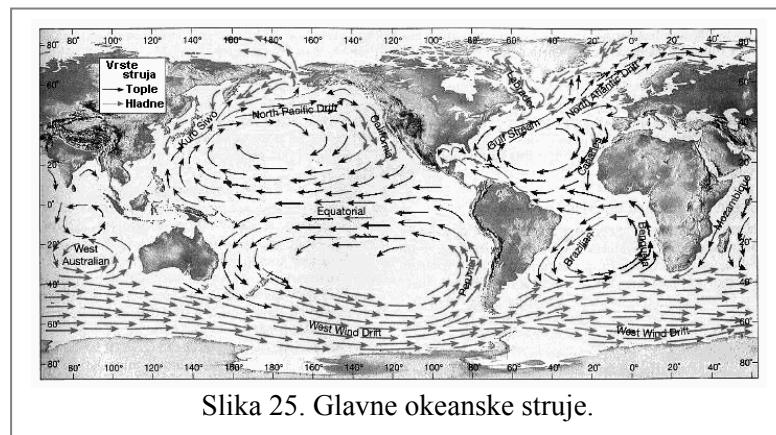


Cirkulacija okeanske vode po dubini u pravcu sjever – jug.

zemljine unutrašnjosti koji može pružiti otpor deformaciji (posjeduje elastična, ali i plastična svojstva) od materijala koji je, zbog visoke temperature (oko 1.200°C), izgubio ta svojstva (postao plastičan i tečan). Ispod litosfere se nalazi sloj astenosfere.

vodenih i vazdušnih masa je jedinstven globalni interaktivni, vrlo sofisticirani proces, koji obezbjedi adekvatnu distribuciju toplotne energije širom planete, istovremeno sprječavajući pregrijevanje i pretjerano rashlađivanje cijele njene površine, uz obezbjeđenje neophodne cirkulacije kiseonika u cijelom tom složenom sistemu.

Za područje Mediterana, Evrope, ali i cijelog Sviljeta, od izuzetnog značaja je postojanje Golfske struje. Golfska struja, koju zapravo pokreću vjetrovi, prenosi vrlo tople tropске struje iz Karipskog mora i Meksičkog zaliva iz prostora srednje Amerike, preko sjevernog Atlantika do sjeverne Evrope (slike 24 i 25). Toplota te vode zagrijeva vazduh iznad nje, a dalje kretanje tako zagrijanog vazduha je način prenošenja topote - u pravcu sjevera. Kao posljedica takvog transporta topotne energije, Evropa je znatno toplija u odnosu na prostore istih geografskih širina u Sjevernoj Americi i širom Tihog Okeana. Dugogodišnja osmatranja ukazuju da je, kao rezultat postojanja Golfske struje, srednja godišnja temperatura u Evropi za 9°C viša od temperature regiona na istim geografskim širinama drugih djelova naše planete.

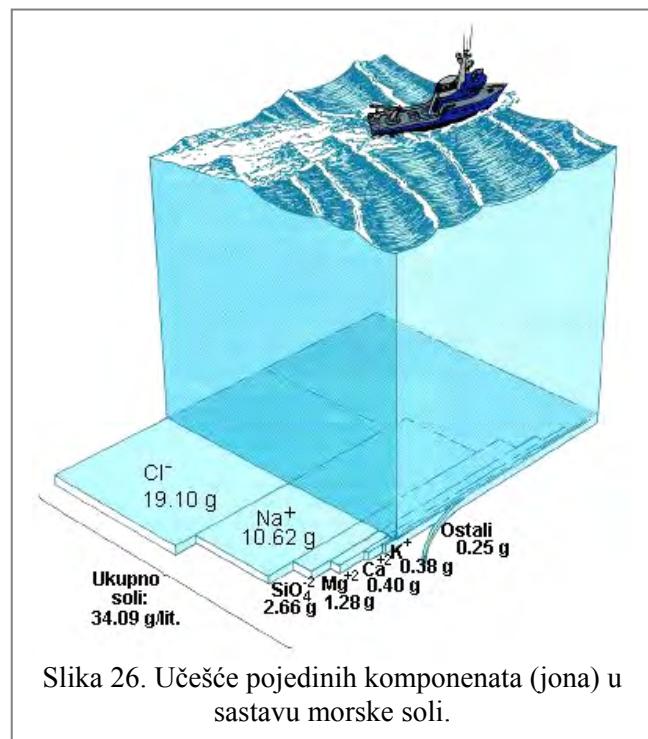


Slika 25. Glavne okeanske struje.

Unutar svih tri okeana, slika kretanja vodenih masa je slična. U svakom od njih, okeanske struje formiraju zatvorene strujne tokove i to u suptropskim predjelima, koji su centrirani na oko 30 stepeni geografske širine, na sjevernoj i južnoj hemisferi (slika 25). Okeanske struje se međusobno značajno razlikuju – pravcem kretanja, brzinom toka i temperaturom vode.

Voda u okeanima sadrži značajnu koncentraciju **soli**, koja je unijeta u okeane kroz procese hemijskog rastvaranja i spiranja stijena zemljine kore, kao i rastvaranjem sadržaja gasnih isparenja podvodnih vulkana. Salinitet vode u okeanima, ili učešće soli (razloženih jona nekoliko elemenata) u ukupnoj zapremini u okeanima, iznosi između 33 i 37 grama na litar (djelova na hiljadu), odnosno u prosjeku 34 g/l. Morsku so čine hlor (Cl) i natrijum (Na) sa ukupno 87,2 %, a sa znatno manjim učešćem (ukupno 12,1 %): SiO_4 , Mg , Ca , K , dok ostatak od 0,7 % predstavljaju: S , K , Br i HCO_3 . Na slici 26 grafički je ilustrovano apsolutno učešće pojedinih elemenata (sa njihovom atomskom valentnošću) u prosječnom sastavu jednog litra okeanske vode (sa ukupno 34,09 grama na litar soli).

Variranje sastava soli u svjetskim okeanima može biti uslovljeno razlikom u količini padavina, prisustvom vegetacije, razlikom u stepenu isparavanja, prisustvom vodenih tokova i apsorbovanjem pojedinih elemenata u glinovitim sedimentima. Salinitet je veći u vodama na srednjim geografskim širinama djelovima. Sličan je slučaj i sa basenima u kojima



Slika 26. Učešće pojedinih komponenata (jona) u sastavu morske soli

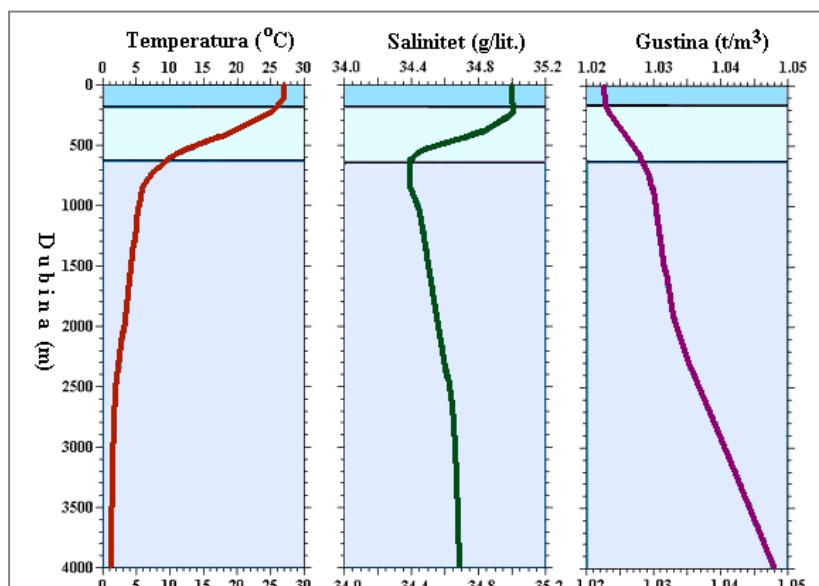
svjetskim okeanom, kao što je to Sredozemno More, gdje salinitet može dostići i 41 gram na litar. U zonama blizu ekvatora, zbog većih količina padavina od isparavanja (koje je takođe povećano u tim krajevima) salinitet je nešto niži od prosjeka.

Temperatura površinske vode u okeanima, takođe varira sa geografskim položajem i to od blizu 0 °C na polovima do 29 °C u ekvatorijalnom pojasu. Temperatura u djelovima okeana sa ograničenom razmjjenom vode sa svjetskim okeanom, može dostići i 37 °C. Na slici 27 je prikazana zavisnost najznačajnijih fizičkih parametara vode (prosječne vrijednosti) u funkciji dubine: temperatura, salinitet i gustina. Dijagram promjene temperature (tzv. izoklina) u zoni površinskih voda, do dubine od oko 200 metara zadržava približno ujednačenu vrijednost od oko 27 °C, a zatim, u zoni plitkog mora (do dubine od oko 600 metara) temperatura naglo opada do oko 9 °C, da bi se taj trend zatim, u zoni dubokog mora, ublažio do dubine od oko 2,5 kilometra, kada temperatura dostiže svega 2,5 °C i dalje, ka većim dubinama, nastavlja vrlo sporo da opada.,

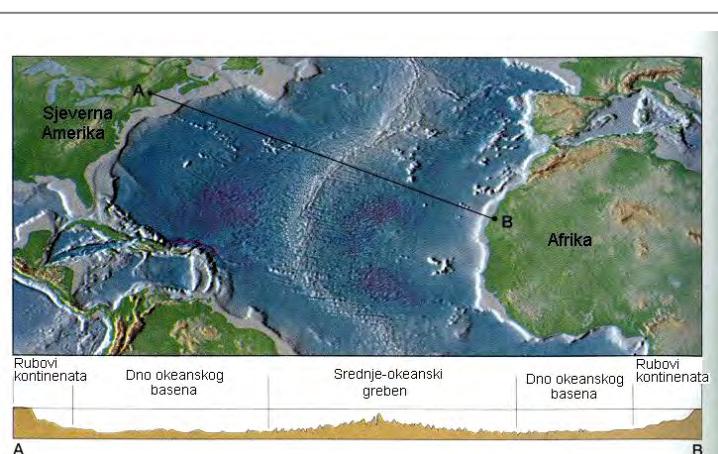
Salinitet sa dubinom se ponaša slično temperaturi do donje granice plitkih voda (oko 600 metara): opada sa prosječnih vrijednosti od 35 g/l na samoj površi okeana do 34,4 na toj dubini. Poslije ove dubine, salinitet počinje blago da raste, da bi na dubini od 2,5 kilometara dostigao vrijednost od 34,6 g/l i dalje nastavio vrlo blagi trend rasta (slika 27).

Gustina vode, radi konstantnog povećanja pritiska sa dubinom, ima trend stavnog rasta – od 1,022 t/m³ na morskoj površi - do 1,048 t/m³ na dubini od 4 kilometra, sa tendencijom daljeg rasta na većim dubinama (slika 27).

Oceansko dno ima sličan izgled kao i reljef kopna. Uz rubove kontinenata, dno je vrlo plitko i blago nagnuto ka dubljim zonama. Ovaj dio dna se naziva **kontinentalni šelf** i obično je u tim djelovima more plićé od par stotina metara. Kontinentalni šelf ka otvorenom moru prelazi u okeanski basen, sa znatno većim dubinama, koje variraju između 3 i 11 kilometara. Na slici 28 je prikazan profil sa reljefom dna



Slika 27. Promjena temperature, saliniteta i gustine vode okeana sa dubinom. Površinski sloj do 200 metara i sloj plitkoh voda do oko 600 metara prikazani su različitim nijansama šrafure u odnosu na duboke vodene mase.



Slika 28. Izgled reljefa dna Atlantskog okeana, na potezu između istočne Kanade i zapadne Afrike, preko atlantskog grebena.

na potezu između istočne Kanade i zapadne Afrike, na kojem se vidi oblik i položaj kontinentalnih rubova, odnosno šelfa, a u centralnom dijelu prisustvo izdignutog okeanskog grebena.

4.2.1. Plima okeana

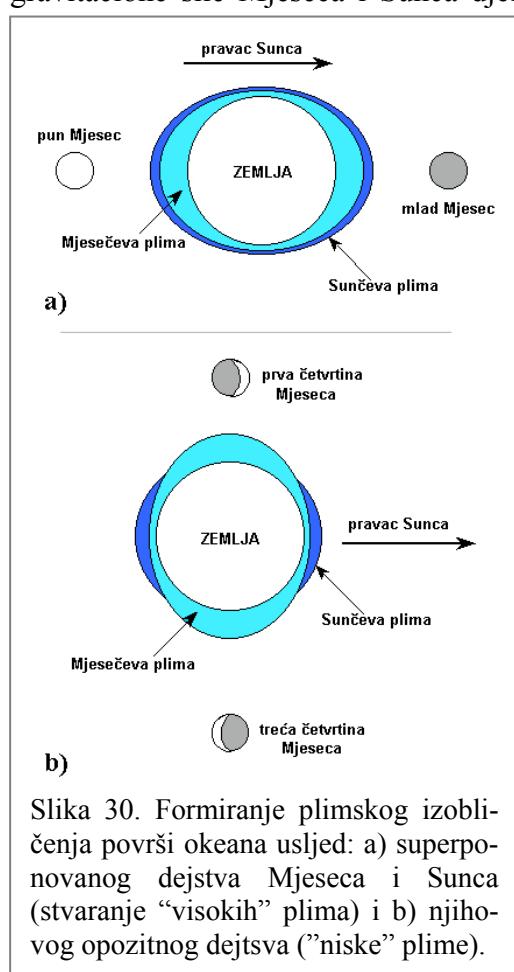
Ciklično izdizanje nivoa morske vode zbog gravitacionog uticaja Mjeseca i Sunca na vodenu masu svjetskog okeana, poznato je pod imenom **plima**. Vrijeme pojave plime i njen intenzitet zavisi od međusobnog odnosa tačke posmatranja na Zemlji u odnosu na položaj Mjeseca i Sunca, perioda revolucije Mjeseca oko Zemlje, kao i nagiba mjesecove orbite u odnosu na Zemlju. Uticaj Mjeseca na formiranje plime je praktično dvostruko veći od uticaja Sunca, zbog, kako smo već naglasili, njegovog znatno manjeg rastojanja od Zemlje, s jedne i načina opadanja gravitacione sile sa rastojanjem (proporcionalno odnosu mase objekta i kvadrata njegovog rastojanja od tačke posmatranja m/r^2) s druge strane.

Najveće plime ("visoke") se javljaju kada se poravnaju pravci gravitacionog djelovanja Mjeseca i Sunca (slike 29 i 30a) u odnosu na Zemlju (prema Suncu, dakle u fazi "mladog" Mjeseca i na suprotnoj strani – za vrijeme "punog" Mjeseca). Kada gravitacione sile Mjeseca i Sunca djeluju na vodene

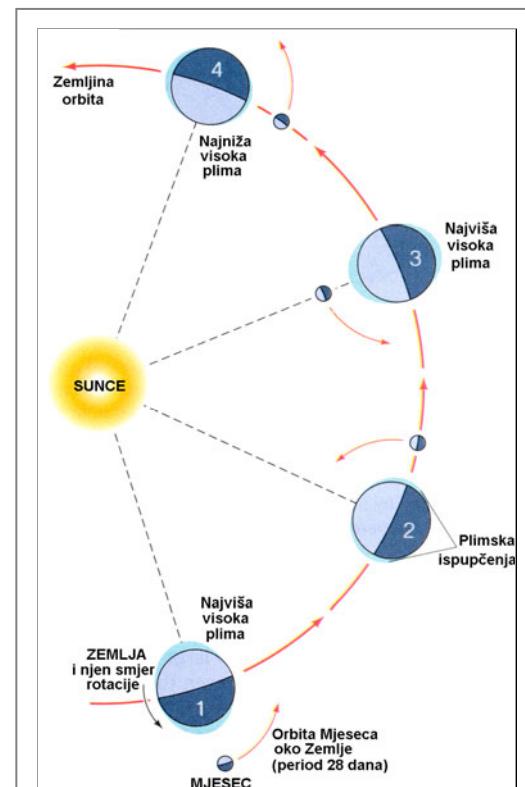
mase pod pravim uglovim u

odnosu na Zemlju (slika 30b), javljaju se plime najnižeg intenziteta ("niske"). Istovremeno, nešto manje izdizanje vode okeana javlja se i na suprotnoj strani Zemlje – zbog gravitacione i centrifugalne kompenzacije procesa premještanja vodenih masa. Ta ispupčenja zadržavaju svoj oblik dok se Zemlja okreće oko svoje ose, što rezultira ritmičkim izdizanjem i spuštanjem nivoa u morima i okeanima, dobro uočljivim na njihovim obalama.

Geometrija okeana (oblici basena, obalske linije, zalivi) ima velikog uticaja na lokalno ponašanje plimskih talasa. Ipak, na nivou globalnih kretanja, plime se smjenjuju po vrlo pravilnom, ritmičkom ciklusu, sa periodom od 24 časa i 50 minuta, s obzirom da Mjesec rotira oko Zemlje za 27,32 dana, te će se ista tačka na Zemlji tokom svakog obrtanja oko zemljine ose, naći za oko 50 minuta svakog dana kasnije u istom položaju relativno u odnosu na Mjesec. Kada Mjesec rotira u ravni zemljinih ekvatora (ekliptike), javljaju se dvije "visoke" i dvije "niske" plime, svakih 12 časova i 25 minuta, kao rezultat prolaska svakog dijela plimskog ispupčenja preko svake tačke na Zemlji.



Slika 30. Formiranje plimskog izobličenja površi okeana uslijed: a) superponovanog dejstva Mjeseca i Sunca (stvaranje "visokih" plima) i b) njihovog opozitnog dejstva ("niske" plime).



Slika 29. Šematski prikaz načina nastanka plima na Zemlji uslijed dejstva Mjeseca i Sunca.

Zbog najčešćeg položaja Mjeseca na putanji koja je nagnuta u odnosu na ravan ekliptike (maksimalno $5^{\circ}09'$) i zavisno od mesta na Zemlji, plime će se u većini slučajeva različito manifestovati po svojoj učestanosti i intenzitetu.

Amplitudni raspon plime obično iznosi do 2 metra (u Jadranskom moru do 50 cm), ali u nekim morskim tjesnacima, plima može biti vrlo velika, a struje formirane efektom plime vrlo brze, izazivajući variranje nivoa vode i do 16 metara.

Kada Mjesec ne bi rotirao oko Zemlje, glavna plimska ispuštenja vodene mase uvijek bi bila orijentisana direktno ka Mjesecu, zbog njegovog znatno većeg gravitacionog uticaja u odnosu na Sunce. Međutim, zbog kretanja Mjeseca oko Zemlje, on svojim gravitacionim dejstvom "povlači" vodu za sobom, ali zbog trenja vodenih masa u kretanju i zbog njihove inercije, nastaje izvjesno kašnjenje od 2.9 lučna stepena između položaja Mjeseca i maksimalne plime, ili izraženo u vremenu, to kašnjenje iznosi oko 12 minuta.

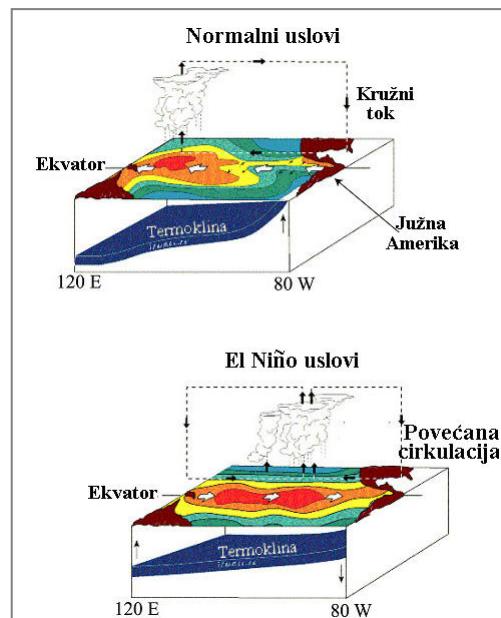
Zbog disipacije energije rotacije Zemlje u ovom procesu, brzina zemljine rotacije se smanjuje za izvjesnu malu vrijednost, pa se dužina dana produžava za 2.4 milisekunde na jedan vijek. Istovremeno, zbog prenošenja dijela mometa rotacije na Mjesec u ovom rotacionom sistemu, Mjesec se zbog toga sve brže kreće na putanji oko Zemlje, pa se zato udaljava od Zemlje brzinom od 3.7 centimetara godišnje.

Gravitacione sile Mjeseca i Sunca izazivaju ne samo plimu voda okeana, već i same zemljine unutrašnjosti, koja je najvećim dijelom viskozna i tečna. Tako izazvane plimske deformacije samo uslijed dejstva Mjeseca, dostižu amplitude od preko pola metra. Na taj fenomen ćemo se detaljnije osvrnuti kada budemo šire govorili o gravitacionom polju Zemlje i gravimetriji.

Okeanski fenomeni *El Niño* i *La Niña*

Navedimo i jednu karakterističnu meteorološku i hidrološku pojavu, čija je fenomenologija uspješno odgonačnuta tek skorošnjom upotrebljom meteoroloških satelita. To je zapravo dvostruki fenomen nazvan ***El Niño*** (španski: El Niño = dječak) i ***La Niña*** (španski La Niña = djevojčica) vezan za pojavu dugotrajnih topotoplinskih procesa u Tihom Okeanu, koji imaju značajan uticaj na globalne klimatske prilike na cijeloj Zemlji. Naime, El Niño je ime vezano za razvoj toplih okeanskih površinskih voda duž obala južne Amerike - Ekvadora i Perua (slika 31). Kada se ovo zagrijavanje javi, uobičajeno izdizanje hladne okeanske vode bogate hranljivim materijama, uslovljeno duvanjem zapadnih vjetrova (od obala južne Amerike ka filipinskim ostrvima) i rashla-đivanjem voda uz istočne obale, biva značajno umanjeno.

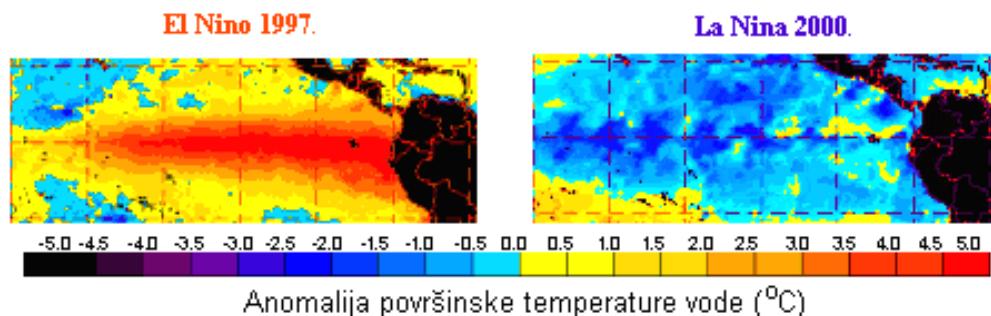
El Niño se obično javlja samim krajem kalendarske godine i traje najčešće par nedjelja do par mjeseci. Ponekad, pojava ovakvog fenomena sa ekstremno visokom temperaturom, može usloviti njegovo trajanje tokom znatno dužeg perioda. Tako, na primjer, El Niño koji je stvoren 1990. godine, trajao je pune četiri godine. Stvaranje fenomena El Niño vezan je za cikličnu cirkulaciju voda u Tihom Okeanu, poznatu kao južna oscilacija. Tokom El Niño perioda, vazdušni pritisak pada na širokom prostoru centralnog Tihog Okeana i duž obala južne Amerike, što za krajnju posljedicu ima promjenu režima vjetrova na



Slika 31. Mehanizam stvaranja El Niño fenomena.

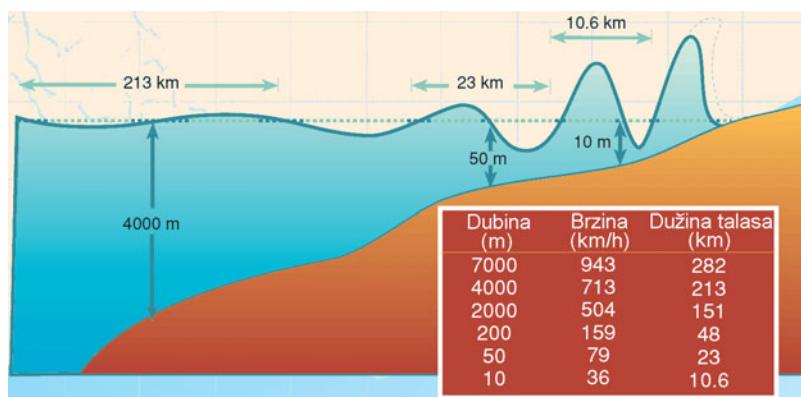
širem prostoru Tihog Okeana (slika 31). Značajno smanjenje intenziteta vjetrova dalje onemoguće hlađenje toplih morskih struja kod Perua i Ekvadora, izdizanje hranljivih materija iz dubljih zona, ali izaziva i pomjeranje režima kišnih padavina u ekvatorijalnim područjima južne Amerike, pa čak i formiranje oluja i uragana u centralnom Pacifiku (Tihom Okeanu).

Nakon El Niño događaja, vremenske prilike se obično vraćaju na normalni nivo. Međutim, ponekad, okeanski vjetrovi mogu postati izuzetno snažni, što može dovesti do anomalnog akumuliranja hladne okeanske vode u centralnom i istočnom dijelu Tihog Okeana. Ova pojava se naziva La Ninja. Jaka La Ninja se javila 1988. godine, a naučnici smatraju da je bila odgovorna za značajan pad temperature iznad cijelog centralnog regiona Sjeverne Amerike. Satelitski snimak termičke anomalije površi Tihog okeana, kod jednog tipičnog El Niño događaja tokom 1997. godine i La Ninja pojave iz 2000. godine, prikazani su na slici 32.



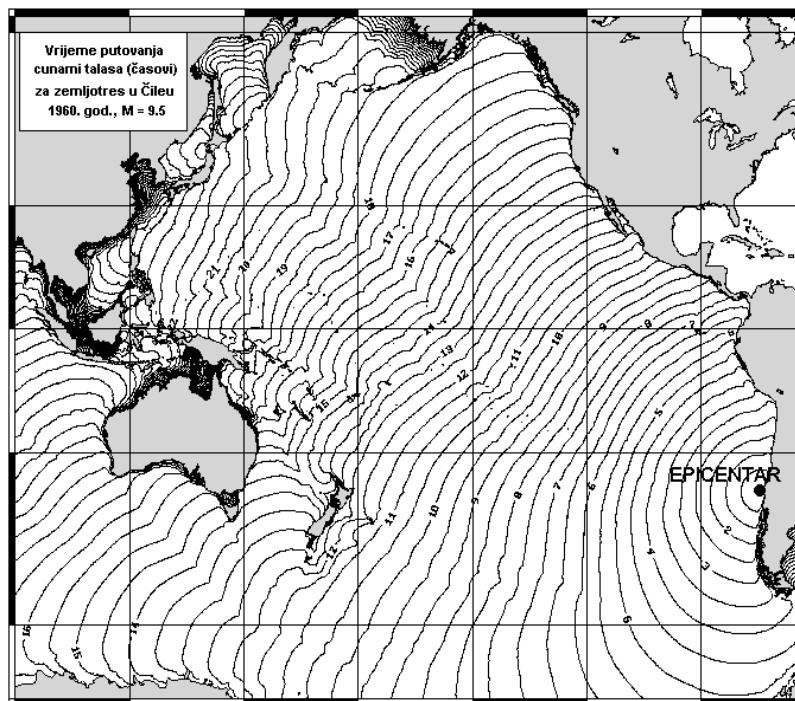
Slika 32. Satelitski snimak temperaturnog efekta fenomena El Niño iz 1997. godine (lijevo) i La Ninje iz 2000. godine u istočnom dijelu Tihog Okeana (obris južne Amerike je naznačen zatamnjeno).

Cunami talasi su visoki vodeni talasi koji se formiraju pri pojavi hypocentra (žari-šta) zemljotresa ispod vodenih površi (najčešće okeana) u uslovima kada se pri rasijedanju stijena u zoni hypocentra javlja veći skok (denivelacija) rasjeda uslijed dislociranja dna. Tada se formira voden talas koji se kreće ka obalama (slika 33).



Slika 33. Uticaj dubine okeanskog dna na stvaranje cunami efekta: naglo smanjenje brzine i talasne dužine stvara i naglo povećanje amplitude frontalnog talasa koji zapljuškuje obalu.

Brzina kretanja ovih talasa značajno zavisi od dubine okeanske vode, ali može da dostigne i 900 kilometara na čas. Njihova talasna dužina obično ima takođe veoma velike vrijednosti, zavisno od dubine okeanske vode – čak do 300 kilometara (slika 33). Kada ovakav talas dospije u plitke priobalne zone, javlja se tzv. cunami efekat, koji se manifestuje naglim i značajnim povećanjem visine talasa, uz značajno smanjenje brzine njegovog kretanja i njegove talasne dužine. Cunami talas pri kontaktu sa plitkom obalom može da dostigne visinu i do nekoliko desetina metara.



Slika 33a. Izolinije vremena putovanja cunami talasa u Tihom Okeanu, koji su bili izazvani snažnim zemljotresom sa magnitudom 9,5 i epicentrom pored čileanske obale, 1960. godine.

Cunami talasi obično stvaraju razorne efekte velikih intenziteta pri nailasku na plitke obale ili na brodove na otvorenom moru, pa je u cilju prevencije te opasnosti, formirana posebna služba obaveštavnja o kretanju takvih talasa u Tihom Okeanu.

Cunami talas koji je nastao u veoma snažnom zemljotresu (sa magnitudom 9,0) 26. decembra 2004. godine pored obala Sumatre u Indijskom Okeanu, odnio je oko 300.000 ljudskih života sa obala Indonežanskih ostrva, istočnih obala Indije i Šri Lanke. Tek nakon ove velike nesreće pristupilo se pripremi planova za izradu sistema upozoravanja i u Indijskom Okeanu.

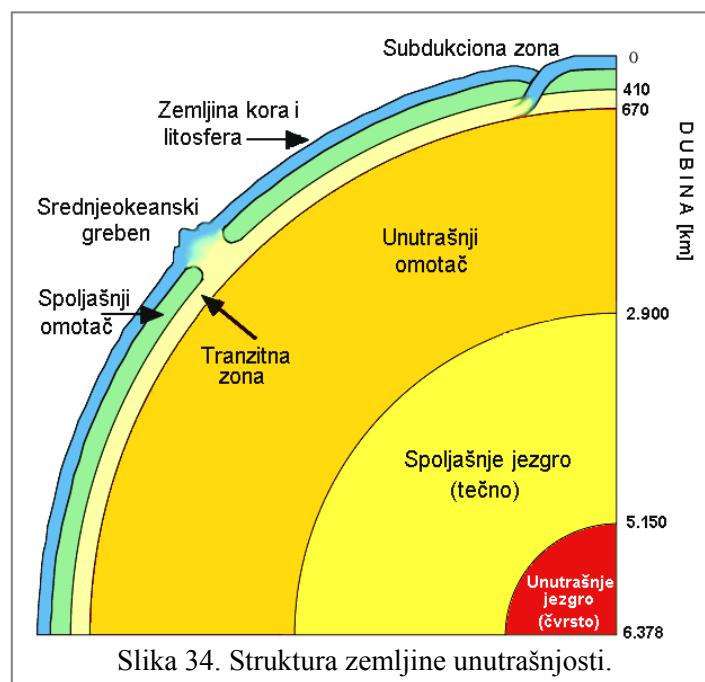


Slika 33b. Potpuno devastirano naselje na Sumatri u cunamiju stvorenom u zemljotresu od 26. decembra 2004. godine (sa magnitudom 9,0) kada je poginulo oko 300.000 ljudi u cijelom Indijskom Okeanu.

4.3. Zemljina unutrašnjost

Sam površinski, očvrsli sloj Zemlje, u prosjeku deboe oko 35 kilometara, nazvan zemljina kora. Zbog mogućnosti direktnog proučavanja i pristupa ovom sloju, on je i najviše istraživan. Intenzivna istraživanja tokom nekoliko posljednjih decenija pokazala su veliku kompleksnost u sastavu i strukturnoj građi ovog, relativno tankog, očvrslog sloja Zemlje. Zahvaljujući dubokom prodiranju seizmičkih talasa (elastičnih deformacija) stvorenih zemljotresima i uspostavljanjem gусте мреже vrlo osjetljivih seismoloških stanica širom Svilja, dubla zemljina unutrašnjost nam je postala znatno bliža i razumljivija. Najveći dio informacija (a one su zaista impresivne, kako po obimu, tako i po kvalitetu i detaljnosti) kojima danas raspolaćemo o tim dubokim prostorima zemljine unutrašnjosti, utvrđene su tumačenjem registrovanih seizmičkih talasa, a u znatno manjem obimu i pručavanjem rezultata gravitacionih i geomagnetskih osmatranja, analize podataka topotognog toka Zemlje, kao i na osnovu laboratorijskih ispitivanja stijena i minerala.

Zemljina unutrašnjost je, na bazi hemijskog sastava, agregatnog stanja, specifične težine i brzine prostiranja seizmičkih talasa izdiferencirana na nekoliko (sfernih) slojeva (slika 34): **zemljina kora, omotač jezgra i samo jezgro.**



Zemljina kora, predstavlja čvrsti, stjenoviti sloj, kompleksan po strukturi i sastavu, vrlo različite debljine, koji se po dubini prostire od zemljine površi do granice koja se naziva **Mohorovičićev diskontinuitet***. Prosječna dubina ove granice u svjetskim okvirima je 35 kilometara na kopnu i svega 10 kilometara ispod okeana. Na prostoru Crne Gore i Srbije, ona se mijenja – od oko 25 kilometara ispod Jadranskog Mora, preko 45-50 kilometara u centralnim djelovima Crne Gore, zatim 30-35 kilometara u centralnoj Srbiji, do oko 23 kilometra debele kore u Panonskom Basenu. Prosječna zapreminska gustina stijena zemljine kore iznosi $2,7 \text{ t/m}^3$.

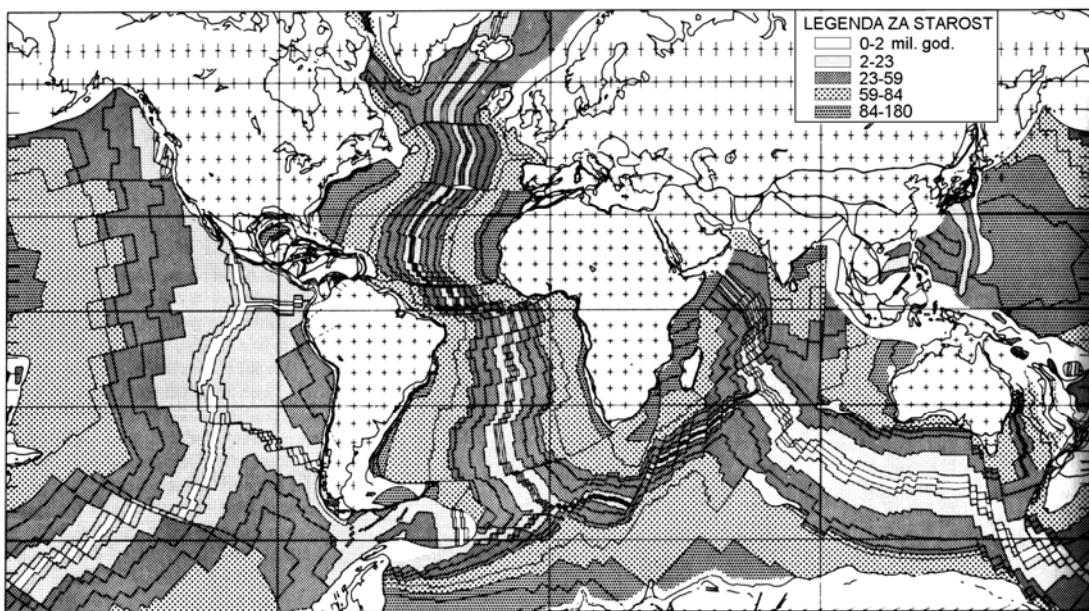
Kao što smo već ranije pomenuli, u geologiji se izdvajaju i slojevi *litosfera* i *astenosfera*, prema stepenu otpora stijene na deformaciju. Litosfera obuhvata sloj do dubine od oko 140 kilometara, a ispod nje se nalazi sloj astenosfere.

Elemenat	Hemijski simbol	Procenat težine u zemljinoj kori
Kiseonik	O	46,60
Silicijum	Si	27,72
Aluminijum	Al	8,13
Gvožđe	Fe	5,00
Kalcium	Ca	3,63
Natrijum	Na	2,83
Kalijum	K	2,59
Magnezijum	Mg	2,09

Tabela 3. Procentualno učešće pojedinih elemenata u stijenama zemljine kore (procenat težine).

* Prema hrvatskom seismologu Andriji Mohorovičiću (1857. - 1936.) koji je 1909. godine prvi definisao i računao dubinu te granice na osnovu registrovanih seismoloških podataka u seriji zemljotresa u okolini Zagreba.

U tabeli 3 je navedeno 8 najzastupljenijih elemenata koji grade stijene Zemljine kore, odakle se vidi da dominantnu ulogu u izgradnji ovog dijela Zemlje, pored kiseonika (u oksidima) imaju silicijum, aluminijum, gvožđe i kalcijum, koji zajedno čine 91 % njenog ukupnog, težinskog sastava.



Slika 35. Starost okeanskog dna.

Zemljinu koru kopna grade tri generalna sloja stijena: površinski sloj sedimentnih stijena, vrlo promjenljive debljine, između 5 i 15 kilometara, zatim sloj magmatskih, granitskih stijena kiselog sastava (sa značajnim učešćem silikatne komponente – SiO_2), debljine oko 15 kilometara, dik se u osnovi zemljine kore nalazi se tzv. bazaltni sloj debljine 5-15 kilometara. Okeansku koru čini samo sloj bazaltnih stijena, manje starosti. Sve stijene ispod okeana mlađe su od 200 miliona godina (slika 35) dok su, kao što smo već pomenuli, najstarije stijene kopna počele formiranje prije više od 4 milijarde godina. Dakle, okeanska kora je znatno mlađa, a nastaje i danas (u zonama okeanskih grebena, gdje se vrši stalno razmicanje očvrslog dna, izlivanje magme u podmorje i njeno naglo očvršćavanje u kontaktu sa vodom). Samo razmicanje okeanskog dna uslovljeno je procesom pokretnja velikih kontinetalnih ploča, odnosno kontinenata i djelova okeanskog dna. Starost okeanskog dna i konture okeanskih grebena prikazani su na slici 35, na kojoj se preko različitih šrafura, koje označavaju starost dna, dobro uočava hronološki proces njegovog nastanka i širenja.

Prvu ideju o pomjeranju kontinenta iznio je Alfred Wegener* još početkom XX vijeka, asociran izrazitom podudarnošću oblika kontinentalnih rubova zapadne Afrike i istočnih djelova južne Amerike. Naučno ubličavanje ove ideje i njene prve potvrde, ostvareni su tek početkom šezdesetih godina XX vijeka, kada je na osnovu brojnih rezultata intenzivnih paleomagnetskih[†] ispitivanja velikog broja uzoraka vulkanskih stijena iz različitih geomagnetskih epoha (perioda), zatim terestričkim i aeromagnetskim ispitivanjima na tlu i u zonama okeana, kao i na bazi rezultata globalnih geoloških istraživanja i istražnih bušenja, obezbijeđeno dovoljno naučnih argumenata za pouzdano definisanje **hipoteze nove globalne tektonike ploča**. Ova teorija ili



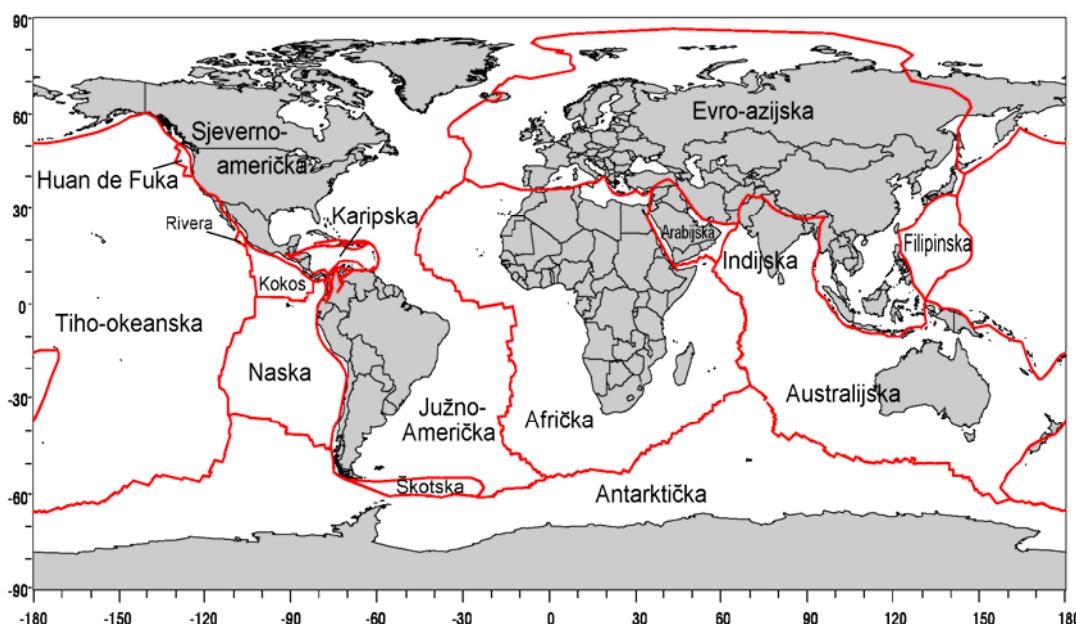
Alfred Wegener

* Alfred Wegener (1880.-1930.) njemački klimatolog, astronom i geofizičar.

† Paleomagnetska ispitivanja uzoraka magmatskih i sedimentnih stijena, laboratorijski se utvrđuju karakteristike zemljinog magnetskog polja u vrijeme hlađenja stijene. Poznavajući istorijat promjena magnetskog polja Zemlje, moguće je identifikovati vrijeme nastanka stijene čiji je uzorak paleomagnetski ispitana.

hipoteza, pretpostavlja da je Zemljina kora kompozit većeg broja velikih tektonskih ploča, odnosno da je sastavljena od niza većih ili manjih djelova litosfere, koji plutaju na magmi i kreću se određenim brzinama (reda veličine nekoliko centimetara godišnje) u određenim pravcima. Ove ploče se nazivaju ***globalnim tektonskim pločama*** (slika 36).

U isto vrijeme, za objašnjenje pokretačkog mehanizma tektonskih ploča, odnosno za tumačenje porijekla globalnih geodinamičkih sila koje ostvaruju kretanje ploča po viskoznom sloju magme, razvijena je hipoteza ***termodinamičke konvekcije**** koja se odvija u debelom omotaču zemljinog jezgra. Naime, po ovoj hipotezi, kretanje ploča je uslovljeno termodinamičkim procesima u zemljinom omotaču, odnosno sfernem sloju magme koji zaliježe ispod donje granice litosfere i zahvata zonu do dubine od 2.900 km. Po ovoj hipotezi, termodinamički kovekcionici tokovi u omotaču nastaju u takozvanim ***konvekcionim čelijama*** u kojim se vrši kretanje relativno toplije magme (kao lakše) iz dubljih ka plićim djelovima omotača, uz istovremeno poniranje relativno hladnije magme (kao teže) iz plićih - u dublje djelove omotača. U zoni kontakta magme u njenom horizontalnom kretanju - sa donjim djelovima litosfere, uslijed trenja, nastaje pomicanje blokova, odnosno lagano horizontalno kretanje ploča Zemljine kore.



Slika 36. Konture i nazivi najvećih globalnih tektonskih ploča.

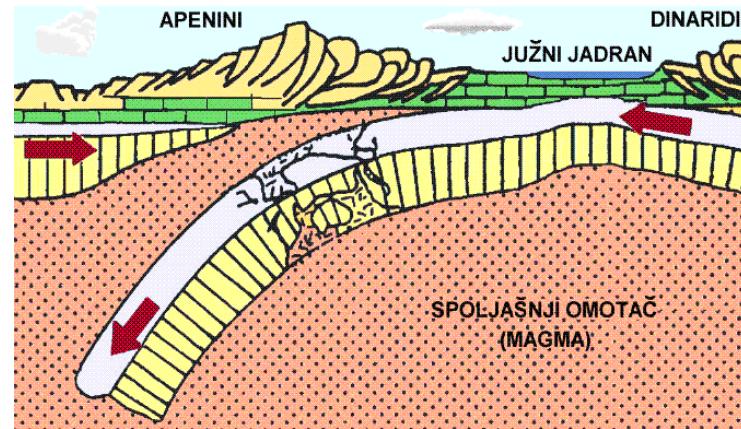
U stijenama kontaktne zone (zoni sučeljavanja tektonskih ploča) uslijed ovakvog kretanja, nastaju visoki bočni pritisci, pri čemu se akumuliraju naponi u stijenskim masama zemljine kore. Kada naponi dostignu gornju granicu mehaničke čvrstoće stijene, dolazi do njenog pucanja duž najslabijih zona i pri tome nastaju tektonske forme, poznate kao ***rasjedi***, ***navlake*** i drugi geološki oblici. U ovim tektonskim procesima, pri mehaničkom lomu stijene, vrši se naglo oslobađanje akumulirane mehaničke energije u obliku **seizmičkih talasa**, odnosno na taj način nastaje ***zemljotres***.

Kao sumarni, dugogodišnji produkt ovakvih tektonskih procesa, u široj zoni sučeljavanja ploča, nastaje regionalno izdizanje i ubiranje stijenskih masa, odnosno formiranje planinskih sistema (ogeni procesi), za šta kao tipičan primer možemo navesti cijelu zonu spoljašnjih i unutrašnjih Dinarida. Naime, Dinaridi, Helenidi, Apenini, Karpati, kao i drugi orogeni pojasevi na sjevernom obodu Mediterana (ali i širom planete), su nastali kao posljedica prenošenja bočnih pritisaka iz zone Mediterana (preko apulijске platforme) na sjeverni obod Mediterana, uslijed laganog kretanja Afričke ploče ka sjeveru i sjeverozapadu (slika 37) i istovremeno, transl-

* Ova hipoteza je još u fazi intenzivnog matematičkog ispitivanja i dokazivanja metodom numeričkog modelovanja.

cionim kretanjem evro-azijske ploče u suprotnom smjeru – ka jugoistoku, približno istim brzinama od oko 7 milimetara na godišnjem nivou (ovaj proces i dalje traje).

U nekim slučajevima, naročito u zonama sučeljavanja tankih okeanskih kora i relativno debelih kontinentalnih ploča, dolazi do podvlačenja djelova okeanske kore pod kontinentalni dio zemljine kore, što se naziva **subdukcijom**. U ovim slučajevima dio kore koji subdukuje (ponire) pod kontinent, tone do određene dubine – do donje granice tranzitne zone, postižući maksimalne dubine od oko 700 km. Na tim dubinama subdukovana ploča biva mehanički i termički degradirana i/ili istopljena u magmi.

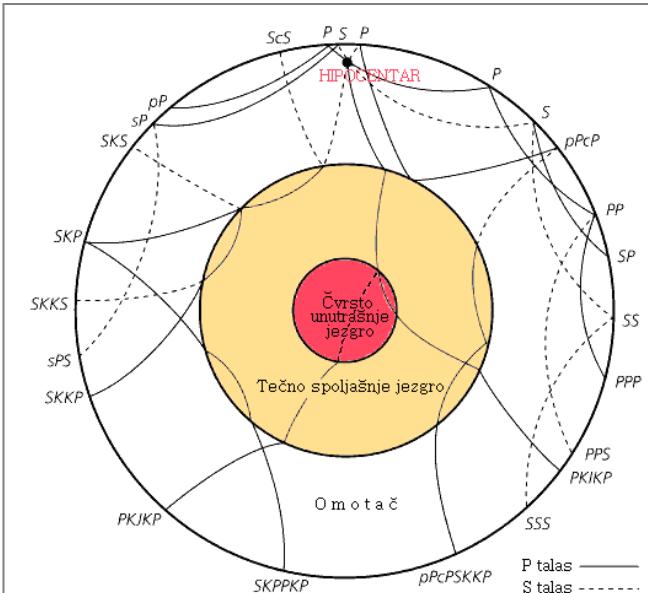


Slika 37. Šematski prikaz apeninske subdukcione ploče i mikroploče Jadrana.

Spoljašnji omotač jezgra. Odmah ispod zemljine očvrsle kore, dakle ispod Mohorovičićevog diskontinuiteta, zaliježe djelimično i potpuno istopljeni sloj stijena, dakle magma u gustom viskoznom stanju, koja se na samoj gornjoj granici zemljine kore lagano hlađi i pretvara u bazalne stijene. Ovaj sferni sloj se naziva **spoljašnji omotač jezgra Zemlje**, u geologiji često nazvan i **astenosfera**, a prostire se do tzv. **tranzitne** zone (slika 34), koja počinje na 410 kilometara, a završava se na dubini od 670 kilometara. Tranzitna zona dijeli spoljašnji od unutrašnjeg omotača, kao barijera koja se značajno hemijski i viskozno razlikuje od oba omotača između kojih se nalazi.

Unutrašnji omotač jezgra se prostire od tranzitne zone do dubine od 2900 kilometara, gdje počinje **spoljašnje jezgro**. Unutrašnji omotač ima sličnu strukturu kao i spoljašnji omotač, ali nešto bazičniji sastav (više težih elemenata u sastavu magme) istopljenih magmatskih stijena. Značajna karakteristika spoljašnjeg jezgra je da se i ono, kao i cijeli omotač (spoljašnji i unutrašnji) nalazi u tečnom stanju, što je utvrđeno na osnovu načina prostiranja seizmičkih talasa stvorenih zemljotresima. Procentualno učešće pojedinih hemijskih komponenata u gradi zemljiniog omotača (u odnosu na masu cijele Zemlje) je sljedeće: SiO_2 sa 32 %, MgO sa 23 %, FeO sa 7%, Al_2O_3 i CaO sa po 2 %, Na_2O sa 0,5 %, dok drugih elemenata ima samo 0,5%;

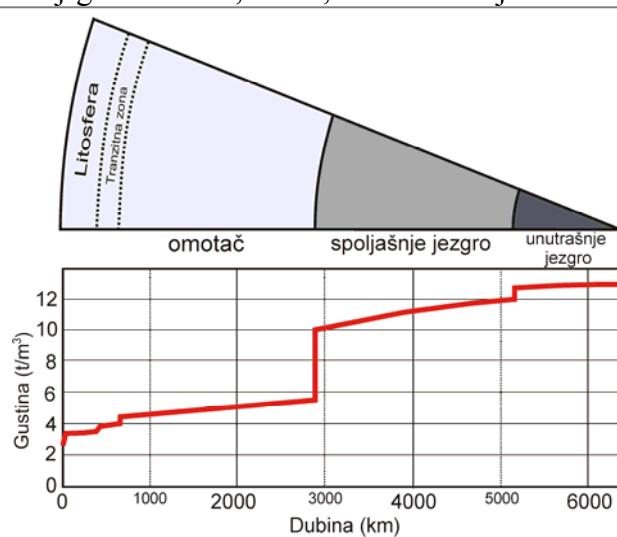
Najzad, **unutrašnje jezgro** se prostire od donje granice spoljašnjeg jezgra, do centra Zemlje (slika 34). Ovaj, centralni dio Zemlje se nalazi u čvrstom stanju (zbog velikih pritisaka), a dominantno ga grade samo dva teška elementa: Fe sa 27,5% (u odnosu na cijelu masu Zemlje) i Ni sa 2,5%, dok ostali sastojci u njemu: O, S, C, Si i H čine ukupno samo 2,5 % mase Zemlje.



Slika 38. Način prostiranja seizmičkih talasa kroz zemljinu unutrašnjost - od žarišta (hipocentra) zemljotresa.

Na slici 38 su, radi ilustrovanja načina kretanja, prikazane trase nekih karakterističnih puteva seizmičkih talasa kroz zemljinu duboku unutrašnjost. Zakriviljenost tih trasa je rezultat sistematskog, ali i skokovitog povećanja brzine kretanja seizmičkih talasa sa dubinom. Indeks P na ovoj slici dodijeljen je tzv. **primarnim** ili **longitudinalnim talasima**, a S – **sekundarnim**, ili **transverzalnim** (koji se ne prostiru kroz spoljašnje jezgro u tečnom stanju), o čemu ćemo znatno detaljnije govoriti u odjeljku o Seizmologiji.

Slika 39 ilustruje promjenu gustine materijala u zavisnosti od dubine, utvrđenu na osnovu ponašanja seizmičkih talasa u tim djelovima zemljine unutrašnjosti. Kao što se vidi, do donje granice tranzitne zone, gustina se u malim skokovima sistematski povećava, dostižući vrijednost na toj granici od $4,2 \text{ t/m}^3$, a zatim u cijelom unutrašnjem omotaču, gustina lagano, kontinualno raste, do vrijednosti od $5,6 \text{ t/m}^3$ na granici ka spoljašnjem jezgru. Na toj granici, gustina skokovito mijenja vrijednost za oko 75 % - dostižući vrijednost od $9,8 \text{ t/m}^3$. U spoljašnjem jezgru gustina nastavlja da raste uniformno, da bi na granici sa unutrašnjim jezgrom dostigla vrijednost od $12,7 \text{ t/m}^3$ i trend rasta nasvatila do samog centra, gdje postiže maksimum od $13,0 \text{ t/m}^3$. Ova maksimalna gustina odgovara gustini mješavine gvožđa i nikla, od čega je zapravo unutrašnje jezgro dominantno i sačinjeno.



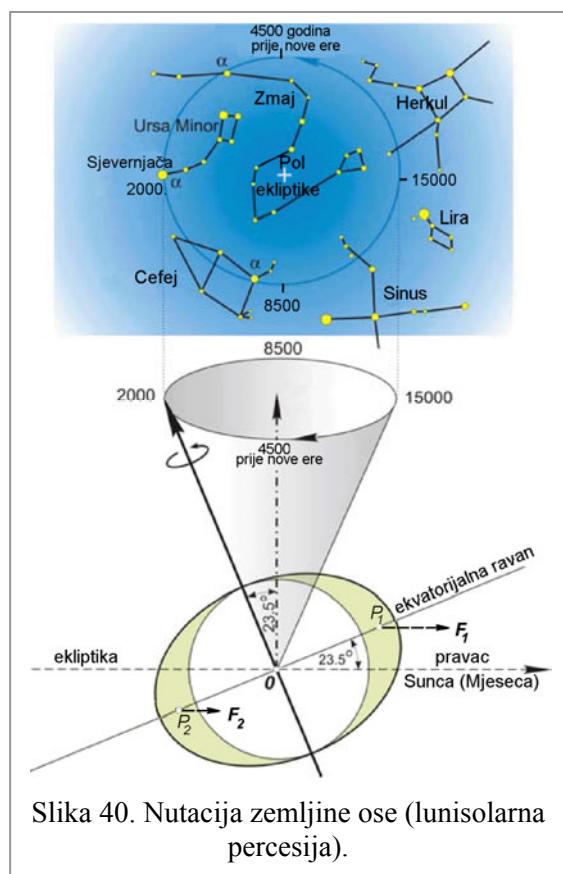
Slika 39.- Struktura unutrašnjosti Zemlje sa nazivom osnovnih slojeva (gore) i dijagram promjene gustine sa dubinom. materijala (dolje).

jednu cijelokupnu rotaciju jezgra u odnosu na istu tačku na zemljinoj površi.

4.4. Rotacija Zemlje

Rotacija Zemlje oko ose je samo naizgled uniforman i pravilan proces, što zapravo nije tačno. Gravitaciona interakcija Zemlje sa drugim kosmičkim tijelima, pretežno u sunčevom sistemu, kao i kretanje masa u Zemljinoj unutrašnjosti, značajno modifikuju režim njenog obrtanja oko svoje ose. Činjenica da Zemlja rotira, uslovjava njen blago ekvatorijalno proširenja (spljoštenost na polovima). Naime, stvarni oblik Zemlje je rezultat balansa između sopstvene gravitacije (koja teži formiranju idealno sferičnog tijela) i centrifugalnog efekta rotacije (koja teži da što više spljošti Zemlju na polovima). Kada bi zemljina unutrašnost imala savršeno homogenu strukturu, Zemlja bi tada imala oblik ideanog rotacionog elipsoida, dakle tijela koje bi se dobilo rotacijom elipse oko svjeće kraće ose. Međutim, pošto je realni raspored masa u zemljinoj unutrašnjosti daleko od idealnog, homogenog, to i realni oblik Zemlje znatno odstupa i od rotacionog homogenog elipsoida. Realni oblik Zemlje se naziva **geoid**, a njegove karakteristike ćemo analizirati malo kasnije.

Kao što smo već pomenuli, nagib zemljine ose rotacije prema ravni ekliptike sada iznosi $23,5^{\circ}$ (tačnije $23,45^{\circ}$). Različit položaj ose rotacije Zemlje u odnosu na Sunce tokom godine, uslovjava promjenu u načinu osunčavanja zemljine površi, što rezultira smjenom godišnjih doba, o čemu smo takođe već diskutovali. Međutim, apsolutni položaj ose rotacije se mijenja tokom perioda od **25.730 godina**, opisujući konus otvora (u današnje vrijeme) $2 \cdot 23,5^{\circ} = 47^{\circ}$, u tom periodu, kao što je prikazano na slici 40. Sjeverni kraj ose rotacije sada je usmjeren ka zvijezdi Sjevernjači, dok će, na primjer za oko 4.000 godina (slika 40), biti orientisan ka sazvežđu Cefej, a u sazvežđe Herkul će ući za oko 15.000 godina.



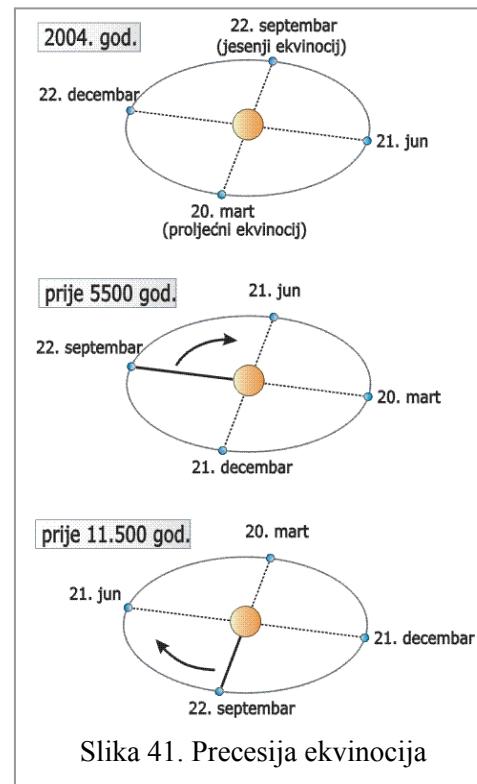
Slika 40. Nutacija zemljine ose (lunisolarna precesija).

nešto veće udaljenosti napadne tačke te sile (približno za prečnik Zemlje) od njenog uzročnika (Sunca ili Mjeseca) sila F_2 će biti nešto manja. Ovako nastala razlika gravitacionih sila u te dvije tačke ($F_1 - F_2$) će težiti da Zemlju zarotira tako da se ekvatorijalno izobličenje nađe u ravni u kojoj leže centri masa Zemlje i tijela uzročnika tih sile. Zakretanje ose rotacije Zemlje i njen kretanje po izvodnici kupe (slika 40) pod dejstvom gravitacionog polja Mjeseca i Sunca naziva se **precesijom** ili **lunisolarnom precesijom**. Ovakvo dejstvo Sunca je najveće u vrijeme solsticija, kada je Zemljina osa nagnuta za $23,5^{\circ}$ ka Suncu, odnosno od Sunca, a nestaje u tačkama ekvinoksa (slika 40 i 46). Iako je masa Mjeseca višestruko manja od Sunčeve, zbog njegovog malog rastojanja od Zemlje, kao i okolnosti da je gravitacioni uticaj proporcionalan

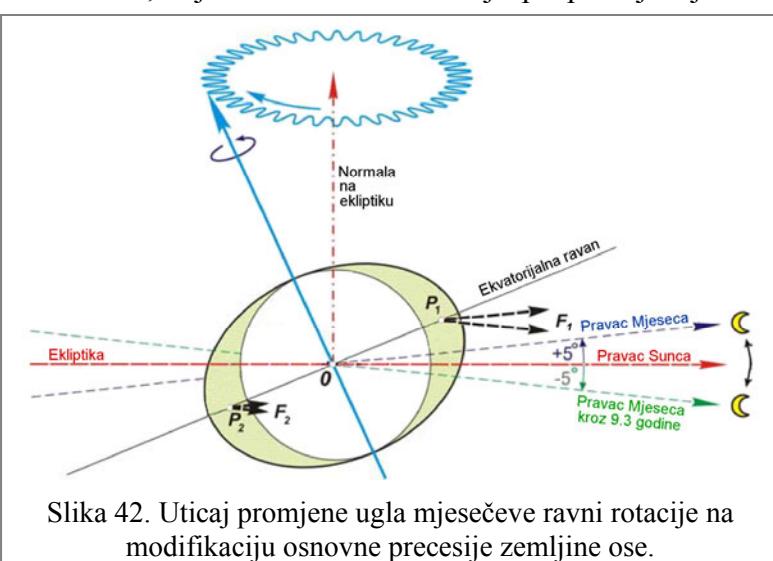
količniku mase i drugog stepena rastojanja (m/r^2), to je uticaj Mjeseca na zakretanje ose rotacije Zemlje skoro dva puta veći od sunčevog.

Pošto pravac ose rotacije astronomski definiše kada će doći do smjene godišnjih doba, to znači da će precesija ose usloviti da će svaka sljedeća sezona početi na (malo) različitom mjestu na orbiti oko Sunca, iz godine u godinu. Istovremeno, orijentacija same eliptične putanje u prostoru, se mijenjaju za izvjesnu malu vrijednost tokom vremena. Ova promjena se naziva ***perturbacija orbite*** ili ***precesija ekvinocija****. Dakle, zajedno sa lunisolarnom precesijom, precesija ekvinocija izaziva progresivno pomjeranje položaja četiri kardinalne tačke zemljine orbite: proljećnog i jesenjeg ekvinocija, zimskog i ljetnjeg solsticija (slika 41), što se manifestuje malim, sistematskim promjenama mesta (odnosno vremena) smjenjivanja godišnjih doba, iz godine u godinu. Kompletan ciklus ove precesije se obavi u periodu između **19 i 23 hiljade godina** (uticaj Jupitera prouzrokuje da to bude promjenljiva vrijednost). Imajući u vidu da razlika u rastojanju između Zemlje i Sunca u vrijeme perihela (147,5 miliona kilometara) i afela (152,5 miliona kilometara) iznosi samo 3 %, uticaj ove vrste perturbacije zemljine orbite na klimatske promjene ne može biti od velike važnosti, ako se posmatra izdvojeno. Najzad, **veličina ekscentriteta** zemljine orbite se takođe mijenja i to sa periodom od **100 hiljada i 413 hiljada godina**. Gravitaciona sila Jupitera uslovjava da se zemljina orbita mijenja od gotovo idealnog kruga (sa ekscentricitetom od samo 0,005) do izražene eliptične putanje (sa 12 puta većim ekscentricitetom – od 0,060).

Kao što smo već govorili kod plime okeana, Mjesec rotira oko Zemlje po putanji čija ravan zaklapa ugao od $5^{\circ}09'$ u odnosu na ravan ekliptike, pri čemu njegova ravan rotacije u odnosu na Sunce zauzima isti položaj u okviru perioda od **18,6 godina**. Ovakvo ponašanje Mjeseca izaziva dodatnu oscilatornu komponentu u precesiji zemljine ose sa ovim periodom (nazvanu ***nutacijom***), što rezultuje da osnovni konus precesije ose ne bude ravan (slika 42), nego oscilatoran po svojoj izvodnici. Amplitudne ovako izazvanih oscilacija ose Zemlje iznose 9 lučnih sekundi.



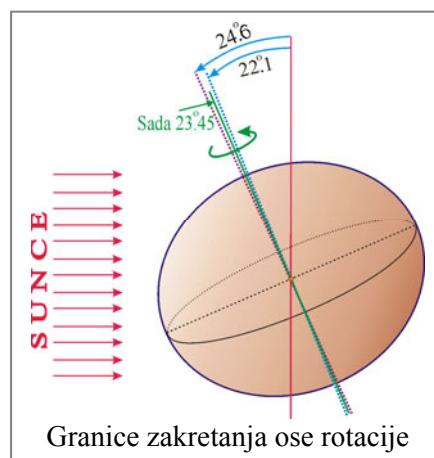
Slika 41. Precesija ekvinocija



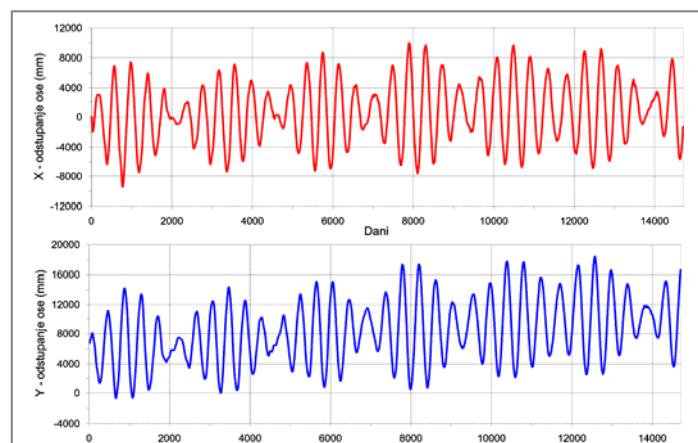
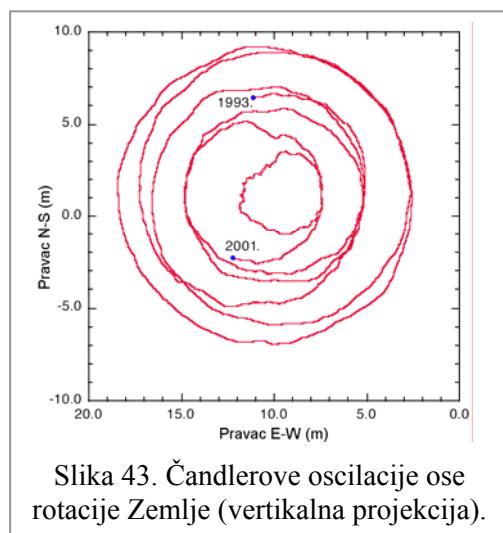
Slika 42. Uticaj promjene ugla mjesčeve ravni rotacije na modifikaciju osnovne precesije zemljine ose.

* **ekvinocij** – ravnodnevničica – javlja se kada se ravan ekliptike i ravan sunčevog ekvatora presijeku (proljećni ekvinocij 2004. godine je bio 20. marta u 06h49min, a jesenji 22. septembra u 16h13min); **solsticij** – momenat kada je osa rotacije Zemlje najviše nagnuta ka Suncu (ljetnji solsticij) ili od Sunca (zimski solsticij). Solsticij označava ujedno i najduži (ljetnji solsticij), odnosno najkraci dan (zimski solsticij) u godini. Ljetnji solsticij 2004. godine je bio 21. juna u 00h57min, a zimski 21. decembra u 12h42min; Dodajmo ovim terminima i **perihel** koji označava najbližu tačku Sunca na zemljinoj orbiti, dok **afel** predstavlja najdaljeniju tačku na orbiti.

Pod dejstvom planeta sunčevog sistema, Mjeseca i Sunca, veličina nagiba zemljine ose se mijenja u odnosu na srednju orbitalnu ravan planeta (ekliptiku), što zapravo znači da se ugao između ekvatora i ekliptike mijenja i to između $22,1^{\circ}$ i $24,5^{\circ}$, sa **periodom od 41 hiljadu godina**. Klimatološki posmatrano, promjena veličine nagiba ose rotacije može imati značajne efekte, s obzirom da direktno utiče na stepen osunčanosti zemljine površi. Ove promjene nagiba ose rotacije neminovno izazivaju promjenu u karakteru i obimu osunčanosti zemljine površi tokom godine, dakle imaju uticaja na klimatske cikluse. Značaj i veličinu uticaja svih promjena karakteristika rotacije Zemlje na dugogodišnje promjene klime, prvi je uočio i matematički eksplisitno izrazio **Milutin Milanković***, o čemu ćemo nešto opširnije govoriti u nastavku.



Postoji još jedna komponenta prostornog kretanja ose rotacije Zemlje (promjene nagiba), ali je ona (za razliku od prethodnih, čiji su uzroci kosmičkog karaktera) izazvana neravnomjernim rasporedom masa unutar same Zemlje. Zbog te okolnosti, osa rotacije Zemlje se ne poklapa sa osom simetrije, tj. osom najvećeg momenta inercije, ali istovremeno i uslijed kompleksne interakcije između rotirajućeg tečnog omotača, tečnog spoljašnjeg jezgra i čvrstog unutrašnjeg jezgra Zemlje. Ova pojava se naziva **Čandlerovim[♦] oscilacijama ose** i ima period od 431 dan, a odstupanje polova uslijed njihovog dejstva iznosi do 15 metara. Na slici 43 je prikazana putanja (horizontalna projekcija) zemljine ose rotacije u periodu od 1993. do 2001. godine, a na slici 44 vertikalne projekcije tih oscilacija na pravac sjever-jug i istok-zapad, respektivno, sa kojih se može uočiti karakter tih oscilacija.

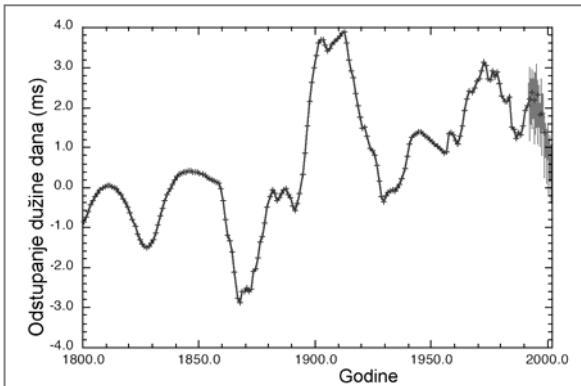


Promjena karakteristika rotacije Zemlje izaziva trenje materijala u zemljinoj unutrašnjosti i na njenoj površi (vodene mase okeana i vazduh atmosfere), što uslovljava blago smanjenje momenta rotacije, a što dalje za poslijedicu ima smanjenje brzine njene rotacije, ali i promjenu momenta rotacije u sistemu Zemlja-Mjesec i Zemlja-Sunce. Gubitak momenta rotacije Zemlje u

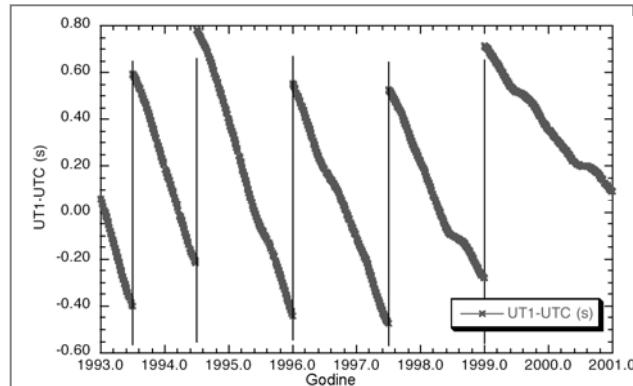
* Milutin Milanković (1879.-1958.) je rođen u Dalju u Srbiji. Diplomirao je tehničke nauke na bečkom Institutu tehnologije. Predavao je rotacionu mehaniku, teorijsku fiziku i nebesku mehaniku na beogradskom univerzitetu od 1909. do 1955. godine. Publikovao je oko 70 knjiga, među kojima i poznati "Kanon osunčanja" (1941. godine), u kojem je cijelovito prikazao originalnu matematičku hipotezu o klimatskim ciklusima na Zemlji, koja je danas intenzivno korišćena u svjetskim okvirima.

♦ prema američkom astronomu Setu Čandleru (Seth Chandler, 1846.-1913.) koji je 1891. godine identifikovao ovaj tip oscilacija zemljine ose.

sistemu Zemlja-Mjesec kompenzira se povećanjem momenta rotacije Mjeseca oko Zemlje, što konačno uslovljava da se Mjesec udaljava od Zemlje brzinom od 3,7 cm godišnje i da povećava period rotacije oko Zemlje. Ako se ova brzina ekstrapoluje unazad, došlo bi se do podatka da je Mjesec prije 1,6 milijardi godina bio na granici gravitaciono stabilne putanje*. Međutim, imajući u vidu da je Mjesec geološki stabilan mnogo duže vremena, kao i da je star koliko i Zemlja (4,55 milijardi godina), nameće se zaključak da je ova brzina ranije morala biti znatno manja.



Slika 45. Promjena dužine dana (u milisekundama) tokom dva prethodna vijeka.



Slika 46. Efekat uvođenja "prestupne sekunde" u trajanje zemaljske godine.

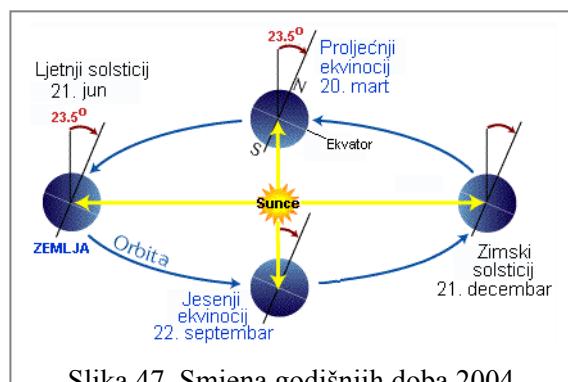
Kao što smo konstativali, zemljin moment rotacije smanjuje se lagano, ali konstantno. To smanjenje je uslovljeno pretežno redistribucijom (kretanjem i nemovnim trenjem) masa u zemljinoj unutrašnjosti uslijed dejstva plina izazvanih pretežno dejstvom Mjeseca (i znatno manje dejstvom Sunca), kao i premještanjem unutrašnjih masa zbog topljenja leda nakon posljednje glacijacije. Zbog toga Zemlja vrlo lagano usporava svoju rotaciju, što se manifestuje produženjem trajanja dana, za vrlo malu, ali primjetnu veličinu od oko dvije milisekunde na dan.

Međutim, fluktuacije (promjene) dužine dana nisu linearног karaktera i tokom posljednjih 30 godina variraju u granicama 4-5 milisekundi na dan (u oba smjera). Na slici 45 je prikazan grafik promjene dužine dana (odstupanje od 86.400 sekundi) tokom prethodna dva vijeka, izražen u milisekundama. Na osnovu geoloških analiza fosilnih ostataka živih organizama tokom istorije Zemlje, utvrđeno je da je prije oko 500 miliona godina, jedna godina imala 420 dana, dakle, pod uslovom da se trajanje obilaska Zemlje oko Sunca nije mijenjalo, dan je trajao nešto manje od 21 čas.

Zbog svakodnevnog produženja dužine dana, u prosjeku za oko 2 milisekunde, svakih 500 dana se uvodi tzv. "prestupna sekunda", kojom se konvencionalna dužina godine uvećava za jednu sekundu. Na slici 46 je prikazan grafik na kojem se vide momenti i efekti uvođenja "prestupne sekunde" tokom prethodnih desetak godina. Na ovoj slici oznaka UT1 se odnosi na stvarno zemljino vrijeme, odnosno kod kojeg se nulti (Grinvič) meridijan u podne poklapa sa pravcem centra Sunca, dok UTC označava tzv. koordinisano vrijeme koje je kontrolisano časovnicima na Zemlji i koje se povremeno mora usklađivati sa stvarnim (UT1) vremenom.

4.4.1. Klimatski ciklusi

Razlog smjenjivanja godišnjih doba nam je poznat iz osnovne škole: nagib zemljine ose



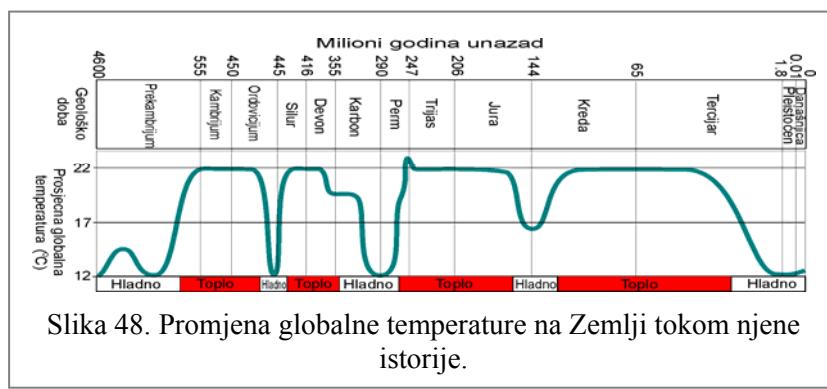
Slika 47. Smjena godišnjih doba 2004. godine.

* koja označava granicu nakon kojoj bi Mjesec bio razoren gravitacionom silom Zemlje i privučen na Zemlju.

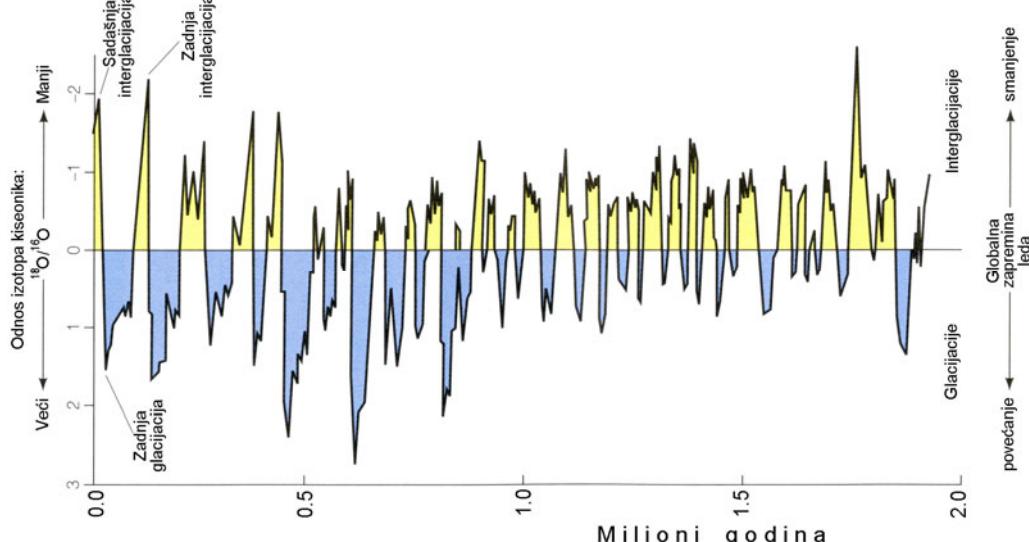
rotacije u odnosu na ravan ekliptike iznosi 23.5° , što stvara različit stepen osunčanosti kada je osa nagnuta ka Suncu (tokom ljeta za sjevernu hemisferu) i od Sunca (tokom zime). Na slici 47 je, radi podsjećanja, šematski prikazan položaj Zemlje u odnosu na Sunce u doba proljećnjeg (20. marta) i jesenjeg ekvi-nocija (22. septembra), ljetnjeg (21. juna) i zimskog solsticija (21. decembra) 2004. godine.

Međutim, ako se posmatra dugoročno variranje temperature tokom zemljine istorije, uočljivo je da postoje i drugi ciklusi koji upravljaju količinom toplote koju Zemlja prima od Sunca. Na slici 48 je prikazan generalizovani dijagram promjene srednje godišnje temperature tokom čitave istorije Zemlje, pri čemu se vidi da je srednja godišnja temperatura u vrlo dugim intervalima oscilovala između $+12^{\circ}\text{C}$ i $+22^{\circ}\text{C}$.

Periodi globálnih dugotrajnih zahlađenja, odnosno ledenih doba, uslovjavali su pojavu velikih lednika, koji su u procesu svog formiranja, kretanja i nestajanja, ostavljali vrlo vidljive tragove u terenu. Procesi koji dovode do pojave velikih glečera nazvani su *glacijacije*. Promjena ukupne zapremine leda (relativne vrijednosti) na Zemlji tokom prethodna dva miliona godina, jasno ukazuje na globalne klimatske cikluse, prikazana je na slici 49.



Slika 48. Promjena globalne temperature na Zemlji tokom njene istorije.



Slika 49. Promjena ukupne zapremine leda (relativne vrijednosti) na Zemlji tokom prethodna dva miliona godina.

Osnovne razloge za pojavu glacijacije prvi je cijelovito objasnio i formulisao i naš matematičar Milutin Milanković, postavljajući originalnu, matematički definisanu hipotezu promjene osu-nčanja Zemlje kao posljedicu variranja tri navedene karakteristike zemljine rotacije oko svoje ose i oko Sunca:

- I. **Precesija ose roracije**, koja se manifestuje prostornim rotiranjem ose Zemlje po konusnoj površi, sa periodom od **25.730 godina**.
- II. **Perturbacija orbite** ili **precesija ekvinocija**, pri čemu se mijenja nagib zemljine ose rotacije u odnosu na ekliptiku, u ciklusu od **41 hiljadu godina**. U tom periodu, nagib ose varira između $22,1^{\circ}$ i $24,6^{\circ}$.

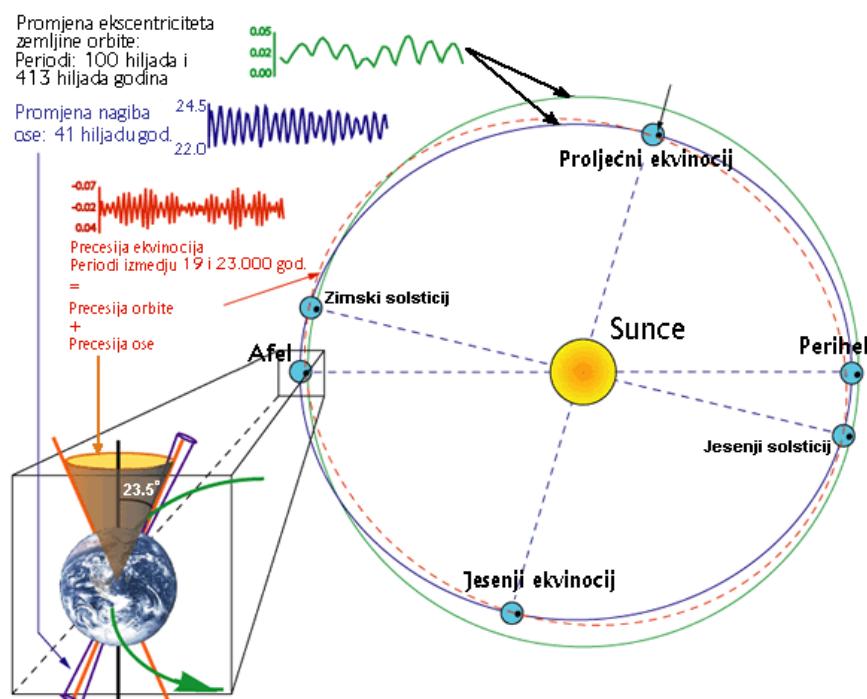
III. **Ekscentricitet** zemljine orbite se mijenja tokom vremena, stvarajući dva perioda promjene insolacije (osunčanosti) Zemlje – od **100 hiljada i 413 hiljada godina**;

Primjenom Milankovićevog matematičkog modela klimatskih ciklusa, moguće je predvidjeti globalne klimatske promjene i za dalju budućnost i sračunati osunčanost u bilo kojem periodu duboke zemljine istorije, s obzirom na postojanost procesa koji dovode do tih promjena. Iako Milankovićevi ciklusi teorijski mogu izazvati globalne promjene temperature od samo par stepeni Celzijusovih, smatra se da sumarno dejstvo sva tri opisana efekta rotacije Zemlje, kada su kombinovani sa globalnom promjenom karakteristika kretanja toplih morskih struja, mogu usloviti začetak ledenih doba na obije hemisfere (za što je neophodna globalna promjena od 7 do 10 °C).



Milutin Milanković

Kombinovanje efekata osunčavanja sve tri komponente rotacije Zemlje oko svoje ose i oko Sunca (slika 50), dovodi do značajnije promjene u srednjoj temperaturi atmosfere tokom dužeg perioda vremena, rezultujući u ukupnoj promjeni osunčanosti čak do 30 %. Dugotrajno smanjenje primljene toplove može izazvati začetak ledenog doba ili **glacijaciju**. Glacijacija se manifestuje formiranjem velikih i debelih lednika (glečera) posebno na visokim planinskim masivima, koji se spuštaju čak do Mediterana, kako je to evidentirano u sedimentima tokom niza perioda zemljine istorije.



Slika 50. Osnovni uzroci pojave klimatskih ciklusa Zemlje.

Ovakvo stanje na Zemlji traje sve do pojave suprotnih efekata zemljine rotacije – globalnog dugotrajnog povećanja temperature zbog povećane osunčanosti, što uslovljava prestanak ledenog doba ili pojavu **interglacijacije** i topljenje glečera.

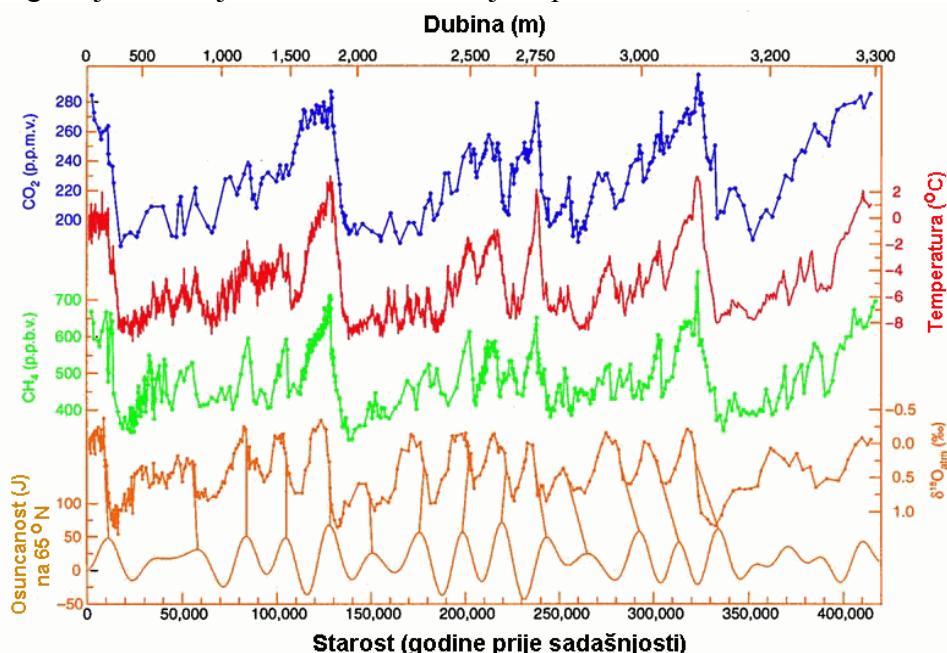
Ispravnost Milankovićeve hipoteze o klimatskim ciklusima potvrđena je brojnim rezultatima geoloških i paleoklimatskih istraživanja na sedimentima stvorenim u periodu

do unazad 440 miliona godina, tako da danas, njegov "Kanon osunčanja" služi kao osnovna referenca za paleoklimatska i sedimentološka istraživanja širom Svijeta.

Analizom paleoklimatskih podataka duboko u prošlost Zemlje (slika 50a), utvrđen je dominantni ciklus ponavljanja glacijacije sa periodom od 100.000 godina. Jedini poznati ciklus sa takvom vremenskom učestanošću je promjena ekscentriciteta zemljine putanje oko Sunca. Međutim, ukupna promjena insolacije za vrijeme takvog ciklusa iznosi samo 0,1%. Zbog toga još uvijek ostaje otvoreno pitanje: zašto se javlja tako značajna reakcija klimatskog sistema na Zemlji na tako male promjene u osunčanju, odnosno – da li i neki drugi, do sada nepoznati astronomski fenomen, može da utiče na pojavu tog ciklusa? Novija proučavanja glacijalnih ciklusa ukazuju na mogućnost da dominantni ciklus od 100 hiljada godina može biti uzrokovani promjenom nagiba putanje Zemlje oko Sunca (čiji period iznosi upravo 100 hiljada godina u odnosu na tzv. nepromjenljivu ravan ekliptike određenu ugaonim momentom cijelog sunčevog sistema) uslijed čega je moguće da Zemlja ulazi u eventualnu sjenku nekog kosmičkog oblaka prašine, ili u zonu repa neke komete, što bi moglo značajno dugotrajno smanjiti osunčanost zemljine površi.



Tipičan izgled glečera.



Slika 50a. Rezultati analize jezgra bušotine u ledu na Antarktiku, koji su obuhvatili starost od 420 hiljada godina. Dijagram prikazuje utvrđeni sadržaj elemenata u ledu: ugljen-dioksida, metana, kiseonika, zatim sračunatu temperaturu i osunčanost izraženu u ekvivalentnoj energiji (džuli) na geografskoj širini od 65°N .

Korišćenjem modela promjena osunčanosti Zemlje uslijed njenih orbitalnih varijacija, moguće je izvesti i odgovarajuće prognoze o budućem razvoju klimatskih elemenata. Međutim, kako antropološki faktor ima sve značajniji uticaj na globalne klimatske prilike, čiji dalji uticaj nije moguće sa sigurnošću determinisati, to je očigledno teško izvesti

pouzdanije prognoze. Takođe, mehanizam uticaja orbitalnih promjena na stanje klime još uvijek nije u potpunosti rastumačeno, pa nije moguće ni izvesti neki pouzdan model daljeg razvoja globalnih klimatskih prilika na Zemlji. Ignorišući antropogeni faktor i druge moguće uzroke kratoročnih promjena klime, izvedeni prognozni modeli pokazuju da je dugoperiodični trend globalnog smanjenja temperature započeo prije 6.000 godina i da će se nastaviti u narednih 23 do 50 hiljada godina (zavisno od primijenjenog numeričkog modela). S obzirom da čovjek svojim aktivnostima ubrzano povećava globalnu temperaturu na Zemlji (o čemu smo ranije govorili), očigledno da nije jasno kakav će biti sumarni rezultat ni u bliskoj niti u daljoj budućnosti.

5. GEOFIZIKA

Geofizika je vrlo kompleksna nauka, koja se bavi proučavanjem svih fizičkih polja Zemlje kao planete, njenim oblikom, ali i kontrolisanim, vještačkim stvaranjem određenih fizičkih polja i elastičnih talasa, njihovim mjerjenjem i interpretacijom u cilju identifikovanja strukturne građe zemljine unutrašnjosti, istraživanja rudnih ležišta (raznih orudnjenja, naftnih ležišta), podzemnih voda, radi rješavanja brojnih inženjerskih problema, arheoloških istraživanja, ekoloških problema podzemnih zagađenja vode i tla, za potrebe projektovanja seizmički sigurnih objekata u trusnim područjima, kao i za potrebe rješavanja mnogih drugih konkretnih problema. Iz tih razloga, geofizika se može podijeliti na **teorijsku** ili globalnu (koja proučava globalna fizička polja planete – koja se često nazivaju geofizička polja) i **primijenjenu** geofiziku.

Dakle, u obije varijante ove naučne discipline, geofizika proučava sva fizička polja Zemlje: gravitaciono, magnetsko, topotno i električno. U primijenjenom obliku geofizika koristi metode i instrumente zasnovane na mnogobrojnim najsavremenijim tehnološkim dostignućima, kao što su gravimetrija, geomagnetizam, radiometrija, geotermija, zatim geoelektrične metode, seizmičke metode, geofizički karotaž bušotina i mnoge druge. Drugim riječima, primijenjena geofizika je oblast geofizike koji proučava i koristi prirodna i vještački stvorena fizička polja i elastične talase, radi proučavanja strukturne građe i karakteristika duboke zemljine unutrašnjosti, zatim za rješavanje raznovrsnih problema geotehnike, inženjerske geologije, hidrogeologije, istraživanje rudnih resursa, energetskih izvora (ugljovodonika i uglja), istraživanje okeana i zemljine unutrašnjosti, kao i mnogih drugih kompleksnih problema u brojnim naučnim disciplinama

Geofizika ima široku primjenu u svim geonaukama, koje pružavaju planetu Zemlju, ali i druge planete i nebeska tijela. Posebno su značajne primjene geofizičkih metoda u svim oblastima geologije, geochemije, geodezije i fizičke geografije.

Geofizičke metode se temelje na postojanju razlike u fizičkim i hemijskim svojstvima stijena i objektima istraživanja, koje prouzrokuju određene manifestacije u fizičkim poljima ili svojim prisustvom mijenjaju njihove karakteristike. Kao što smo naveli u Uvodu, geofizika koristi brojne metode istraživanja, od kojih su najznačajnije: gravimetrija, geomagnetizam, radiometrija, geotermija, zatim geoelektrične, elektromagnetske i seizmičke metode, geofizički karotaž bušotina i mnoge druge.

Praktični aspekt geofizičkih metoda obuhvata postupke instrumentalnog opserviranja tih fizičkih polja ili elastičnih talasa, kao i postupke matematičke obrade i analize podataka tih opservacija, u cilju identifikovanja uzročnika tih polja i njihove geološke interpretacije, utvrđivanje strukturne građe zemljine unutrašnjosti itd.

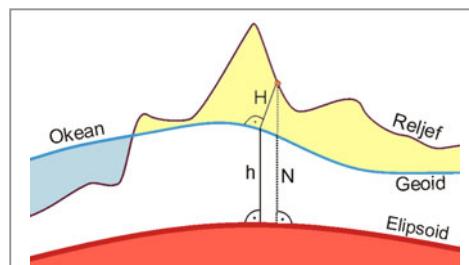
5.1. Gravitaciono polje Zemlje

Kao što smo već naveli, u prvoj aproksimaciji, Zemlja se može smatrati sfernim tijelom. Međutim, zbog ekvatorijalnog ispupčenja od 21,4 km, u znatno boljoj aproksimaciji, Zemljin oblik odgovara rotacionom elipsoidu sa spljoštenošću 1/298,257 i poluprečnikom na ekvatoru (velikom poluosom elipsoida) od 6378,137 km. Takav elipsoid je utvrđen 1984. godine kao **svjetski geodetski sistem**, kratko nazvan **WGS84***, koji se koristi kao referentni sistem za vrlo veliki broj primjena u geodeziji, geofizici, satelitskoj navigaciji i drugim oblastima.

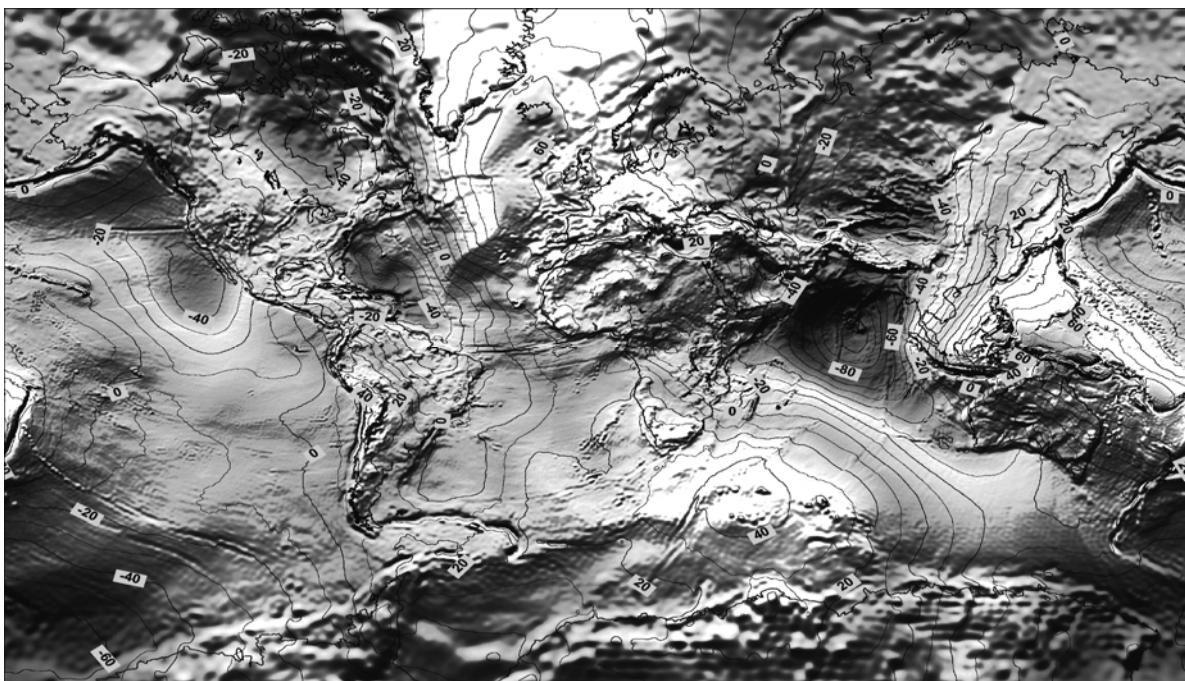
* od engleskog naziva: *World Geodetic System* iz 1984. god.

Zemlja zapravo ima oblik **geoida** i predstavlja površ konstantne potencijalne energije (ekvipotencijalnu* površ) koja se poklapa sa površi srednjeg nivoa okeana i koju bi zauzela vodena masa (pod dejstvom gravitacije) kada bi kanalima bila dovedena do bilo koje tačke na Zemlji, ali bez efekata plime, vjetra i vodenih struja.

Površ geoida je znatno neregularnija od elipsoida (slika 51), ali je mnogo ravnija (uniformnija) od stvarne fizičke površi Zemlje – njenog reljefa. Dok reljef osciluje u granicama od najveće dubine okeana –11 kilometara u oblasti Marijana rova u zapadnom dijelu Tihog Okeana, do najviših planinskih vrhova Mont Everesta - od preko +8 kilometara (8856 metara), geoid varira u granicama nešto manjim od 200 metara. Odstupanje stvarnog oblika Zemlje, odnosno geoida, od njegove najbolje aproksimacije rotacionim elipsoidom, naziva se **undulacijom** (talanjem) ili **visinom geoida**, a to odstupanje se kreće u granicama od -107 metara u Indijskom Okeanu, do +85 metara u regionu filipinskih ostrva u zapadnom dijelu Tihog Okeana (slika 52).



Slika 51. Način izražavanja visine tačke na zemljinoj površi preko međusobnog rastojanja reljefa, geoida i elipsoida.



Slika 52. Undulacije geoida (odstupanje od rotacionog elipsoida) izražene u metrima. Tamnijim nijansama sive boje prikazane su negativne, a svjetlijim pozitivne vrijednosti undulacija.

Visina geoida se izražava kao njegovo odstupanje (udaljenost) od rotacionog elipsoida (na primjer elipsoida WGS84), a predstavlja normalno rastojanje (slika 51) ove dvije površi (N). Visina neke tačke na realnoj zemljinoj površi (h), odnosno visina reljefa (slika) može se izraziti kao zbir tog rastojanja i rastojanja između geoida i reljefa (H).

Vertikala u nekoj tački na zemljinoj površi, zapravo je normala na geoid. Ugao između normale na geoid i normale na referentni elipsoid predstavlja **odstupanje vertikale** u tački posmatranja (ugao δ na slici 51), a veličina tog odstupanja zavisi od karaktera gravitacionih sila na mjestu osmatranja, odnosno od rasporeda masa ispod zemljine površi.

* Ekvipotencijalna površ je površ iste (fiksne) vrijednosti u ovom slučaju gravitacionog potencijala (potencijalne energije).

Određivanje oblika geoida je prilično kompleksan zadatak. Taj proračun se obavlja na bazi rezultata preciznog mjerjenja gravitacionog polja na zemljinoj površi i mjerjenja rastojanja tačaka od referentnog elipsoida, obično primjenom satelitskog sistema globalnog pozicioniranja (GPS) na ogromnom broju tačaka.

Sila gravitacionog privlačenja Zemlje nije jednaka na zemljinoj površi, već se mijenja kao posljedica odstupanja oblika Zemlje od homogene sfere – zbog deformacija na ekvatoru, nehomogenog rasporeda masa u zemljinoj unutrašnjosti, neregularnog oblika reljefa i masa koje reljef obuhvata, ali i zbog različitog efekta centrifugalne sile u zavisnosti od položaja tačke posmatranja u odnosu na ekvator. Gravitaciona sila se značajno mijenja i sa visinom tačke posmatranja.

Samo u prvoj aproksimaciji, kao što smo već konstatovali, Zemlju možemo tretirati kao homogenu sferu, koja formira gravitacionu silu ekvivalentnu tačkastoj masi ili tijelu čija je cjelokupna masa koncentrisana u njegovoј centralnoј tački. Prema Njutnovom zakonu gravitacije, dvije tačkaste mase **M** i **m** na međusobnom rastojanju **r** centara tih masa O_1 i O_2 , respektivno (slika 53), privlače se gravitacionom silom koja je proporcionalna proizvodu tih masa i obrnuto proporcionalna kvadratu njihovog rastojanja:

$$F = \frac{G \cdot M \cdot m}{r^2}$$

pri čemu je **G** univerzalna gravitaciona konstanta, koja iznosi $G = 6,67 \cdot 10^{-11} N \cdot m^2 kg^{-2}$.

Prema drugom Njutnovom zakonu kretanja, sila je proporcionalna proizvodu mase i ubrzanja te mase (**g**):

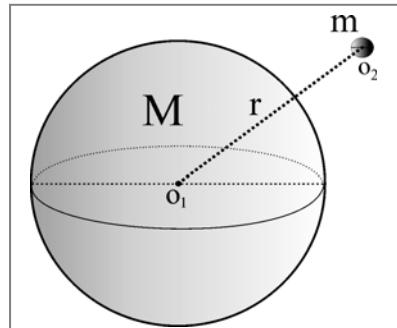
$$F = mg$$

Ako u ovim izrazima usvojimo da je **M** masa Zemlje (homogene i sferno simetrične, bez rotacije), a **m** masa objekta na njenoj površi (ili negdje iznad nje), na rastojanju **r**, tada **g** odgovara gravitacionom ubrzanju kojom gravitaciona sila Zemlje djeluje na objekat mase **m**, pa se nakon izjednačavanja ovih relacija, može izraziti to ubrzanje gravitacione sile Zemlje, kao:

$$g = \frac{G \cdot M}{r^2}$$

Jedinica za gravitaciono ubrzanje u Internaciononom sistemu jedinica (SI) je **m/s²**, dok je ranije korišćena jedinica bila **gal** (cm/s²) odnosno u praksi znatno češće korišćena 1.000 puta manja – **mgal** (miligal) i milion puta manja - **μgal** (mikrogal). Zbog praktičnosti, ove stare jedinice se često koriste i danas.

Ako u sljedećoj, drugoj, aproksimaciji, Zemlju izrazimo rotacionim elipsoidom sa uniformno raspoređenim masama u njegovoј unutrašnjosti, koji rotira oko svoje kraće ose brzinom kojom rotira i Zemlja, ubrzanje gravitacione sile **g** u nekoј tački na površi takvog tijela, odnosno



Slika 53. Gravitaciono privlačenje masa **M** i **m** na međusobnom rastojanju **r**.

Zemlje, zavisiće samo od geocentrične širine* ϕ te tačke mjerene od ekvatora (slika 54) i može se izraziti u uprošćenom obliku kao:

$$\mathbf{g} = g_e \left[1 + \left(\frac{5}{2}m - \frac{17}{4}mf \right) \sin^2 \phi + \left(f \frac{f - 5m}{8} \right) \sin^2 2\phi \right]$$

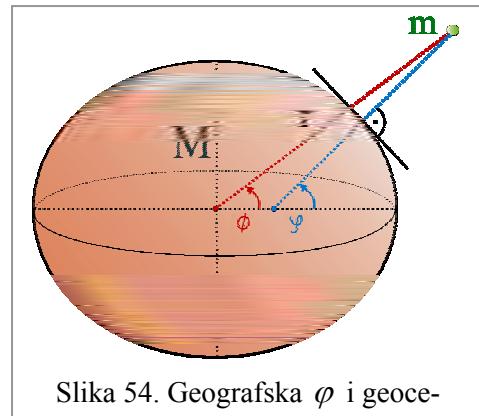
pri čemu je g_e vertikalna komponenta gravitacione sile na ekvatoru, m konstanta koja je približno jednaka količniku vrijednosti centrifugalne sile i gravitacionog ubrzanja na ekvatoru, a iznosi 0,00346775, dok konstanta f predstavlja spljoštenost geoida i iznosi 0,0033528. Ova formula se naziva ***Internacionalnom gravitacionom formulom za Zemlju*** i može se pisati i u prostijem obliku, vezanom za rotacioni elipsoid WGS84 kao:

$$g_o = 9,780327 \cdot [1 + 0,00503024 \cdot \sin(2\phi) - 0,0000058 \cdot \sin^2(2\phi)] \quad [\text{m/s}^2]$$

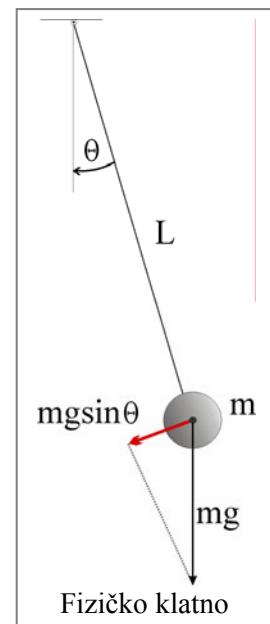
Za ekvator ($\phi=0^\circ$) iz gornje formule slijedi $g_e=9,780327 \text{ m/s}^2$, a za polove ($\phi=90^\circ$), $g_p=9,829468 \text{ m/s}^2$.

Dakle, gornja formula za **normalno gravitaciono polje**, kao što smo naglasili, izražava gravitaciono ubrzanje (vertikalnu komponentu) **na površi rotacionog homogenog elipsoida** (sa poluprečnikom na ekvatoru 6.378,136 km i na polovima 6.356,751 km i spljoštenošću od 1/298,257) sa masom jednakom masi Zemlje. Efekat rotacije Zemlje stvara centrifugalnu silu, koja u principu ima suprotan pravac od gravitacione sile. Istovremeno, zbog spljoštenosti Zemlje, tačke bliže polovima su za oko 21 km bliže zemljinom centru, što izaziva takođe smanjenje jačine gravitacionog polja u pravcu od ekvatora ka polovima. Ukupna promjena (smanjenje) gravitacionog ubrzanja od ekvatora do polova je mala i iznosi samo $53 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$ ili 5,3 gala (cm/s^2), što je samo 0,5 % od vrijednosti ukupnog gravitacionog ubrzanja. Formula za normalno gravitaciono polje obuhvata i ove promjene.

Relacija za normalno gravitaciono ubrzanje ima veliki značaj, s obzirom da su odstupanja između stvarnog gravitacionog polja Zemlje i vrijednosti definisanih ovom formulom vrlo mala u poređenju sa ukupnom gravitacionom silom Zemlje. Iz tih razloga, polje definisano tom relacijom naziva se **normalnim poljem**, a odstupanja gravitacionog polja na zemljinoj površi od vrijednosti definisanih ovom formulom predstavljaju **anomalno polje** ili **gravitacionu anomaliju**. Prema tome, gravitaciona anomalija će indicirati prostor sa stijenskim masama koje imaju različitu gustinu od prosječne gustine stijena u regionalnim razmjerama. Ove varijacije gravitacionog polja (odnosno njegovog efekta – gravitacione sile) proporcionalne su veličini tih anomalijskih masa, kao i veličini odstupanja gustine tih stijena od prosječnih u regionu.



Slika 54. Geografska ϕ i geocentrična ϕ širina na elipsoidu.



5.1.1. Gravimetrija

* Veza između geocentrične ϕ i geografske širine φ definisana je jednostavnom relacijom: $\tan(\phi) = (1-f)^2 \cdot \tan(\varphi)$, pri čemu je f spljoštenost elipsoida. Za WGS84, $f=1/298,257223$, pa je $\tan(\phi) = 0,993063 \cdot \tan(\varphi)$.

Mjerenje gravitacionog ubrzanja se izvodi primjenom dvije, principijelno različite metode: **dinamičke** i **statičke**. Dinamičke metode obuhvataju grupu instrumenata za mjerenje ubrzanja opažanjem periode oscilovanja klatna ili vremena slobodnog pada tijela. Ovim metodama se najčešće opažaju apsolutne vrijednosti ubrzanja (njegove ukupne vrijednosti), a rjeđe razlike ubrzanja između dvije tačke. Statičkim metodama određuju se samo relativne vrijednosti, odnosno razlike ubrzanja između dvije tačke. Instrumenti za mjerenje gravitacionog ubrzanja nazivaju se **gravimetrima**.

Period oscilovanja jednog fizičkog klatna i gravitaciono ubrzanje, kako nam je poznato iz gradiva fizike, povezani su jednostavnim matematičkim izrazom:

$$T = 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

pri čemu **T** označava periodu oscilacije tog klatna, **L** njegovu fizičku dužinu (rastojanje između tačke oslonca i centra mase klatna), a **g** gravitaciono ubrzanje koje djeluje na masu klatna.

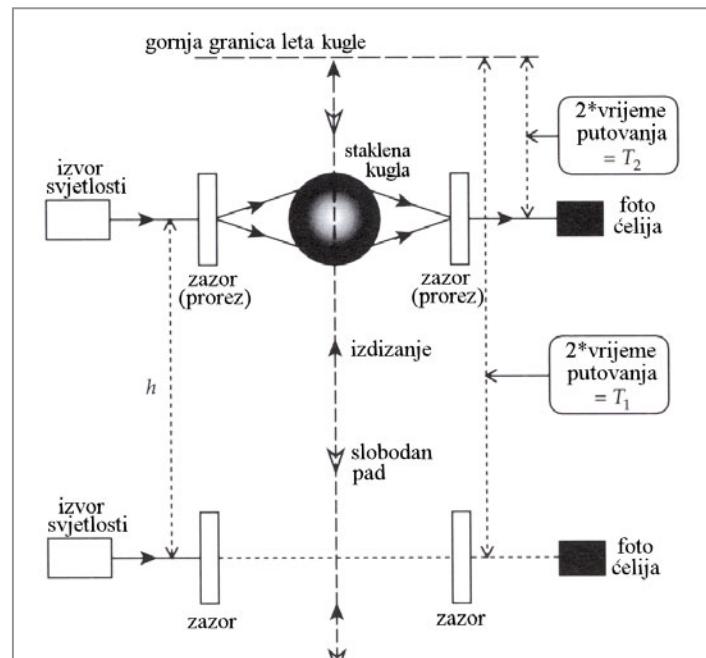
Odavde proističe da preciznim osmatranjem perioda oscilovanja klatna, uz njegovu poznatu fizičku dužinu, možemo odrediti gravitaciono ubrzanje **g**. Međutim, zbog raznih negativnih fizičkih uticaja na tačnost mjerenja perioda, (kao što je promjena dužine klatna zbog promjene temperature, otpor u tački vješanja klatna, trenje u nesavršenom vakumu i sl.) ova metoda je napuštena. Savremene dinamičke metode određivanja absolutne vrijednosti gravitacionog ubrzanja bazirane su na slobodnom padu predmeta, pa se nazivaju i **balističkim metodama**.

Metode slobodnog pada zasnovane su na jednačini koja definiše pređeni put **s** tijela pri slobodnom padu, u vremenu **t**, pod dejstvom gravitacionog ubrzanja **g**:

$$s = \frac{g \cdot t^2}{2}$$

odakle slijedi da se gravitaciono ubrzanje može odrediti kao:

$$g = \frac{2 \cdot s}{t^2}$$



Slika 55. Princip rada gravimетra baziranog na slobodnom padu staklene kugle.

Na slici 55 je šematisirano prikazan princip rada jednog gravimētra na principu slobodnog pada staklene kugle: nakon izbacivanja staklene kugle sa donjeg nivoa ka gornjoj granici leta kugle, kugla započinje slobodan pad u vakuumskom prostoru; prolazeći ispred gornje foto-ćelije, kugla će (zbog svog sferičnog oblika) fokusirati uzak zrak svjetlosti iz izvora svjetlosti sa lijeve strane, u gornjem dijelu uređaja, što će detektovati foto-ćelija; kugla će nastaviti slobodan pad do donjeg nivoa na kojem se takođe nalazi identičan izvor svjetlosti i foto-ćelija, pa će prolaz kugle ponovo biti registrovan. Mjereći preciznim hronometrom vrijeme potrebno kugli da slobodnim padom pređe put između dvije foto-ćelije, moguće je sračunati vrijednost gravitacionog ubrzanja sa visokom tačnošću, iz relacije koja se može izvesti iz upravo prikazanih izraza:

$$g = \frac{8 \cdot h}{t_1^2 - t_2^2}$$

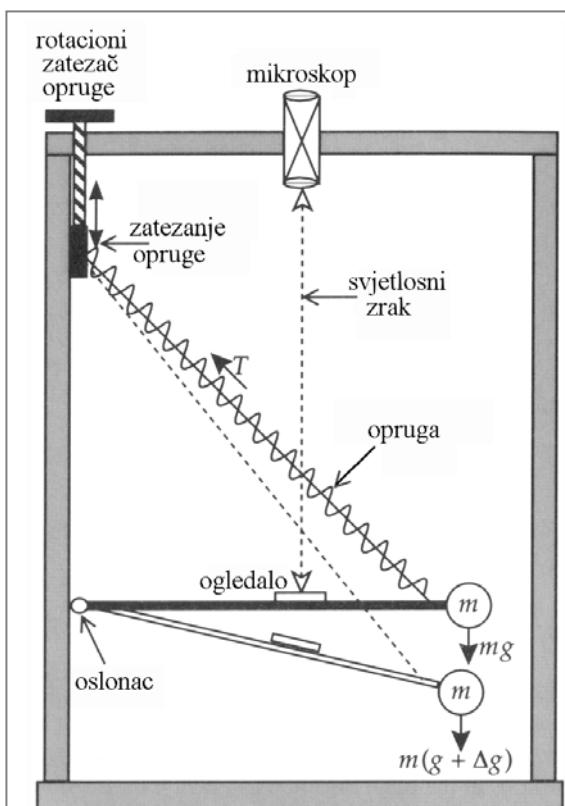
gdje h predstavlja vertikalno rastojanje između dvije foto-ćelije (slika 55) a t_1 i t_2 , vremena prolaska kugle ispred donje i gornje foto-ćelije, respektivno.

Na današnjim uređajima baziranim na opisanom principu mjerjenja, postiže se tačnost mjerjenja vremena pada kugle od 10^{-10} sekundi, pa je ostvarena tačnost ovako posredno mjerene ubrzanja, oko 5-10 mikrogala (10^{-8} m/s^2).

Mjerenje gravitacionog ubrzanja dinamičkim metodama, zbog složenosti i robusnosti takvih gravimetara, kao i vrlo dugog vremena potrebnog za jedno kompletno opažanje, koriste se samo za mjerjenje u kontrolisanim uslovima, tako da se primjenjuju isključivo za određivanje apsolutnih vrijednosti ubrzanja na repernim gravimetrijskim tačkama državne mreže.

Statične metode mjerjenja gravitacionog ubrzanja u većini su zasnovane na korišćenju principa gravitaciono vrlo osjetljivog, balansiranog tega fiksiranog na zategnutoj opruzi (slika 56) i poluzi, tako je sistem doveden blizu astaticnog stanja (uslovno stabilnog), čime je osjetljivost uređaja značajno povećana. Naime, masa m (na koju djeluje ubrzanje g) koja se nalazi na kraju poluge sa pokretnim osloncem i ogledalom, povezana je elastičnom čeličnom orugom (T) za precizni rotacioni zatezač opruge. Svjetlosni zrak i mikroskop omogućuju da se opruga zategne zatezačom toliko da se poluga sa ogledalom i masom dovede u neki "nulti položaj" (horizontalni). Na nekoj drugoj tački, sa gravitacionim ubrzanjem $g+\Delta g$ poluga sa masom će istegnuti oprugu nekom drugom silom: $m(g+\Delta g)$, pa će biti potrebno oprugu dodatno zategnuti da bi se poluga ponovo dovela u "nulti položaj" što možemo precizno detektovati na zatezaču. Razlika očitanih vrijednosti na rotacionom zatezaču opruge u ova dva slučaja, biće proporcionalna razlici ubrzanja na te dvije tačke.

Dakle, ovakvi mjerni instrumenti, gravimetri u užem smislu, služe samo za mjerjenje razlike ubrzanja između dvije tačke, pa se oslanjajući se na neku repernu tačku sa poznatom vrijednošću apsolutnog ubtzanja, na osnovu mjerene razlike, može utvrditi apsolutna vrijednost i na toj drugoj tački ili seriji tačaka na kojima je utvrđena sukcesivna razlika ubrzanja. Mjerenje gravimetrom na jednoj



Slika 56. Šematski izgled gravimetra sa oprugom.



Slika 56a. Izgled savremenih gravimetara za mjerjenje razlike ubrzanja: Vordenov tip (Worden) lijevo i La Costa Ramberg (La Coste Romberg) desno.

tački traje samo nekoliko minuta, a ostvarena tačnost danas dostiže par mikrogala.

Redukcija rezultata gravimetrijskih mjerena

Radi eliminacije instrumentalnih grešaka, pretežno uslovljenih nepotpunom temperaturnom stabilizovanju ovakvih portabilnih gravimetara, prilikom terenskim opažanja u mreži tačaka, vrši se ponavljanje mjerena na sistemu odabranih tačaka. Na taj način se snima dnevni tok instrumentalnog ponašanja na tim baznim tačkama, a utvrđeno odstupanje gravimetra ili tzv. hod gravimetra se poništava unošenjem tako dobijenih korekcija. Imajući u vidu da dejstvo Mjeseca i Sunca imaju značajne gravitacione efekte na opažane vrijednosti (kao što smo o tome već govorili u odjeljku o plimi i rotaciji Zemlje) neophodno je u rezultate mjerena unijeti i takve korekcije, na osnovu efemerida (položaja u prostoru i vremenu) za ta nebeska tijela i registrovanog vremena osmatranja na svakoj tački. Slične korekcije se unose i za plimske efekte zemljine kore koje ta dva tijela stvaraju izdizanjem zemljine kore nekoliko desetina centimetara.

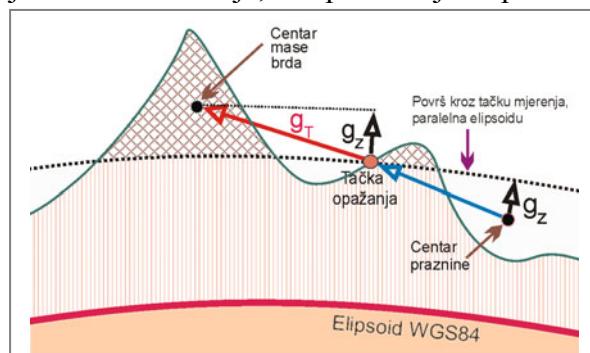
Cilj gravimetrijskih terenskih mjerena, kao što smo već naglasili, je utvrđivanje strukturne građe zemljine kore, kao i identifikovanje načina rasporeda masa anomalno veće ili manje gustine od okolnih stijena, odnosno drugim riječima – utvrđivanje položaja i dimenzija orudnjenja, naftnih ležišta i slično. Iz tih razloga, mjerene podatke gravitacionog ubrzanja na zemljinoj površi, neophodno je oslobođiti svih uticaja koji nemaju neku od navedenih funkcija.

Konstatovali smo da se gravitaciona anomalija definiše kao razlika između mjerene vrijednosti ubrzanja na terenu i normalne vrijednosti ubrzanja na toj tački, koja je sračunata na osnovu formule normalnog polja, izvedenu za rotacioni elipsoid WGS84. Međutim, mjerena vrijednost ubrzanja sadrži i odredene uticaje koje moramo eliminirati. Naime, da bi vrijednosti ubrzanja mjerene na više tačaka (u mreži) međusobno uporedili i izradili kartu anomalija ubrzanja, neophodno je gravitacione uslove u tim tačkama svesti na iste uslove.

Tako, praktično svaka mjerena tačka ima različitu nadmorsku visinu. Dakle, svaka tačka je, u principu, različito udaljena od centra mase Zemlje, odnosno od površi rotacionog elipsoida za koji važi normalno gravitaciono polje, te će iz tih razloga mjereno ubrzanje na svakoj tački biti sa različitim gravitacionim efektom visine tačke. Takođe, mase stijena koje čine reljef terena, značajno gravitaciono utiču na rezultate mjerena, ali na svakoj tački na različit način, zavisno od položaja te tačke u odnosu na raspored masa koje čine reljef. Otklanjanje ovih uticaja i svođenje tačaka mjerena na iste uslove i isti nivo (obično nivo elipsoida WGS84 ili nivo geoida), naziva se **redukcija gravimetrijskih mjerena**, a obuhvata tri vrste korekcija: popravka za reljef, Bugeova popravka i popravka za visinu.

Popravka za uticaj reljefa

Mjerenje ubrzanja na terenu izvodi se gotovo redovno u uslovima neravnog reljefa. Imajući u vidu da mase zemljine kore koje čine reljef, značajno utiču na rezultate mjerena, kao i okolnost da će reljef na svakoj tački izazivati različite vrijednosti tih uticaja, neophodno je u procesu obrade podataka mjerena, izvršiti njihovo svođenje na iste uslove, dakle otkloniti uticaj reljefa u potpunosti. Na slici 57 je prikazan šematisiran primjer uticaja topografije na mjereno vertikalne komponente gravitacionog ubrzanja, u uslovima razuđenog reljefa. Mase brda sa lijeve strane tačke opažanja, koje obuhvata površ reljefa i horizontalna površ (odnosno paralelna sa elipsoidom ispod tačke mjerena) izaziva ukupno gravitaciono ubrzanje g_T u tački mjerena, odnosno vertikalnu



Slika 57. Gravitacioni uticaj reljefa u tački opažanja.

komponentu g_z . Ova komponenta je orijentisana suprotno od ubrzanja koje izaziva cijela Zemlja (upravno na elipsoid, odnosno geoid, sa smjerom nadolje).

Isti slučaj će biti i sa “nedostajućim” masama u depresiji reljefa na desnoj strani od tačke mjerena na slici 57. Naime, zbog nepostojanja masa u tom dijelu prostora (vazduh ima zanemarljivo malu masu) nastaje deficit gravitacionog ubrzanja koji će u tački opažanja stvoriti takođe negativni uticaj, odnosno smanjeće vertikalnu komponentu ubrzanja. Da bi se izvršila kompenzacija ovog uticaja i, kao što smo rekli – sve tačke mjerena dovele u iste uslove, u praksi se primjenjuje procedura otklanjanja uticaja reljefa, na taj način što se numerički obavlja “uklanjanje” svih masa zemljine kore (odnosno njihovog uticaja) iznad ravni kroz tačku mjerena, paralelno elipsoidu i istovremeno – “popunjavanje” svih depresija ispod tačke mjerena (slika 58a). U postupku se obično koristi srednja gustina stijena zemljine kore ($2,67 \text{ t/m}^3$) ali se često sprovodi i posebna procedura proračuna realne gustine, na bazi rezultata gravimetrijskih mjerena. Za vodene mase okeana obavlja se identičan postupak, s tim što se za kompenzacionu gustinu uzima razlika između srednje vrijednosti gustine stijena zemljine kore i gustine morske vode ($1,034 \text{ t/m}^3$).

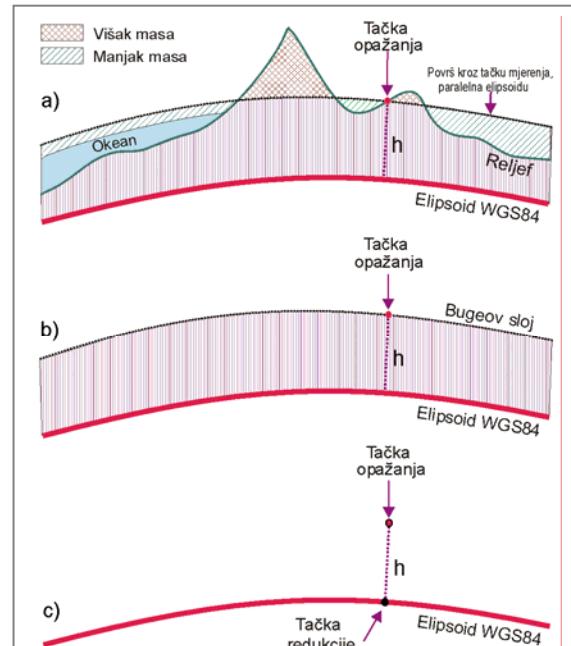
Ovaj kompleksni postupak izvođenja topografske popravke, sastoji se u preciznom proračunu gravitacionog uticaja svih masa koje široko okružuju tačku mjerena, na osnovu detaljnog modela digitalnog reljefa (sa trodimenzionim podacima za svaku tačku reljefa) sa velikom gustinom tačaka. Sračunati gravitacioni uticaj reljefa se dodaje rezultatu osmatranja na tački mjerena, jer, kako smo rekli – uticaj reljefa je uvijek negativan. Ovakva procedura se obavlja za svaku tačku mjerena, za uticaj reljefa do rastojanja od 20 kilometara kada se izvode lokalna gravimetrijska ispitivanja, odnosno do 171 km kod regionalnih ispitivanja. Gustina, odnosno rezolucija korišćenog digitalnog modela reljefa se mijenja od samo par metara za najbliže strukture, do 1.000 metara za udaljene mase reljefa.

Bugeova redukcija

Nakon završene topografske korekcije, rezultati opažanja gravitacionog ubrzanja svedeni su na identične uslove (slika 58b), ali se između njihovog zajedničkog nivoa (visine) i referentnog elipsoida (na koji želimo konačno da svedemo rezultate mjerena) nalazi sloj masa zemljine kore, uniformne debljine, pa je neophodno i njega ukloniti. Ovaj sloj je nazvan prema francuskom naučniku Pjeru Bugeu* – **Bugeov sloj**, kao i odgovarajuća popravka. Primjenom integralnog računa, lako se dokazuje da ovakav sloj (sa beskonačnim pružanjem oko tačke mjerena) stvara vertikalnu gravitacionu komponentu Δg_B u tački opažanja:

$$\Delta g_B = 2 \cdot \pi \cdot G \cdot \sigma \cdot h$$

gdje G , kao i ranije označava univerzalnu gravitacionu konstantu, σ gustinu stijenskih masa ovog sloja, a h – njegovu debljinu. Ako se, kao što smo naveli, upotrijebi srednja gustina stijena zemljine kore (2.67 t/m^3) Bugeova popravka ili



Slika 58. Redukovanje rezultata opažanja gravitacionog ubrzanja na nivo rotacionog elipsoida: a) topografska popravka, b) otklanjanje Bugeovog sloja, c) svođenje na nivo elipsoida.

* Pierre Bouguer (1698.-1758.) francuski hidrograf i matematičar.

popravka za beskonačni homogeni sloj će imati jednostavni izraz:

$$\Delta g_B = 1.11953 \cdot h$$

Ako se h izražava u metrima, onda je dobijena popravka u $\mu\text{m/s}^2$.

Popravka za visinu

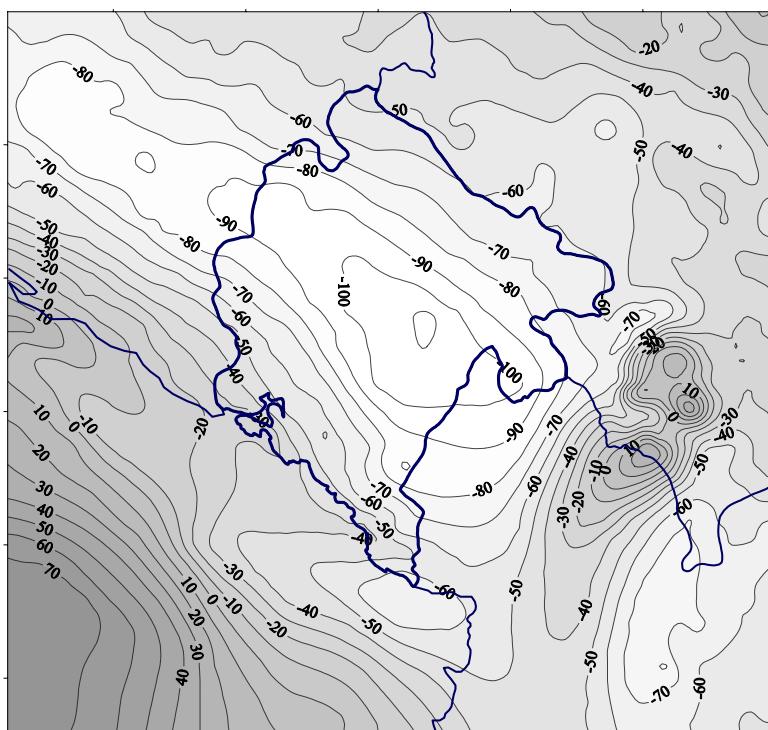
Najzad, eliminacijom Bugeovog sloja, tačke opažanja će ostati izdignute za visinu tog sloja (h) iznad elipsoida (slika 58c), pa je neophodno izvršiti još jednu korekciju rezultata gravitacionih opažanja, odnosno unijeti popravku za visinu. Ova popravka je ekvivalentna priraštaju gravitacionog ubrzanja sa visinom (sa negativnim znakom, s obzirom da gravitaciona sila opada sa visinom) i definiše se izrazom:

$$\Delta g_o = -\frac{2g_o}{R}h$$

gdje h označava visinu tačke iznad elipsoida, a R srednji poluprečnik Zemlje, dok je g_o srednja vrijednost normalnog gravitacionog ubrzanja (na površi rotacionog elipsoida) pa se nakon zamjene tih vrijednosti dobija jednostavan izraz za opadanje ubrzanja sa visinom:

$$\Delta g_o = -3,086 \cdot h$$

pri čemu se visina h izražava u metrima, a popravka Δg_o dobija u $\mu\text{m/s}^2$. Prema tome, ova relacija izražava da se sa svakim metrom visine, gravitaciono ubrzanje smanji za $3,086 \mu\text{m/s}^2$, odnosno $308,6 \mu\text{gala/s}^2$.



Slika 59. Karta Bugeovih gravitacionih anomalija vertikalne komponente ubrzanja, za teritoriju Crne Gore i šire okoline.

Popravka za visinu se često naziva i popravka za slobodan vazduh, s obzirom da se izvodi nakon otklanjanja masa između tačke mjerjenja i elipsoida.

Dakle, pošto nam je konačan cilj dobijanje anomalijskih vri-jednosti gravitacionog ubrzanja na tački, odnosno u mreži opažanih tačaka, potrebno je od ovako dobijenih redukovanih vrijednosti

ubrzanja, odbiti normalnu vrijednost ubrzanja na geoidu. U sumarnom obliku, gravitacionu anomaliju sa svim ovim korekcijama možemo pisati kao:

$$\Delta g = g_M + \Delta g_T - \Delta g_B + \Delta g_o - g_o$$

gdje Δg označava konačnu vrijednost gravitacione anomalije vertikalne komponente, ili kako se često naziva u ovom obliku – Bugeova anomalija, zatim Δg_T predstavlja topografsku korekciju i g_o vrijednost normalnog gravitacionog ubrzanja na referentnom elipsoidu.

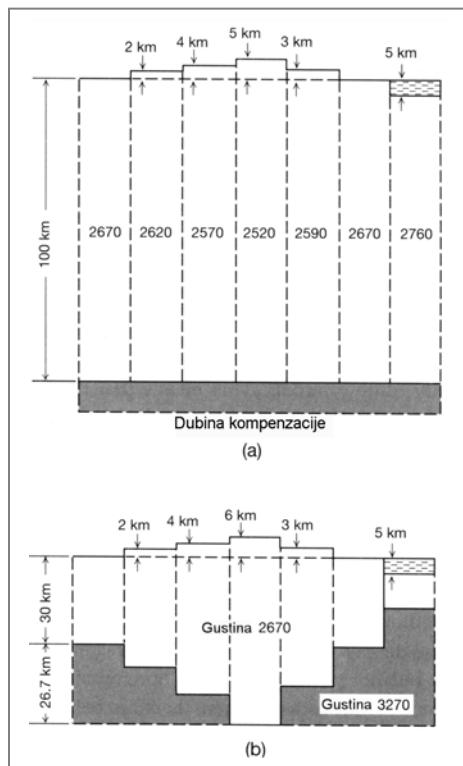
Na slici 59 naveden je jedan primjer karte Bugeovih anomalija koja obuhvata prostor Crne Gore i okoline, a koja je dobijena primjenom opisane procedure. Vrijednosti anomalija su izražene u miligalima. Na slici se dobro uočava karakterističan, amplitudno izražen prostrani minimum ove anomalije u centralnom dijelu Crne Gore i dalje ka zapadu, što predstavlja rezultat značajnog zadebljanja zemljine kore na tom prostoru. Znatno tanja zemljina kora u regionu južnog Jadrana je manifestovana značajnim povećanjem Bugeove anomalije. Na prostoru sjeveroistočne Albanije i jugozapadne Srbije zapaža se pozitivna gravitaciona anomalija, koja pak predstavlja efekat prisustva magmatskih izlivnih bazaltnih stijena na tom prostoru. Manifestacija debele zemljine kore izrazitim negativnim vrijednostima Bugeove anomalije, posljedica je potiskivanja gušćeg materijala donjih djelova litosfere, koji se karakteriše gustom od oko $3,3 \text{ t/m}^3$, stijenama zemljine kore sa prosječnom gustom od $2,67 \text{ t/m}^3$, dakle stvaranjem tzv. deficita mase. Ovaj fenomen je posebno izražen u širim regionalnim okvirima, kod vrlo izraženog reljefa većeg rasprostranjenja. Eliminacija ovog fenomena obavlja se uvođenjem posebne korekcije, nazvane izostatičkom redukcijom.

Izostatičke redukcije

Bugeova gravitacione anomalijasadrži dakle anomalijski uticaj neravnomernog rasporeda svih masa ispod zemljine površi (a ne ispod referentnog elipsoida na koji smo mjerena sveli radi njihovog dovođenja u iste uslove). Dakle, takva nominalija će sadržati i regionalne i lokalne komponente, odnosno biće uslovljena kako položajem rudnih ležišta, različite strukturne građe stijenskih masa i slično, tako i regionalnim uticajem promjene debljine cijele litosfere. U cilju eliminacije uticaja promjene debljine zemljine kore na rezultate gravimetrijskih mjerena, uvodi se popravka za efekat izostazije, odnosno izostatička redukcija.

U istoriji primjene ove korekcije, značajno mjesto pripada hipotezi Prata (slika 60a) i Ejrija (slika 60b) u kojima je izvršen pokušaj objašnjenja mehanizma plutanja zemljine kore u regionima visokih planinskih masiva, konsekventni gravitacioni efekti na zemljinoj površi i način redukovanja tog efekta.

Po hipotezi Prata zemljina kora se može prikazati skupom prizmatičnih blokova različite gustine, koji plutaju po bazalnoj magmi, pri čemu korijen tih prizmi zauzima identičnu dubinu. Gustina prizmi u ovakvom modelu je obrnuto proporcionalna njihovoј debljini. Kod Ejrijeve hipoteze, gustina prizmatičnih blokova zemljine kore je identična, ali je zato ukupna debljina blokova, kao i njihovo tonjenje u magmu, proporcionalna prosječnoj visini prizme nad morem (slika 60).



Slika 60. Izostatičke kompenzacije prema hipotezi Prata (a) i Ejrija (b)

U današnjoj praksi sve veću primjenu ima pristup koji predstavlja kombinaciju ove dvije hipoteze, a koji je bliže realnoj manifestaciji ove pojave.

Interpretacija gravimetrijskih anomalija i identifikovanje fizičkih karakteristika njihovog uzročnika, kao konačni cilj cijelokupnih ispitivanja, obavlja se primjenom kompleksnih numeričkih postupaka modelovanja fizičkih karakteristika uzročnika kroz proceduru dovođenja do podudarnosti sračunatih anomalija za taj model i mjerene vrijednosti gravitacionog polja.

5.2. Magnetsko polje Zemlje

Planeta Zemlja posjeduje relativno snažno magnetsko polje, čije karakteristike su vrlo slične magnetskom polju ogromnog šipkastog magneta, koji bi bio postavljen u njenom središtu, sa orijentacijom ose gotovo paralelnu sa osom rotacije. Sjeverni magnetski pol se sada nalazi na krajnjem sjeveru Kanade, a južni - u oblasti Antarktika.

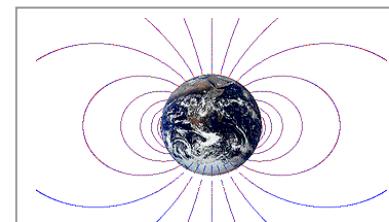
Magnetosfera

Prostor oko Zemlje u kojem se manifestuje dejstvo njenog magnetskog polja naziva se **magnetosferom** (slika 61). Još pedesetih godina prošlog vijeka, posredstvom vještačkih satelita, utvrđeno je da je struktura magnetosfere kompleksna i da je čine tzv. **radijacioni pojasi** ili **Van Alenovi* prstenovi**, zatim **magnetski** ili **plazma-štít**, **magnetopauza** i **magnetski rep**. Postoje dva osnovna radijaciona prstena: **spoljašnji**, koji gradi elektronski pojas i **unutrašnji**, koji čini pojas protona (slika 61).

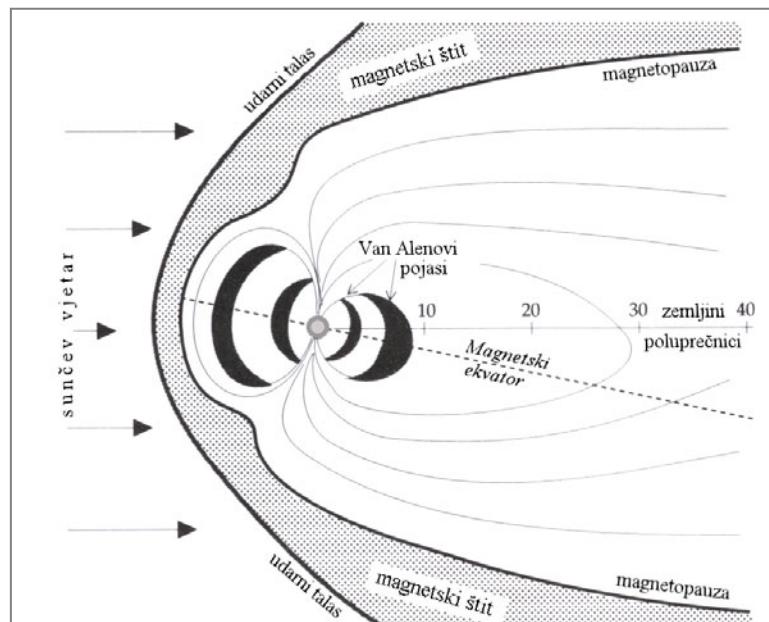
Snažne erupcije na Suncu i tako stvoreni sunčev vjetar, kao što smo to već pomenuli, izazivaju prostornu deformaciju magnetosfere (slika 61) na taj način što mlaz energetskih čestica vrši sabijanje magnetskog polja na strani Sunca, a izduženje na noćnoj strani. Na sunčevoj strani magnetosfere se prostire do rastojanja od oko 70 hiljada kilometara od Zemlje, dok se na naćenoj strani magnetski rep izdužuje do rastojanja od više desetina zemljinih poluprečnika, odnosno dopire praktično do orbite Mjeseca.

Magnetopauza označava oštru granicu u prostoru između magnetosfere i slobodnog prostora u kojem se manifestuje solarni vjetar. Od te granice, energetske čestice sunčevog vjetra bivaju zahvaćene magnetskim poljem Zemlje i primorane da se kreću saglasno strukturi tog polja.

Zajedničkim dejstvom radijacionih pojaseva, plazma-štita i geomagnetskog polja uopšte, visokoenergetske (jonizovane, odnosno nanelektrisane) čestice koje



Šematski izgled linija magnetskog polja Zemlje.



Slika 61. Izgled magnetosfere pod dejstvom sunčevog vjetra, sa osnovnim elementima magnetosfere.

* Prema američkom fizičaru James Van Allenu (1914.-).

dopiru do magnetosfere u snažnim mlazevima, bivaju značajno energetski oslabljene i "zarobljene" magnetskim poljem Zemlje, a zatim primorane da u atmosferu uđu u zonama magnetskih polova. Tom prilikom, zbog sudara sa atomima gasova vazduha, nastaje dalje sniženje njihovog energetskog nivoa, a kao sekundarni efekat nastaje ionizovanje i svjetlucanje gasova atmosfere. Ovaj fenomen je dobro vidljiv noću u polarnim oblastima, stvarajući efekte vrlo impresivnih prelivanja svjetlosti, koje je nazvano ***polarne noći*** ili "aurora borealis" (slika 62).

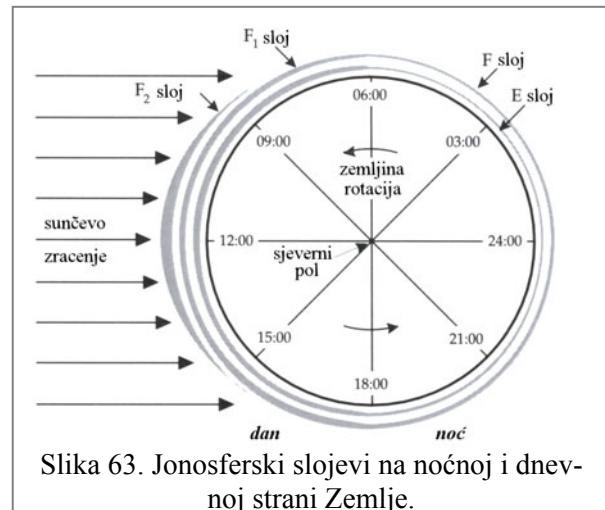
Sunčev vjetar stalno djeluje na okilni prostor i samu magnetosferu, ali se njegovo dejstvo intenzivira u periodima sunčevih protuberanci, kada stvara tzv. ***geomagnetsku buru*** u magnetskom polju Zemlje, s obzirom da izaziva izvjesnu deformaciju svih kompenenata geomagnetskog polja u cijeloj magnetosferi, kao i na zemljinoj površi. Geomagnetske bure se javljaju znatno češće u periodima maksimalnih aktivnosti Sunca, izazivajući polarnu svjetlost i u neuobičajenim oblastima, znatno udaljenim od magnetskih polova – čak i u srednjoj Evropi ili SAD. Međutim, snažne geomagnetske bure mogu da izazovu i oštećenje telekomunikacionih satelita, ugroze kosmonaute pri boravku na otvorenom prostoru u Kosmosu, pa čak i da onemoguće normalno funkcionisanje mreže električnih i telekomunikacionih linija na Zemlji.

Zaštitno dejstvo zemljinih radijacionih pojaseva (slika 61) i uopšte geomagnetskog polja na živi svijet na Zemlji, od izuzetnog je značaja. Naime, opisanom interakcijom snažnog magnetskog polja Zemlje i elektromagnetskih zračenja sa Sunca, kao i iz Kosmosa uopšte, onemogućen je prođor visokoenergetskih čestica (sa velikom potencijalnom energijom) i zračenja u donje slojeve atmosfere. To znači da geomagnetsko polje ima ulogu velikog i efikasnog štita od vrlo štetnih zračenja iz Kosmosa.



Slika 62. Polarna svjetlost snimljena na sjevernoj hemisferi.

Kada govorimo o zaštitnoj funkciji magnetosfere, navedimo još jednom jonosferu, koju smo već pominjali u odjeljku o atmosferi, a koja takođe ima vrlo važnu zaštitnu funkciju od štetnih zračenja. Naime, visokoenergetski gama i X-zraci, kao i ultravioletno zračenje sa Sunca izazivaju ionizaciju molekula azota i kiseonika u gornjim slojevima atmosfere, na visini iznad 50 km (pa do gornje granice atmosfere), stvarajući ionizovani sloj u atmosferi, nazvan jonosfera. Jonosferu čini čak 5 slojeva, koji se označavaju slovima: D, E, F₁, F₂ i G sloj – od nižih ka višim regionima atmosfere (slika 63). Svaki od ovih slojeva može da reflektuje radio-talase, omogućavajući radio-komunikaciju na velikim rastojanjima. Debljina i stepen ionizacije slojeva mijenja se u toku dana na taj način što se broj slojeva i njihova debljina na strani ka Suncu povećava i to proporcionalno stepenu osunčanosti, dok na noćnoj strani jonosferski slojevi istanjavaju i dijelom nestaju.



Slika 63. Jonosferski slojevi na noćnoj i dnevnoj strani Zemlje.

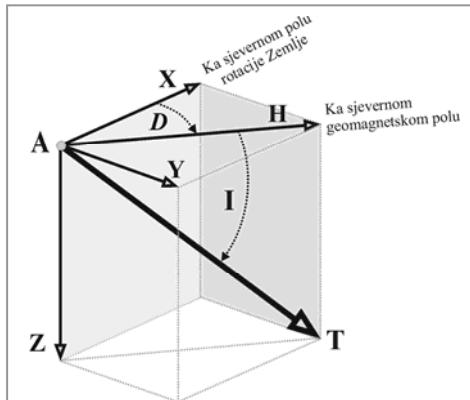
Elementi geomagnetskog polja

Pomenuli smo da je magnetsko polje Zemlje nalik na polje ogromnog šipkastog magneta, smještenog približno u centru Zemlje. Iz tih razloga, magnetne linije sile geomagnetskog polja ponašaju se kao da izviru iz sjevernog pola i uviru u južni pol i to pod određenim uglom u svakoj tački zemljine površi. Tangenta na magnetske linije sile određuje pravac totalnog vektora polja T, koji se može razložiti na horizontalnu (H) i vertikanu (Z) komponentu, kao što je to prikazano na slici 64 i 67.

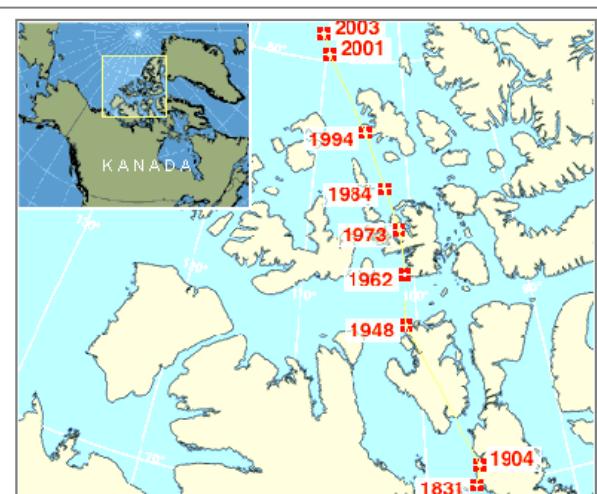
Ugao koji gradi pravac astronomskog pola (pola rotacije Zemlje) i pravca magnetskog sjevera (naveli smo da se ova dva pola ne nalaze na istom mjestu) naziva se **magnetskom deklinacijom (D)**. Igla magnetskog kompasa na svakoj tački zemljine površi će zauzeti pravac vektora H – dakle usmjeriće se ka magnetskom sjeveru. Ako kompas postavimo vertikalno, njegova igla će se orijentisati u pravcu totalnog vektora (T) a njen nagib u odnosu na horizontalnu ravan označiće ugao **magnetske inklinacije (I)** ili nagib tog vektora.

Magnetsko polje Zemlje se mijenja sa položajem tačke posmatranja na Zemlji, ali i u funkciji vremena, što je vezano sa samim uzročnim mehanizmom tog polja. Vjeruje se da se osnovni generator magnetskog polja Zemlje nalazi u dubokoj zemljinoj unutrašnjosti – u zoni samog jezgra Zemlje i da se stvara termičkim magneto-hidrodinamičkim procesima kretanja materije u tečnom dijelu jezgra, što je ekvivalentno kretanju električne struje ogromnog intenziteta u zoni spoljašnjeg dijela jezgra. Magnetskom indukcijom tako stvorenom električnog toka, nastaje snažno magnetsko polje koje se manifestuje i na Zemlji, kao i u širokom prostoru oko Zemlje. Ovako, uprošćeno opisan proces kompleksnog, tzv. **samođrživog geodinama** u zemljinoj unutrašnjosti, još uvijek je samo hipotetičan i još uvijek predstavlja jednu od najvećih nepoznanica geofizike. Moguće je i da proces relativno bržeg rotiranja čvrstog jezgra u odnosu na ostatak Zemlje, koji smo pominjali, ima izvjesnog uticaja na formiranje i održavanje geodinama, što tek predstavlja predmet istraživanja.

Dakle, karakteristike geomagnetskog polja se mijenjaju i tokom vremena za izvjesne, relativno male vrijednosti. Mijenju se čak i položaji magnetskih polova*. Na slici 65 je prikazana trasa kretanja sjevernog magnetskog pola (sjeverna Kanada) tokom prethodne 173 godine. Promjene mogu biti spore - kao u prethodnom primjeru (tada se nazivaju sekularnim ili vjekovnim) ili brze,



Slika 64. Komponente geomagnetskog polja: T – totalni vektor, X, Y – horizontalne komponente u pravcu astronomskog sjevera i istoka, respectivno, H – ukupna horizontalna komponenta, Z – vertikalna komponenta; I – inklinacija totalnog vektora, D – deklinacija.

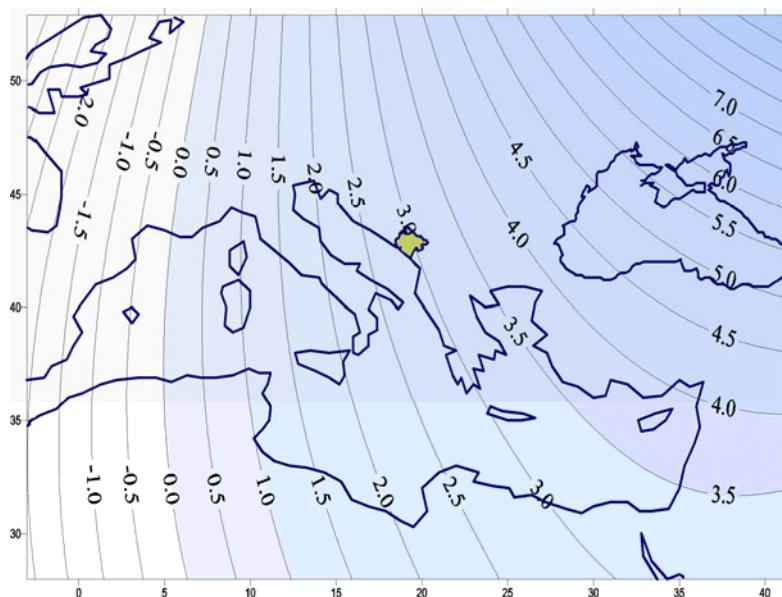


Slika 65. Kretanje sjevernog magnetskog pola tokom perioda 1831.-2003. godina.

* Magnetski polovi se definišu kao tačke na zemljinoj površi u kojima magnetska inklinacija ima vrijednost 90° (na sjevernom $+90$, a na južnom -90), dok na magnetskom ekvatoru inklinacija ima nullu vrijednost, što znači da je totalni vektor horizontalan.

koje su najčešće uslovljene iznenadnom, pojačanom sunčevom aktivnošću.

Da bi se stanje geomagnetskog polja (odnosno njegovih komponenti) izrazilo tačno u određenom trenutku, tokom vremena je neophodno vršiti stalno korigovanje matematičkog modela koji opisuje to polje, dijelom uključujući i sekularne promjene. Zbog toga se svakih nekoliko godina utvrđuju korektne vrijednosti koeficijenata Međunarodnog geomagnetskog referentnog modela IGRF, koji pored koordinate tačke posmatranja sadrži i vrijeme kao promjenljivu veličinu. Tako, na primjer, na osnovu Međunarodnog geomagnetskog referentnog modela za 2000. godinu, vrijednost deklinacije sračunate za sredinu 2004. godine za prostor Crne Gore, iznosi $+3,0^{\circ}$ (slika 66). Za utvrđivanje položaja pravog geografskog (astronomskog) sjevera neophodno je od pravca magnetskog azimuta tačke vizure oduzeti vrijednost deklinacije na mjestu osmatranja. Srednja vrijednost inklinacije u Crnoj Gori iznosi od 59° na jugu, do 60° na sjeveru, dok prosječna vrijednost intenziteta totalnog vektora geomagnetskog polja na tom prostoru iznosi oko 47.000 nT.



Slika 66. Vrijednosti deklinacije (izražene u stepenima) na području Mediterana na osnovu Međunarodnog geomagnetskog referentnog modela IGRF2000 za sredinu 2004. godine.

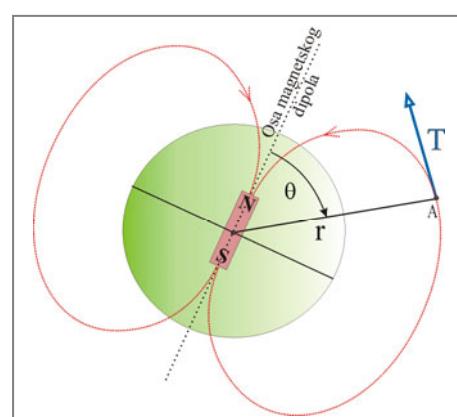
Kao što smo naglasili, u prvoj aproksimaciji, zemljino magnetsko polje se može izraziti kao polje magnetskog dipola, sa centrom u centru Zemlje i osom koja se poklapa sa magnetskom osom Zemlje. Za magnetski dipol (slika 67) važe jednostavne relacije koje definišu komponenate njegovog magnetskog polja i to:

horizontalna komponenta (slika 64) definisana je izrazom: $H = \frac{m \cdot \cos(\theta)}{r^3}$,

pri čemu je m magnetski moment Zemlje (odnosno jačina ekvivalentnog magnetskog dipola), a θ ugao između ose dipola magneta i radijusa vektora r od centra dipola do tačke posmatranja (slika 65),

vertikalna komponenta polja: $Z = \frac{2 \cdot m \cdot \sin(\theta)}{r^3}$,

dok se ukupno ili **totalno polje** može izraziti na osnovu



Slika 67. Uz magnetsko polje dipola.

Pitagorine teoreme i slike 64 kao:

$$T = \sqrt{H^2 + Z^2},$$

$$\text{pa iz gornjih izraza imamo: } T = \frac{m}{r^3} \sqrt{1 + 3 \cdot \sin^2(\theta)}.$$

Najzad, ugao **inklinacije (I)** totalnog vektora T polja magnetskog dipola, može se dobiti diobom vertikalne i horizontalne komponente:

$$\tan(I) = \frac{Z}{H} = \frac{2 \cdot \sin(\theta)}{\cos(\theta)} = 2 \cdot \tan(\theta).$$

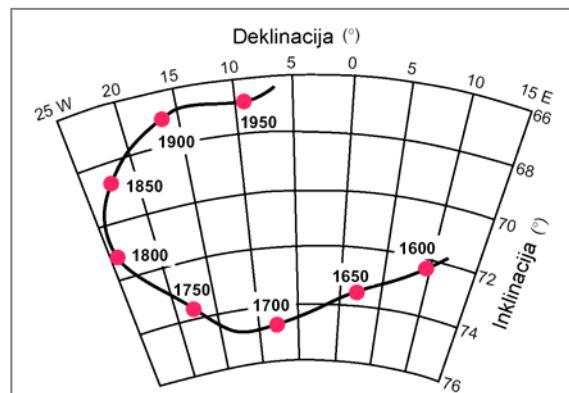
Raelno magnetsko polje Zemlje obuhvata dipolni i nedipolni* dio. Međutim, zbog svoje kompleksnosti izražava se metodom sferne harmonijske analize, preko redova specijalnih funkcija - tzv. pridruženih Ležandrovih polinoma, što izlazi iz okvira ovog kursa.

Varijacije geomagnetskog polja

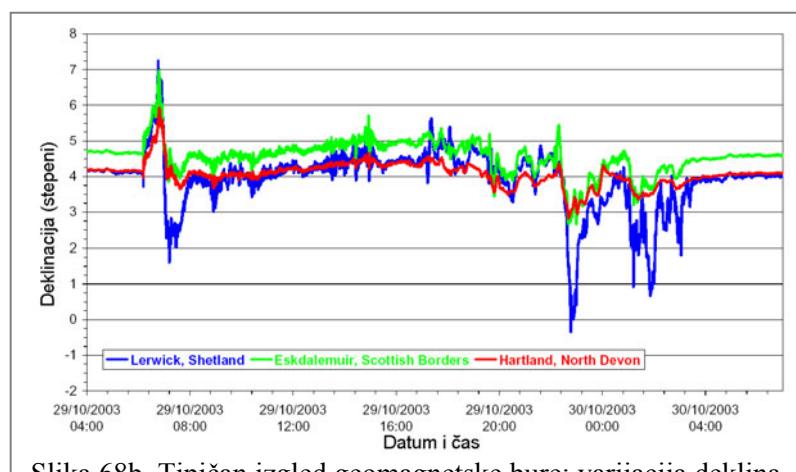
Kao što smo već konstatovali, magnetsko polje Zemlje karakteriše se i izvjesnim pro-mjenama vrijednosti tokom vremena, kako po njegovom intenzitetu, tako i po pravcu. Ove varijacije komponenata geomagnetskog polja mogu biti kretkoperiodične i dugoperiodične (ili sekularne, odnosno vjekovne).

Iako su sekularne varijacije vrlo spore (reda su godine i vijeka) ipak primjetno mijenjaju osmatrane vrijednosti geomagnetskog polja na istom mjestu, kako dipolnog, tako i nedipolnog dijela polja. Na slici 68a prikazan je efekat sekularnih promjena geomagnetskog polja, mjerena tokom četiri vijeka u Grinviču (Engleska) u vidu dijagrama koji izražava stanje magnetske deklinacije i inklinacije tokom tog perioda. U ovom primjeru se vidi da je tokom perioda osmatranja, deklinacija na tački mjerena mijenjala vrijednost čak za 40 stepeni (od +15 do -25 stepeni), a inklinacija za više od 7 stepeni.

Treba navesti i svojstvo sekularnih promjena geomagnetskog polja da one imaju izražen **„zapadni hod“**, odnosno uočeno je konstantno pomjeranje elemenata tzv. nedipolnog polja u pravcu zapada i to brzinom od oko 0,2 lučna stepena na godinu, što uslovjava da se jedan cijeli kružni ciklus obavi za oko



Slika 68a. Sekularne varijacije geomagnetskog polja izražene promjenom inklinacije i deklinacije na istoj tački tokom vremena - u Grinviču (Engleska) u periodu od 1600. do 1950. godine.



Slika 68b. Tipičan izgled geomagnetske bure: varijacija deklinacije snimljena na tri geomagnetske opservatorije u Velikoj Britaniji tokom 24 časa.

* dio geomagnetskog polja koji ne korelira sa poljem tipa šipkastog magneta (dipola) smještenog blizu centra Zemlje.

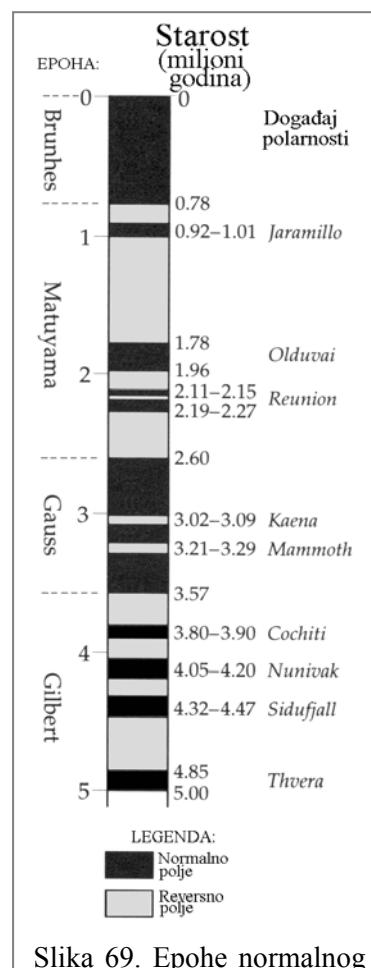
1.800 godina.

Analize pokazuju da je dvije trećine amplituda kratkoperiodičnih promjena geomagnetskog polja, uslovljeno procesima van Zemlje (slika 68b), a samo jedna trećina je vezana za uzročnike u Zemlji i na Zemlji. Tako, na primjer, značajno variranje vrijednosti geomagnetskog polja prouzrokuje promjena relativnog položaja zemljine obrtne ose u odnosu na Sunce tokom godine. Kao što smo naveli, magnetske bure uzrokovane sunčevim vjetrom, izazivaju značajne promjene u geomagnetskom polju, a takođe smo konstatovali da je broj i intenzitet magnetskih bura proporcionalan sunčevoj aktivnosti, koja se značajno mijenja tokom njegovog jedanaestogodišnjeg ciklusa.

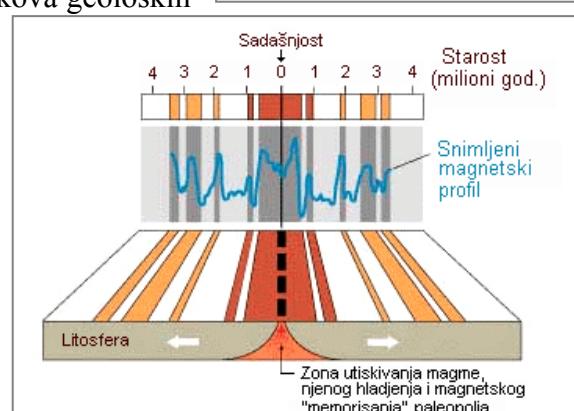
Palomagnetizam je oblast geomagnetskih metoda u geofizici, koja se bavi instrumentalnom analizom karakteristika ranijeg geomagnetskog polja na uzorcima magmatskih* i sedimentnih stijena, koje su nastale u nekom periodu istorije Zemlje.

Magnetizacija magmatskih stijena nastaje dejstvom magnetskog polja sredine u kojoj se stijena hlađi, u momentu kada se njena temperatura spusti ispod tzv. Kirijeve temperaturne tačke* magnetske čestice (feromagnetični materijal) u stijeni memorišu (zadrže) takav karakter magnetizacije. Takva magnetska svojstva uzoraka stijene ispituju se u laboratoriji posebnim paleomagnetskim instrumentima, pri čemu se utvrđuju karakteristike nekadašnjeg (tzv. paleo) magnetskog polja Zemlje. Ispitivanjem velikog broja uzoraka iz raznih perioda istorije Zemlje, moguće je izvršiti rekonstrukciju karaktera promjene magnetskog polja tokom dugog perioda njene istorije. Paleomagnetske metode danas služe kao jedan od osnovnih alata za utvrđivanje starosti stijena i fosila, istorijskih tokova geoloških procesa itd., o čemu ćemo govoriti kod utvrđivanja geološke starosti stijena i procesa na Zemlji.

Zemljino magnetsko polje (kao i sunčev) tokom istorije više puta je mijenjalo svoj smjer (približno za 180 stepeni). Naime, paleomagnetskom analizom magmatskih stijena u kojima su, njihovim naglim hlađenjem, memorisane karakteristike geomagnetskog polja koje je vladalo u to vrijeme, pouzdano je konstatovano da su se ove tzv. **reverzije** (obrtanja) polja zbivale relativno često. Prosječno vrijeme između ciklusa različitog polariteta iznosi



Slika 69. Epohe normalnog (crne površi) i reversnog (sive površi) geomagnetskog polja (sive površi) sa kratkotrajnim dogadjajima polarnosti, tokom posljednjih 5 miliona godina.



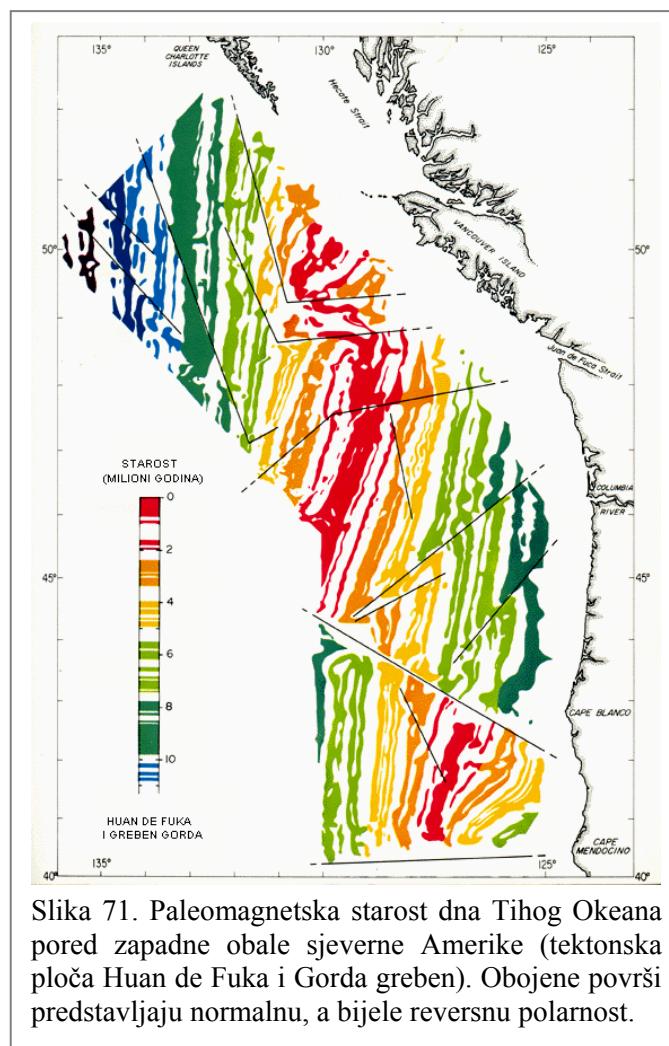
Slika 70. Šematsizovan proces utiskivanja magme u zoni okeanskog grebena, u uslovima različitih geomagnetskih epoha, sa izgledom snimljenog magnetskog profila.

* Magmatske stijene nastaju eruptivnim izlivanjem usijane, tečne magme iz zemljine unutrašnjosti na njenu površ ili pliche djelove zemljine kore i zatim njenim relativno brzim hlađenjem i kristalizacijom (vidi oblast Geologija – magmatske stijene).

* na primjer temperatura od 580 °C predstavlja Kirijevu tačku za magnetit, glavni gvožđev mineral koji je magnetičan.

oko 200 hiljada godina, ali su uočeni i znatno kraći periodi od samo nekoliko hiljada godina (nazvani "događaji" ili "ekskurzije" polarnosti). Na slici 69 je prikazan ciklus smjenjivanja normalnih i reversnih geomagnetskih epoha, zajedno sa kratkotrajnim promjenama polarnosti, tokom posljednjih 5 miliona godina zemljine istorije. Epohe su dobine imena po zaslužnim istraživačima ovog fenomena, a kratkotrajni događaji polarnosti - po lokalitetu gdje su prvi put identifikovani. Sada se nalazimo u periodu normalne polarnosti (epoha Branhiz). Vrijeme prelaza između dvije epohe polarnosti, odnosno dužina trajanja reverzije magnetskog polja, za sada nije poznata, ali se smatra da je kraća od 10, a duža od jednu hiljadu godina. U tom periodu Zemlja i cijeli živi svijet na njoj ostaju bez magnetskog štita od štetnog zračenja, pa se smatra da takvi događaji moraju uzrokovati velike periodične genetske mutacije kod životinjskih i biljnih vrsta.

Revolucionarna potvrda koncepta paleoma-gnetskih metoda ostvarena je geomagnetskim ispitivanjem okeanskog dna (slika 70) kada je sa velikom detaljnošću i visokom preciznošću određen cjelokupan proces sukcesivnog širenja okeanskog dna u zonama grebena i utvrđene brojne reverzije polarnosti magnetskog polja Zemlje tokom posljednjih 200 miliona godina. Na slici 68 šematski je prikazan proces nastajanja okeanskog dna, simetričnim širenjem tanke čvrste kore u zoni okeanskih grebena, pri čemu se litosfera razmiče na mjestu grebena, a magma popunjava tu prazninu, zatim se hlađi i u tom trenutku memorije stanje paleomagnetskog polja. Na gornjem dijelu slike šematski je prikazan dijagram rezultata mjerenja intenziteta geomagnetske anomalije (razlika između mjerjenog i normalnog polja) na kojem se jasno indiciraju mesta nagle promjene polariteta (reverzije) polja. Detaljnijim geofizičkim i geološkim i ispitivanjem, utvrđena je i hronološka skala ovih procesa, koja je na ovoj slici prikazana na samom vrhu, u vidu starosti magmatskih stijena.



Slika 71. Paleomagnetska starost dna Tihog Okeana pored zapadne obale sjeverne Amerike (tektonska ploča Huan de Fuka i Gorda greben). Obojene površi predstavljaju normalnu, a bijele reversnu polarnost.

Slika 71 prikazuje karakterističan primjer rezultata snimanja realnih magnetskih anomalija okeanskog dna u blizini krajnje sjeverozapadne obale sjeverne Amerike (u oblasti tektonske ploče Huan de Fuka – slika 36 u poglavljaju o zemljinoj unutrašnjosti), čiji sadržaj je poslužio i za detaljno strukturno rasčlanjivanje tog prostora. Obojene površi na ovoj slici označavaju periode normalne polarnosti, a neobojene – periode reversne polarnosti, kako je to naznačeno u skali vremena na toj slici.

Na osnovu paleomagnetskih ispitivanja, intenzitet zemljinog magnetskog polja lagano ali konstantno opada već 3.000 godina, dok uzrok takvog ponašanja nije poznat. Do sada nije razjašnjeno ni pitanje odakle potiče energija koja omogućuje održavanje prilično snažnog

magnetskog polja Zemlje - od 24.000 nT^{*} na prostoru oko magnetskog ekvatora, do oko 66.000 nT na magnetskim polovima. To znači da na polovima magnetsko polje, izraženo u jačini električnog toka (u amperima) na dužni metar prostora, odnosno u jedini-cama A/m, iznosi oko 660 A/m. Sračunato je da je za održavanje takvog magnetskog polja potrebna energija koja bi se proizvodila u 10.000 termonuklearnih centrala, odnosno da je ekvivalentna četvrtini ukupne dissipacije termičke energije Zemlje, što je svakako ogromna energija.

5.2.1. Magnetometrija

Mogućnost namagnetisanja neke materije zavisi od njenog fizičkog svojstva koje se naziva **magnetski susceptibilitet**. Prema tom svojstvu mineralne tvorevine se dijele na tri grupe: 1) dijamagnetične (sa negativnim vrijednostima susceptibilnosti), 2) paramagnetični materijali (sa malim pozitivnim vrijednostima susceptibilnosti) i 3) feromagnetični minerali (sa velikim pozitivnim susceptibilitetom). Tipičan predstavnik dijamagnetičnih minerala je kuhinjska so (NaCl), kremen i sl. U grupu paramagnetika spada dosta minerala: pirokseni, olivini, granati itd, dok su tipični feromagnetični minerali gvožđa: magnetit, ilmenit i pirotit.

Geomagnetsko polje Zemlje se kontinualno osmatra na brojnim geomagnetskim opservatorijama Svijeta. Na tim opservatorijama opažaju se vrijednosti svih komponenata geomagnetskog polja, kao i njihove brze i spore varijacije, o čemu se saopštavaju posebni stručni biltenci. Za potrebe ovakvih registrovanja karakteristika magnetskog polja Zemlje razvijene su čitave klase instrumenata, koji su nazvani **magnetometrima** (za mjerjenje apsolutnih vrijednosti geomagnetskog polja) i **variometrima** (za mjerjenje promjena komponenata polja). Brojni instrumenti oba navedena tipa danas su razvijeni na principima najsavremenije tehnologije i omogućuju vrlo precizna i brza osmatranja svih komponenata geomagnetskog polja u svim terenskim uslovima.

Jedan od široko korišćenih, savremenih instrumenta za mjerjenje apsolutnih vrijednosti intenziteta totalnog vektora zemljinog magnetskog polja je tzv. protonski magnetometar. U tom instrumentu je iskorišćen princip mjerjenja magnetskog polja stvorenog precesijom[♦] spina slobodnih protona u tečnosti, koja je za neko kratko vrijeme bila izložena jakom, homogenim spoljašnjem vještačkom polju, koje je zatim naglo prekinuto, kada slobodni protoni bivaju zarotirani pod dejstvom prirodnog magnetskog polja. Brzina precesije slobodnih protona zavisiće samo od intenziteta



Slika 71a. Mjerjenje geomagnetskog polja protonskim magnetometrom.

* Tesla je jedinica za magnetsku indukciju u SI internacionalnom sistemu jedinica, nazvana prema srpskom velikanu elektrotehnike, rođenom u Smiljanu u Lici, Nikoli Tesli (1856.-1943.), ali se koristi i kao ekvivalentna jedinica za jačinu magnetskog polja. Stara jedinica (u cgs sistemu) za jačnu magnetskog polja je Œ /Ersted/ koji ima ekvivalentnu vrijednost od 10^{-5} T. Pošto je Tesla vrlo velika jedinica, u praksi se za izražavanje magnetskog polja Zemlje koristi nT (nano Tesla) odnosno 10^9 T.

♦ Ovdje se pod precesijom podrazumijeva rotacija vektora magnetskog momenta protona.

prirodnog polja. Ovim instrumentom (slika 71a) mogu se izvoditi brza i vrlo precizna terenska i opservatorijska opažanja totalnog intenziteta polja, sa tačnošću od 0,1 nT.

Za potrebe istraživanja rudnih ležišta i strukturalna geološka ispitivanja, obavljaju se posebna terestrička (snimanjem na zemljinoj površi) i aeromagnetska ispitivanja (iz letilica u vazduhu – slika 72).

Kao i kod svih drugih geofizičkih metoda, interpretacija geomagnetskih anomalija predstavlja vrlo kompleksan matematički, geofizički i geološki zadatak, a obuhvata postupak

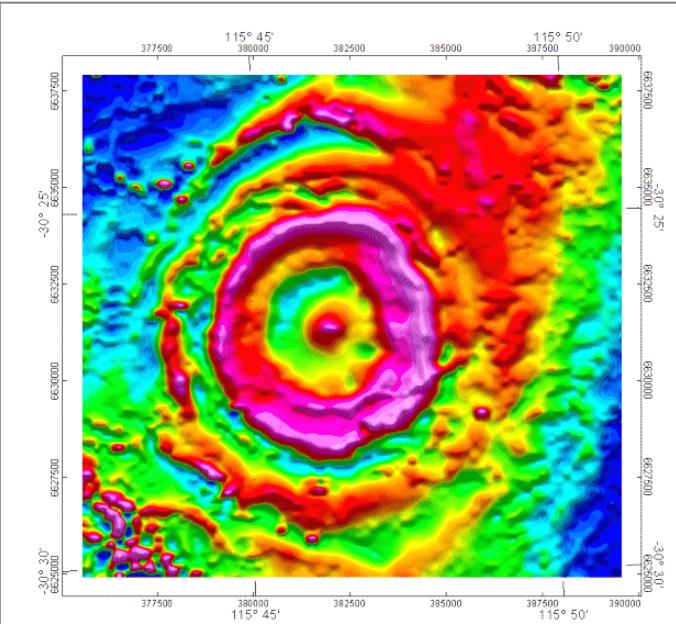
matematičkog modelovanja rezultata terenskih opažanja geomagnetskog polja. Ova procedura ima za cilj utvrđivanje optimalnog modela geološke forme koja je izazvala snimljenu anomaliju, a zasniva se na numeričkoj aproksimaciji fizičkog polja koje stvara numerički model fizičkog uzročnika anomalije i dovođenja do numeričke podudarnosti polja koje je teorijski računato za takav model sa rezultatima realnih terenskih opažanja.

Na slici 73 je prikazan jedan karakterističan primjer geomagnetske anomalije totalnog vektora geomagnetskog polja koja je snimljena u zapadnoj Australiji, a koja predstavlja efekat udara meteorita (prečnika oko 200 metara) i njegovog prodora u zemljinu unutrašnjost. Udarom stvoreno topotorno polje, značajno je izmijenilo magnetska svojstva sedimentnih stijena na širem prostoru, stvarajući kružnu formu geomagnetske anomalije.

Ukoliko se mjerjenje podataka geomagnetskog polja obavlja za potrebe proučavanja strukturne građe zemljine unutrašnjosti ili istraživanja rudnih resursa, nakon obavljenog snimanja komponenata geomagnetskog polja na nekom terenu, vrši se obrada tih podataka, u cilju definisanja **magnetskih anomalija**. Zbog toga je podatke mjerjenja neophodno osloboediti svih elemenata koji "maskiraju" anomaliju, a kod ove vrste mjerjenja to su: magnetsko polje same Zemlje kao planete, odnosno planetarne komponente geomagnetskog polja, zatim magnetski efekti regionalnih razmjera, kao što su magnetska dejstva dubljih regionalnih geoloških struktura, kao i efekti kratkoročnih i dugoperiodičnih promjena geomagnetskog polja (varijacije dnevnog i dugoperiodičnog karaktera). Nakon eliminisanja ove tri osnovne komponente polja čiji sadržaj u anomaliji predstavlja "smetnju", pristupa se numeričkoj obradi dobijene geomagnetske anomalije, koja je zbog bipolarne prirode magnetskog polja, obično prilično kompleksna. Ipak, savremene numeričke metode omogućuju da se korišćenjem računara obavi prilično uspješna interpretacija snimljenih anomalija i da se identificuje karakter, položaj i



Slika 72. Aeromagnetska spitanja koriscenjem avionskog premjera. Magnetski senzor je lociran ispod repa aviona.



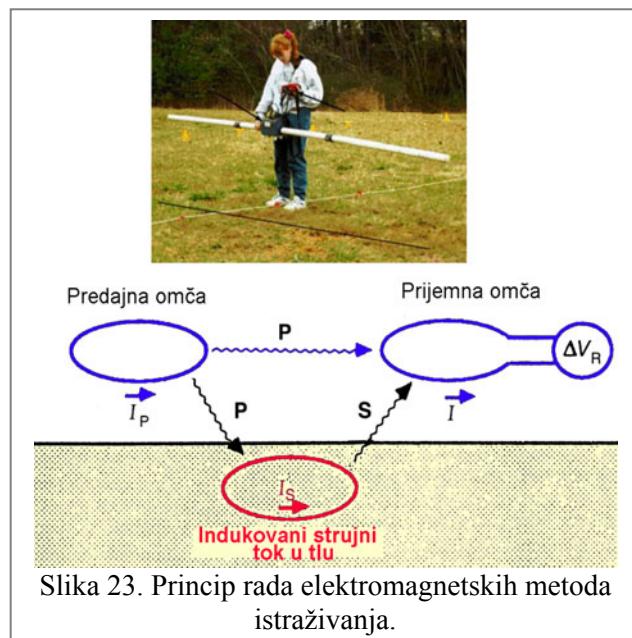
Slika 73. Geomagnetska anomalija totalnog vektora geomagnetskog polja na lokalitetu Jalali u zapadnoj Australiji (prikazana površina je dimenzija 13x13 kilometara).

dimenzijske geološkog izročnika te anomalije. Ako se ova metoda koristi u kombinaciji sa još nekom geofizičkom ili geološkom metodom, puzdanost interpretacije je obično na visokom nivou.

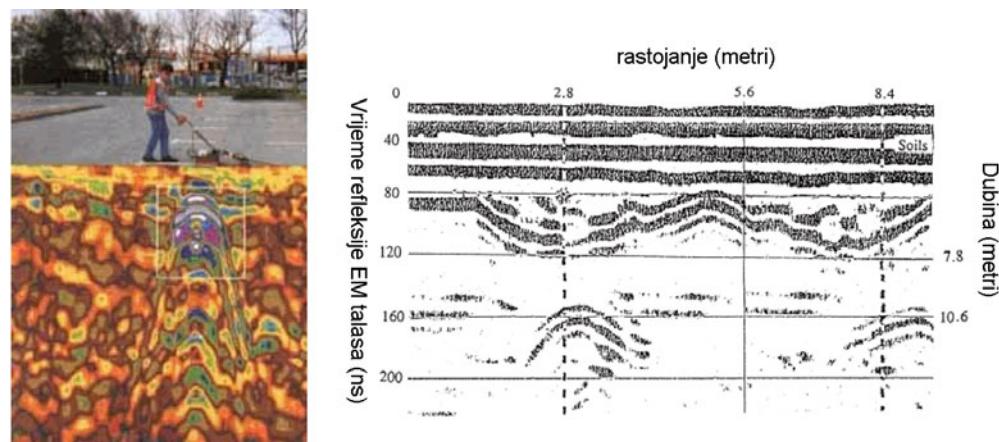
Geomagnetsko polje Zemlje se kontinualno osmatra na brojnim geomagnetskim opservatorijama Svetog. Na tim opservatorijama opažaju se vrijednosti svih komponenata geomagnetskog polja, kao i njihove brze i spore varijacije, o čemu se saopštavaju posebni stručni biltenci. Za potrebe ovakvih registrovanja karakteristika magnetskog polja Zemlje razvijene su čitave klase instrumenata, koji su nazvani **magnetometrija** (za mjerjenje absolutnih vrijednosti geomagnetskog polja) i **variometrija** (za mjerjenje promjena komponenata polja). Brojni instrumenti oba navedena tipa danas su razvijeni na principima najsavremenije tehnologije i omogućuju vrlo precizna i brza osmatranja svih komponenata geomagnetskog polja u svim terenskim uslovima.

5.2.2. ELEKTROMAGNETSKE METODE U GEOFIZICI

Elektromagnetske metode u geofizici koriste (pored prirodnih električnih i elektromagnetskih telurskih polja o čemu smo ranije govorili) vještački stvorena elektromagnetska polja vrlo širokog dijapazona frekvencija talasa - u cilju istraživanja geoloških struktura, rudnih ležišta, rješavanja ekoloških problema ili arheoloških zadataka. Većina tih metoda koristi tehniku generisanja primarnog snažnog elektromagnetskog polja iznad istraživane lokacije, koje u električno provodljivom dijelu tog tla (npr. metaličnom orudnjenu) stvara (indukuje) sekundarno elektromagnetsko polje (odnosno električni tok), koje će izvršiti fazno i amplitudno modifikovanje primarnog polja na zemljinoj površi (slika 23). Karakteristike predajnog polja se registruju posebnom primarnom omčom (navojnicom) u instrumentu, a rezultujuće polje, na izvjesnom rastojanju od primarne omče – biće registrovano sekundarnom omčom. Na osnovu odnosa ova dva polja i snimljene električne i magnetske komponente tog polja na nizu tačaka, i primjenom matematičkih metoda obrade podataka, moguće je utvrditi karakteristike podzemne električno provodljive strukture, koja je izazvala snimljenu anomaliju.



Slika 23. Princip rada elektromagnetskih metoda istraživanja.



Slika 24. Princip primjene metode "georadara" i izgled rezultata snimanja profila (desno).

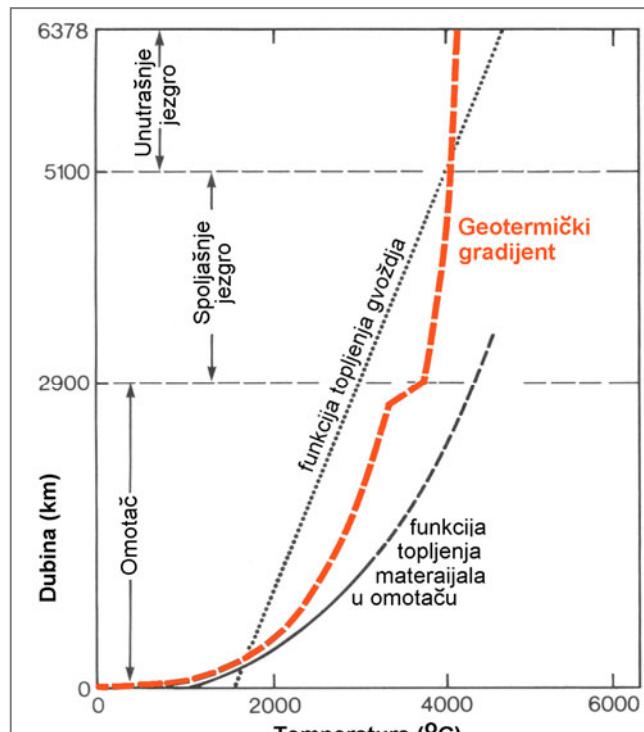
Razvojem vrlo savremene tehnologije, omogućena je koncipiranje i primjena elektromagnetske metode bazirane na registrovanju plitkih refleksija visokofrekventnog elektromagnetskog usmjerjenog talasa (slika 24). Ova metoda, koja je popularno nazvana "georadar", intenzivno se koristi u detaljnem istraživanju plitkih struktura (do oko 15 metara) i podzemnih objekata koji se karakterišu dobrom refleksivnošću elektromagnetskih talasa. Tako na primjer, ova metoda je našla široko polje primjene u arheološkim istraživanjima, ispitivanju strukture betonskih konstrukcija (stubova, mostova, pisti i sl.), ali i za rješavanje brojnih inženjersko-geoloških problema. Promjenom frekvencije elektromagnetskih talasa, moguće je mijenjati dubinu istraživanja u opsjegu od nekoliko centimetara do par desetina metara. Zbog snažne apsorpcije elektromagnetskih talasa u glinovitoj sredini, eventualno prisustvo takvog sloja predstavlja nepovoljnu, ekranizirajuću barijeru za ovu metodu.

5.3. Toplotno polje Zemlje (geotermija)

Geotermija se bavi proučavanjem toplotnog polja Zemlje. Ozbiljnija istraživanja toplotnog polja Zemlje započela su u XIX vijeku, kada je Lord Kelvin* ispravno konstatovao da pozitivan **geotermički gradijent** (proraštaj temperature sa dubinom) mora biti posljedica stanja hlađenja Zemlje. U pokušaju da proračuna starost Zemlje kao planete, Lord Kelvin je pošao od pretpostavke da u Zemlji nema izvora dodatnog zagrijevanja, osim njene originalne, primarne toplote, koju je zadobila u fazi stvaranja. Koristeći prosječan (konstantan) termički gradijent od $36,5\text{ }^{\circ}\text{C/km}$, pod pretpostavkom da je početna temperatura cijele Zemlje bila $5.540\text{ }^{\circ}\text{C}$, sračunao je da je za postizanje sadašnje prosječne temperature na zemljinoj površi, bilo potrebno da prođe 200 miliona godina. Imajući u vidu da je ovakva starost gotovo 23 puta manja od realne, očigledno je da značajna količina topline biva stalno obnavljana u zemljinoj unutrašnjosti, kako je i sam Lord Kelvin prepostavio.

Način promjene temperature u unutrašnjosti Zemlje je za sada poznat samo za relativno male dubine – na osnovu istražnog bušenja (maksimalno do oko 20 kilometara) i termičkih karakteristika magmatskih izliva. Sva dosadašnja istraživanja ukazuju da se maksimalna temperatura u zemljinom jezgru kreće između 4.000 i $5.000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na slici 74 prikazan je jedan uobičajeni termički model zemljine unutrašnjosti, na osnovu kojeg se zapaža da geotermički gradijent u gornjem dijelu spoljašnjeg omotača naglo smanjuje vrijednost (od $30\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ na zemljinoj površi) i da u unutrašnjem jezgru, zbog značajnih pritisaka, uslovjava stanje temperature ispod tačke topljenja gvožđa, što odgovara rezultatima proučavanja karakteristika seizmičkih talasa u tim djelovima zemljine unutrašnjosti.

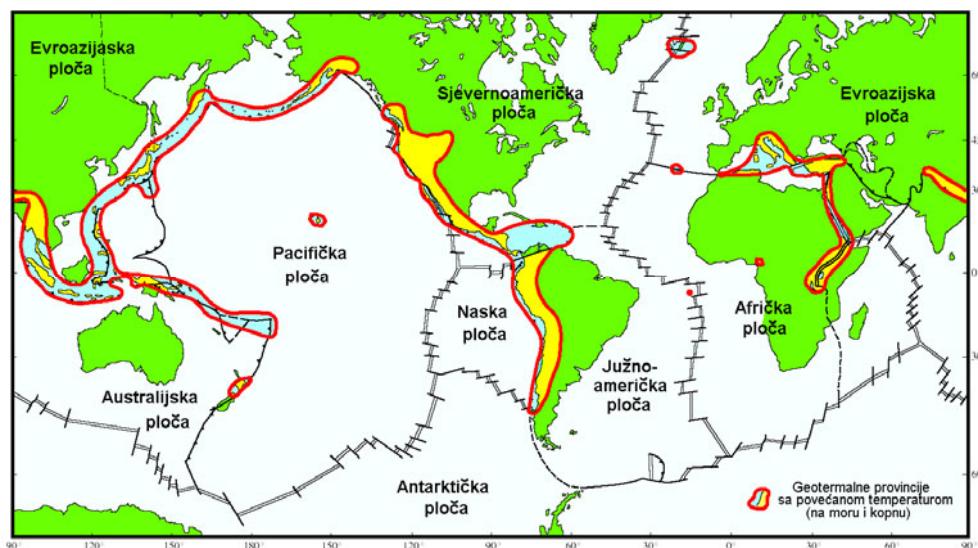
Istraživajem hemijskog sastava različitih vrsta magme, utvrđeno je značajno prisustvo radioaktivnih elemenata u njima, a poznato je da se



Slika 74. Geotermički gradijent u zemljinoj unutrašnjosti.

* Fizičar Lord Kelvin je zapravo Vilijam Tomson (William Thomson, 1824.-1907.) po kojem je skala Kelvinove apsolutne temperature dobila ime.

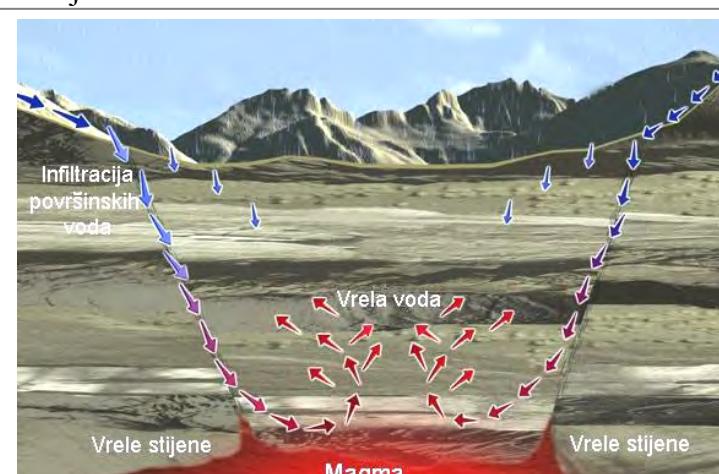
radioaktivnim raspadom takvih elemenata oslobađa značajna količina toplote. Dakle, radioaktivnim raspadanjem nestabilnih teških elemenata (pretežno Urana 235 i 238, Torijuma 232 i radioaktivnog Kalijuma 40) u zemljinom omotaču (unutrašnjem i spoljašnjem) ali i u stijenama zemljine kore, nastaje značajna količina toplote, koja se zatim procesima konvekcije i kondukcije prenosi do zemljine površi, gdje biva emitovana u okolini pristor. Mjerenjem te vrste zračenja, utvrđeno je da prosječna emitovana unutrašnja toplota Zemlje u okolini prostora iznosi 87 mW/m^2 , odnosno od 65 mW/m^2 na kopnu - do 101 mW/m^2 u zonama okeana, što predstavlja posljedicu značajne razlike u debljini kontinentalne i okeanske zemljine kore, kako smo to ranije opisali. Raspodjela topotnog toka na zemljinoj površi značajno zavisi od temperturnih karakteristika spoljašnjeg omotača, što je dokazano analizom brzine prostiranja tzv. transverzalnih seizmičkih talasa u zemljinoj unutrašnjosti, koja je obrnuto proporcionalna temperaturi sredine kroz koju se oni kreću.



Slika 75. Glavne geotermalne provincije na Zemlji.

Na slici 75 prikazane su glavne topotne provincije Zemlje, odnosno regioni na zemljinoj površi u kojima je zbog prisustva brojnih vulkanskih procesa, termička energija Zemlje dostupna na samoj površi u enormnim količinama, povoljnim za eksploraciju. Zbog niske cijene eksploracije ovih geotermalnih izvora za potrebe grijanja i industrije, istraživanja u oblasti geotermalne energije danas su sve intenzivnija.

Međutim, topotno polje zemljine unutrašnjosti ima praktično zanemarljivo učešće u formirajućem ukupne temperature na zemljinoj površi i u ukupnoj emisiji toplote sa nje. Naime, Zemlja gotovo svu topotnu energiju koja zagrijeva njenu površ, prima od Sunca. Sunčev **topotni fluks*** iznosi 1.367 W/m^2 , što je preko 15 hiljada puta veće od topline koja iz unutrašnjosti Zemlje dospijeva na njenu površ (prosječno 87 mW/m^2).

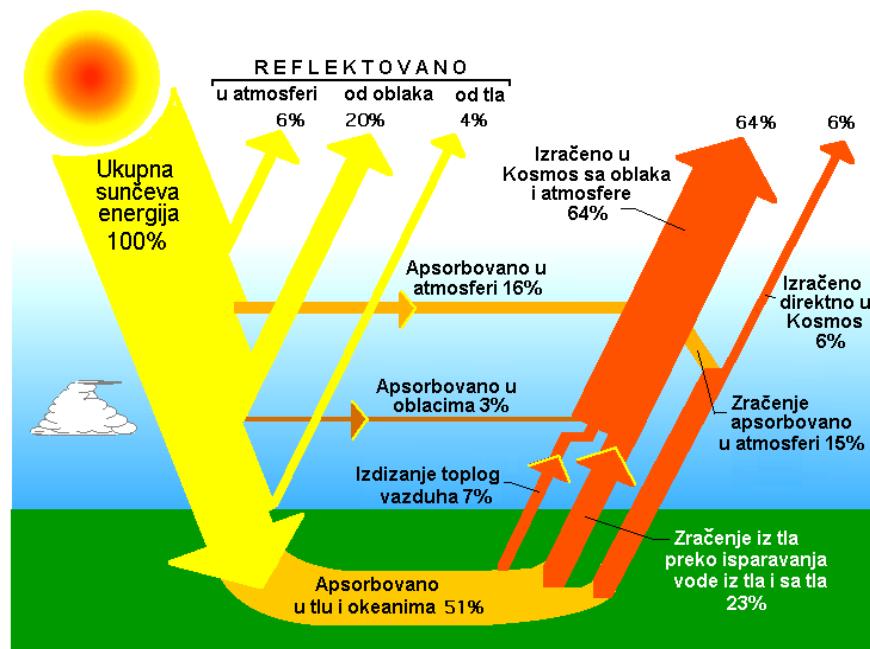


Cirkulacija i zagrijevanje vode u zemljinoj unutrašnjosti.

* Topotni fluks je količina energije koja dospije na jedinicu površine za jedinično vrijeme, što je istovjetno sa količinom snage na jedinicu površine. Sunčev topotni fluks se naziva i **solarnom konstantom**.

Stepen insolacije Zemlje, kao što smo već pominjali, zavisi od više faktora, od kojih je posebno značajno rastojanje Zemlje od Sunca, dok je stepen reflektovanja primljenog energetskog zračenja uopšte, uslovjen **albedom**, koji je određen reflektivnim karakteristikama atmosfere i tla. Srednji zemljini albedo, kao odnos reflektovane i ukupne primljene energije zračenja, iznosi 0,3 (odnosno 30%).

Najveći dio emitovane energije Sunca ima talasnu dužinu između 0,25 i 2,5 mikrona (μm), a dominantan dio te energije pripada vidljivom dijelu spektra. Međutim, najveći dio izračene energije sa Zemlje pripada infracrvenom domenu spektra (toplotno zračenje sa talasnom dužinom između 1 i 100 μm) i karakteriše se dominantnom talasnom dužinom od 14 μm . Dakle, zemljina atmosfera se ponaša prozračno za najveći dio vidljivog zračenja, ali neprozračano za infracrveno zračenje.



Slika 76. Toplotni bilans u zemljinoj atmosferi.

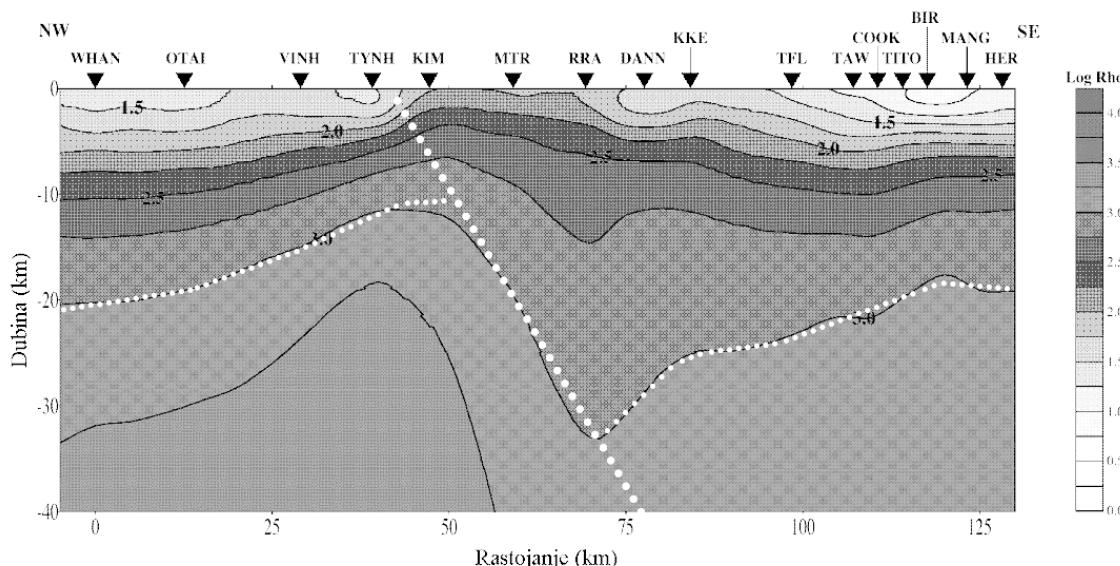
Kada smo govorili o procesu apsorpcije i reflektovanja sunčevog zračenja u atmosferi, kratko smo diskutovali i energetska bilans sunčevog zračenja u atmosferi (slika 15 u poglavljju 4.1.). Na slici 76 kompleksni energetska bilans Zemlje je prikazan nešto detaljnije. Naime, od 100 % sunčevog zračenja koje dospije u zemljinoj atmosferu, saglasno zemljinom albedu, ukupno 30 % se reflektuje nazad – u kosmički prostor. Pri tome, u reflektovanju učestvuju najviše oblaci – sa 20 %, zatim molekuli vazduha 6 % i tlo 4 %. Rasipanjem i upijanjem sunčeve energije na molekulima atmosfere, apsorbuje se 16 % ukupne energije sa Sunca, a na oblacima dodatnih 3 %. Preostalih 51 % energije sa Sunca biva upijeno u tlu i okeanima, ali samo privremeno. Zračenjem iz tla (preko isparavanja vode) u atmosferu se vrati 23 % ukupne energije, zatim neposrednim zagrijevanjem vazduha sa tla - daljih 7 %, dok 6 % biva direktno emitovano u Kosmos, a preostalih 15 % apsorbovano u vazduhu atmosfere.

Pomenimo još da je karakteristična plava boja atmosfere posljedica zakonitosti rasipanja talasnog zračenja na molekulima vazduha. Naime, stepen rasipanja vidljivog i drugog zračenja u atmosferi, obrnuto je proporcionalan četvrtom stepenu talasne dužine zračenja ($1/\lambda^4$ pri čemu je λ talasna dužina tog zračenja). Kako se plava boja nalazi upravo na dnu spektra, sa najmanjom talasnom dužinom, to je recipročna vrijednost četvrtog stepena tako male veličine – vrlo veliki broj.

5.4. Geoelektrično polje

Zemlju karakterišu dva električna polja: **telursko polje** unutar Zemlje i **atmosfersko električno polje**.

Telursko polje predstavlja polje strujnog električnog toka ekstremno niskih frekvencija (ispod 1000 Herca) u zemljinoj unutrašnjosti. Ovo električno polje se stvara u stijenama zemljine kore – induktivnim dejstvom promjenljivog geomagnetskog polja, kao i dejstvom jonsferskih struja. Intenzitet i karakter toka telurskih struja zavisi od električne provodljivosti stijena zemljine unutrašnjosti. Pri magnetotelurskim mjerjenjima ovog polja između dvije tačke na zemljinoj površi, istovremeno se opaža njegova magnetska i električna komponenta u funkciji frekvencije tog polja. Primjenom tzv. metode telurskog sondiranja u geofizici, vrši se istraživanje strukturne građe zemljine unutrašnjosti (do dubine od nekoliko desetina kilometara). Na slici 77 prikazan je jedan primjer rezultata 2D (dvodimenzione) numeričke obrade podataka magnetotelurskog sondiranja, kojim je dobijen vertikalni presjek cijele zemljine kore (do dubine od 40 km) na kojem su markantno uočljivi strukturni odnosi oko dubokog kosog rasjeda, koji presijeca cijelu zemljinu koru na mjestu profila.



Slika 77. Primjer interpretacije rezultata dubokog magnetotelurskog sondiranja sa položajem dubokog kosog rasjeda.

Atmosfersko električno polje

Atmosfera predstavlja umjereni električno provodljivu sredinu, što omogućuje električni tok kroz vazduh zbog posljedica ionizacije vazduha. Naime, zemljina kora i unutrašnjost, kao što smo već konstatovali, sadrže radioaktivne elemente (pretežno Uran i Torijum). Beta* i gama zračenje koje biva emitovano iz tla raspadom radioaktivnih elemenata, vrše ionizovanje prvihi nekoliko metara vazduha iznad tla. Gas radon (Rn), koji predstavlja jedan od produkata raspada Urana 238, može postići i veće visine – do nekoliko stotina metara iznad tla, prije no što daljim raspadom pređe u Polonijum (Po), emitovanjem alfa* čestice. Iz tih razloga, Radon predstavlja glavni izvor ionizacije vazduha u sloju od nekoliko stotina metara pri tlu, na prostoru kontinenata.

* Beta zračenje je zapravo emitovanje elektrona u radioaktivnom raspadu elementa. Alfa čestica predstavlja jezgro Helijuma.

* Alfa čestica predstavlja pozitivno nanelektrisano jezgro Helijuma (dva protona i dva neutrona).

Drugi značajan izvor ionizacije vazduha je kosmičko zračenje, sa maksimumom na oko 15 kilometara visine. Solarno X-zračenje i ultravioletno zračenje su osnovni izvori ionizacije iznad 60 km visine, sa aktivnošću koja zavisi od doba dana, sezone, stepena sunčeve aktivnosti i geografske širine. Tokom ekstremno intenzivne sunčeve aktivnosti, protoni sunčevog vjetra mogu značajno povećati proizvodnju jona u jonosferi.

Grmljavinske oluje se ponašaju kao ogromne prirodne baterije koje su vezane sa veoma dobro električno provodnom jonasferom sjedne i Zemljom, s druge strane, preko znatno slabije električno provodljive - niske i visoke atmosfere. Stalni, pasivni električni tok ká Zemlji, van olujnih regiona, predstavlja dio globalnog elektrinog kola (slika 78). U uslovima lijepog vremena, daleko od olujnih regiona, može se registrovati struja u kretanju od jonasfere prema Zemlji. Između jonasfere i tla stalno postoji razlika u potencijalu od čitavih 200 do 500 hiljada Volti, pri čemu se Zemlja manifestuje kao negativni pol. Pasivna struja između jonasfere i tla vrlo je ujednačenog intenziteta sa visinom - od oko 100 Volti po dužnom metru, koja tokom lijepog vremena ima prosječni intenzitet od oko 1.000 Ampera na cijeloj Zemlji.

Oluje predstavljaju glavni izvor elektromagnetske energije u donjim djelovima atmosfere i osnovni su pokretač globalnog električnog polja. Tipična grmljavinska oluja, kao što smo to već pominjali, stvara se u turbulentnim oblacima tipa kumulo-nimbusa, sa snažnim uzlaznim i silaznim cirkulisanjem vazdušnih masa, čestica leda i kiše. Na Zemlji je stalno aktivno oko 2.000 grmljavinskih oluja, a njihov lokalni maksimum nastaje u popodnevnim i ranim večernjim časovima (oko 18 časova UTC) kada su velike kontinentalne površi Afrike i južne Amerike izložene dejству Sunca, te uslijed stvorene turbulencije zagrijanih vazdušnih masa, na tim prostorima nastaje veliki broj oluja.



Slika 78. Globalni električni tok u atmosferi.

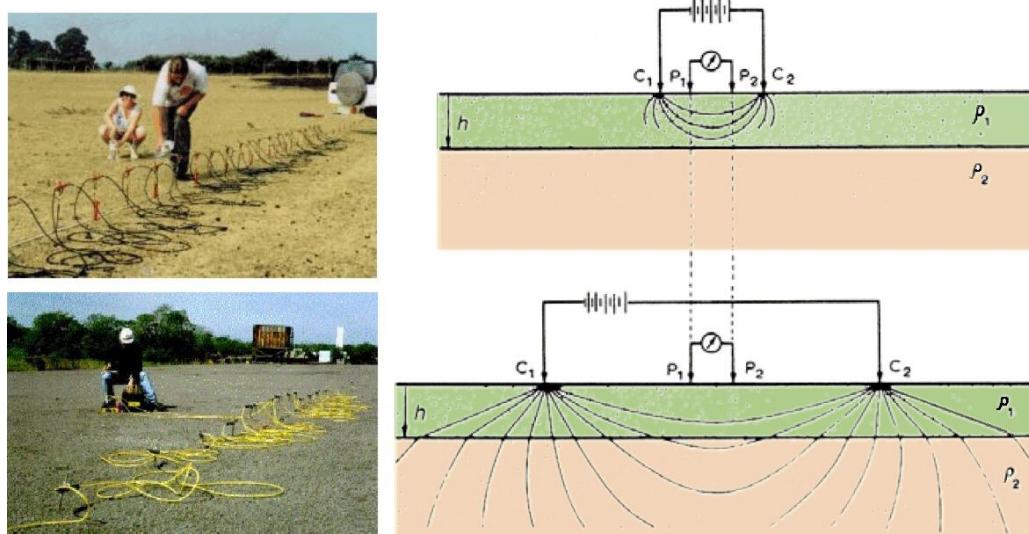
Kada lokalno naelektrisanje u atmosferi dostigne vrijednost od 400 kV/m, može nastati električno pražnjenje iz atmosfere, odnosno oblaka ká tlu ili ká drugom oblaku. Pražnjenje ká tlu obično nosi negativno naelektrisanje (elektrone) sa donjih djelova oblaka i oni tako predstavljaju dio električnog kola. Svako električno pražnjenje ka tlu sastoji se od više brzih parcijalnih pražnjenja, a ukupno električno pražnjenje obično traje 1/3 sekunde i naziva se munjom. Svakom udaru groma prethodi svijetli front, koji stvara negativno naelektrisani, dobro električno provodan kanal - između oblaka i tla, okarakterisan koronom svjetlosti, koji je širok oko jedan metar. Kada se primarni front groma približi na oko 5 do 50 metara od tla, pozitivno naelektrisanje sa tla se izdiže u susret negativnom naelektrisanju groma, stvarajući povratni električni udar, koji se zatim kreće naviše – kroz već stvoreni jonizovani kanal. Na taj način je negativno naelektrisanje uzemljeno ka tlu. Povratni udar predstavlja uzlazno kretanje sjajnog talasa brzinom od oko 20 % od brzine svjetlosti, sa ogromnom strujom, jačine između 10 i 100 hiljada ampera, a koja traje samo nekoliko mikrosekundi.

Svjetlosni efekat kod munje stvara se kada se molekuli vazduha na putu električnog pražnjenja zagrju na oko 10 hiljada stepeni Celzijusa. Udar groma stvara i akustički šok koji se čuje kao grmljavina, sa dominantnom frekvencijom od 100 Herca. Jonizovani kanal formiran gromom i snažan električni tok kroz njega, manifestuju se kao velika radio-antena koja emituje snažne elektromagnetske talase, pretežno na frekvencijama ispod 100 kHz, stvarajući snažne radiosmetnje u tom frekventnom području.

5.4.1. GEOELEKTRIČNE METODE U GEOFIZICI

Električni tok u nekoj sredini diktiran je osnovnim električnim svojstvom te sredine, koje se naziva **specifičnom električnom otpornošću** (ρ) a izražava se u om-metrima (Ωm). Recipročna vrijednost tog svojstva naziva se električnom provodljivošću. U složenim sredinama, u kojima se praktično sve fizičke karakteristike, pa i električna otpornost, mijenjanju od tačke do tačke, električni strujni tok ima veoma kompleksan oblik i analitički se može opisati samo kompleksnim sistemima integralnih jedančina, čije rješenje praktično nikad nije moguće dobiti u eksplicitnom obliku. Iz tih razloga, problem rasporeda električnog potencijala u realnom tlu i stvoreni električni tok, rješavaju se numeričkim metodama, koje omogućuju dobijanje zadovoljavajućih rješenja čak i u vrlo složenim geološkim uslovima.

Prema vrsti električnog izvora, geoelektrične metode mogu koristiti prirodno električno polje stvoreno u prirodnim elektrohemiskim procesima u tlu ili vještački generisano jednosmjerno ili naizmjenično električno polje u tlu.

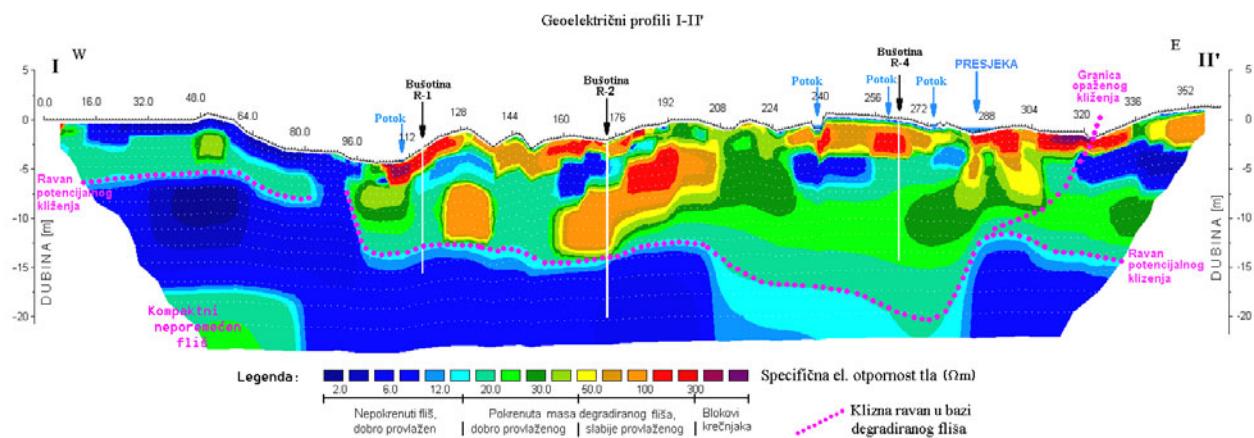


Slika 21. Principi primjene metode prividne specifične električne otpornosti: predajno električno kolo (C1 i C2) i prijemne elektrode (P1 i P2). Električni tok uslovjen je rasporedom specifičnih električnih otpornosti u tlu, kao i međusobnim rastojanjem predajnih elektroda.

Apsolutno najčešće korišćena grupacija geoelektričnih metoda u praksi je metoda prividne električne otpornosti, koja koristi jednosmjerno vještačko električno polje. Kod ove metode, upotrebom dvije predajne elektrode, pozicionirane na određenom međusobnom rastojanju (C1 i C2 na slici 21) tlu se saopštava električno polje određenog intenziteta. Primjenom dvije prijemne elektrode (P1 i P2 na slici 21) vrši se osmatranje izazvane razlike potencijala između tih tačaka. Dokazuje se da je količnik stvorene razlike električnog potencijala i saopštenog intenziteta struje proporcionalan specifičnoj električnoj otpornosti tla u zoni osmatranja tih parametara.

Postupkom sistematskog transliranja sistema predajnih i prijemnih elektroda duž određenog profila, a zatim sistematskim povećanjem međusobnog rastojanja predajnih (i prijemnih) elektroda ostvaruje se potpuno prožimanje cijelog profila gustim strujnim tokom i snimanje naponskog odziva profila, odnosno njegovih električnih karakteristika. Numeričkim invertovanjem tako dobijene velike količine informacija, moguće je definisati detaljni matematički model geoelektričnog presjeka terena, koji vrlo realistično aproksimira odgovarajući geološki presjek terena. Ovakva kombinacija mjerjenja naziva se geoelektričnim skeniranjem ili geoelektričnom tomografijom. Na slici 22 prikazan je vrlo ilustrativan primjer za ovu metodu, u vidu kompleksnog geoelektričnog profila preko velikog klizišta u blizini sela Mojdež kod

Herceg Novog. Na ovoj slici se lako zapaža razlika u specifičnim električnim otpornostima pokrenutih masa klizišta duž klizne ravni stvorene u povlati kompaktnog fliša.



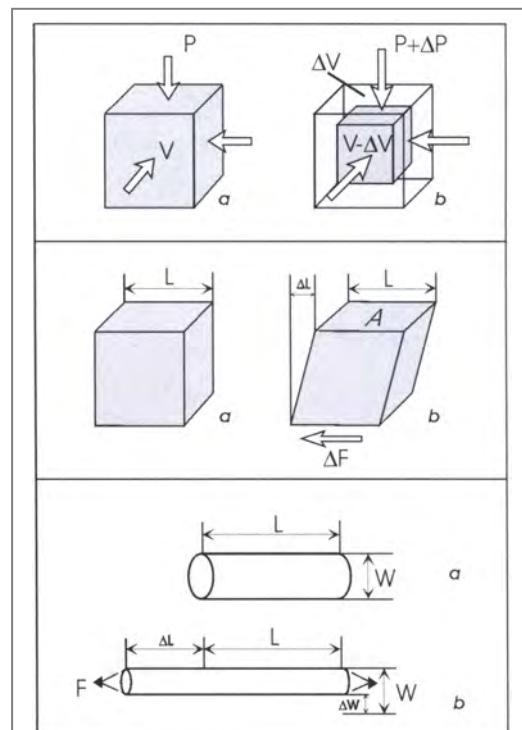
Slika 22. Primjer skenirajućeg geoelektričnog profila na klizištu Mojdež kod Herceg Novog.

5.5. Elastična svojstva stijena i seizmičke metode

Proces oslobađanja i prenošenja seizmičke energije u nekoj sredini (odnosno tlu) realizuje se u obliku seizmičkih talasa, koji zapravo predstavljaju elastičnu deformaciju te sredine. Dakle, sredina (stijenska masa, materijal zemljine unutrašnjosti) mora imati elastična svojstva da bi se kroz nju mogli prostirati (kretati) seizmički talasi. Što znači da će karakteristike elastičnosti sredine definisati način kretanja seizmičkih talasa kroz tu sredinu.

Eksplozijom u nekoj tački te sredine, odnosno razlamanjem stijenske mase u nekom zemljotresu, okolini stijenski materijal, odnosno prostor unutar Zemlje, biće izloženi **pritisku** (sabijanju, istezanju, ali i smicanju). Kao posljedica prisustva pritiska u svim tačkama prostora u kojem se manifestuje taj pritisak, nastaje odgovarajuća **deformacija** koja je proporcionalna pritisku. Dejstvo napona će izvršiti promjenu jedinične zapremine ili oblika elementa materije u kojoj djeluje. Kod idealno elastične sredine (materijala), nakon prestanka uzroka deformacije, materijal će se vratiti u predašnje normalno stanje. Međutim, sredine koje se ne odlikuju idelnim elastičnim svojstvima, pretrpeće izvjesne trajne, odnosno **plastične deformacije**.

Unutar granica elastičnosti materijala, njegovo ponašanje u uslovima izoženosti naponu, moguće je opisati takozvanim Hukovim (Hook) zakonom, koji iskazuje da je stvorena deformacija u nekoj tački linerno proporcionalna pritisku. Iznad te granice elastičnosti, koja je specifična karakteristika svake materije, dakle i svake stijenske mase, u materijalu će nastupiti ili oštar, kratkotrajan lom (kao što je rasijedanje stijene u zemljotresu) ili njegova plastična deformacija. Način opiranja materijala naponu zavisi ne samo od fizičkih karakteristika



Slika 25. Deformacija uzorka materijala radi definisanja modula elastičnosti: a - prije deformacije, b - poslije, u uslovima sabijanja, smicanja i istezanja - respektivno odozgo nadolje.

materijala, već i od vrste deformacija. Deformabilna svojstva materijala, dakle i stijena, opisuju se **modulima elastičnosti**:

- **Zapreminska modul k** se definiše kao odnos promjene hidrostatičkog pritiska (ΔP) (homogenog u svim prvcima) i relativne promjene zapremine (ΔV): $k = \frac{\Delta P}{\Delta V}$, a zapravo predstavlja mjeru nestišljivosti materijala (slika 25 u vrhu);
- **Modul smicanja μ** izražava mjeru otpora materijala na smicanje, odnosno promjenu oblika, ali ne i njegove zapremine. Matematički se izražava kao količnik odnosa polovine vrijednosti djelujuće tangencijalne sile (ΔF) i površine uzorka materijala (A), sjedne i smičuće deformacije (ΔL na slici 25 u sredini) i dimenzije samog elementa materijala (L), s druge strane, odnosno: $\mu = \frac{\Delta F / A}{\Delta L / L}$;
- **Jungov (Young) modul E** (moduli istezanja) opisuje ponašanje cilindričnog elementa dužine L koji se isteže sa oba kraja (slika 25 u dnu), a definiše se kao odnos između pritiska istezanja i rezultantne ekstenzionale deformacije u cilindru, dakle: $E = \frac{F / A}{\Delta L / L}$;
- **Poasonov (Poisson) koeficijent** (ili odnos) σ predstavlja količnik između bočne kontrakcije (relativne promjene širine uzorka W , na slici 2.13 u dnu) cilindra pod dejstvom relativnog longitudinalnog istezanja, odnosno: $\sigma = \frac{\Delta W / W}{\Delta L / L}$.

Jungov i zapreminska modul i modul smicanja imaju iste fizičke jedinice – kao pritisak, naime, u Internacionalmu sistemu jedinica to je:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N m}^{-2} = 1 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-2}, \text{ pri čemu je } 1 \text{ N} = 1 \text{ kg m s}^{-2}.$$

Opšta linearna veza između pritiska i deformacije u elastičnoj sredini vrlo je kompleksna i opisuje se Hukovim zakonom sa velikim brojem međusobno nezavisnih modula. Međutim, u slučaju izotropnosti (a značajan dio zemljine unutrašnjosti u regionalnim uslovima može se smatrati takvim), Hukov zakon se značajno uprošćava, svodeći se samo na dva nezavisna modula (λ i μ), koji su dobili zbirno ime po francuskom fizičaru Lameu – **Lameovi koeficijenti**. Kao što je već naglašeno, koeficijent μ je modul smicanja, dok λ nema direktnе fizičke definicije, ali se može izraziti u obliku veze sa pomenutim modulom smicanja i Poasonovim modulom, kao:

$$\lambda = k - \frac{2 \cdot \mu}{3} = \frac{\sigma \cdot E}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}$$

Ostali moduli elastičnosti mogu se takođe izraziti kao funkcija koeficijenata μ , λ i/ili k :

$$E = \frac{(3\lambda + 2\mu)\mu}{\lambda + \mu}, \text{ odnosno:}$$

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} = \frac{3k - 2\mu}{2(3k + \mu)}.$$

Za **čvrstu sredinu** važi jednakost: $\lambda = \mu$, pa saglasno gornjem izrazu proističe da je u takvoj sredini Poasonov modul $\sigma = 0,25$. Međutim, zbog nehomogenosti i ispucalosti stijene u prirodnim uslovima, većina stijena u čvrstoj zemljinoj kori ima Poasonov koeficijent σ koji se kreće u granicama između 0,2 i 0,4, dok u nekonsolidovanim (nevezanim, mekim) sedimentima, posebno zasićenih vodom, ovaj koeficijent može dostići vrijednost i 0,5, a kod nekih materijala može imati čak i negativne vrijednosti (npr. led – vidi narednu tabelu).

Dakle, kao što smo naglasili, pod dejstvom pritiska u nekoj homogenoj sredini, kada deformacija prevaziđe vrijednosti modula elastičnosti, započeće mehanički lom, odnosno stvorice se neelastična deformacija sredine. Ovaj mehanički udar pruzrokovane elastično oscilovanje čestica šire sredine, odnosno elastične deformacije sredine će se širiti putem tako stvorenih seizmičkih talasa. Taj seizmički talas može biti dvojak, zavisno od načina prostiranja kroz unutrašnjost sredine: **zapreminski**, koji se prostiru kroz cijelu zemljinu unutrašnjost i **površinski**, koji se prostiru samo po slobodnoj površi sredine.

Tipične, srednje vrijednosti konstanti elastičnosti, gustine i Poasonovog koeficijenta i brzine seizmičkih talasa za neke izabrane materijale i stijene:

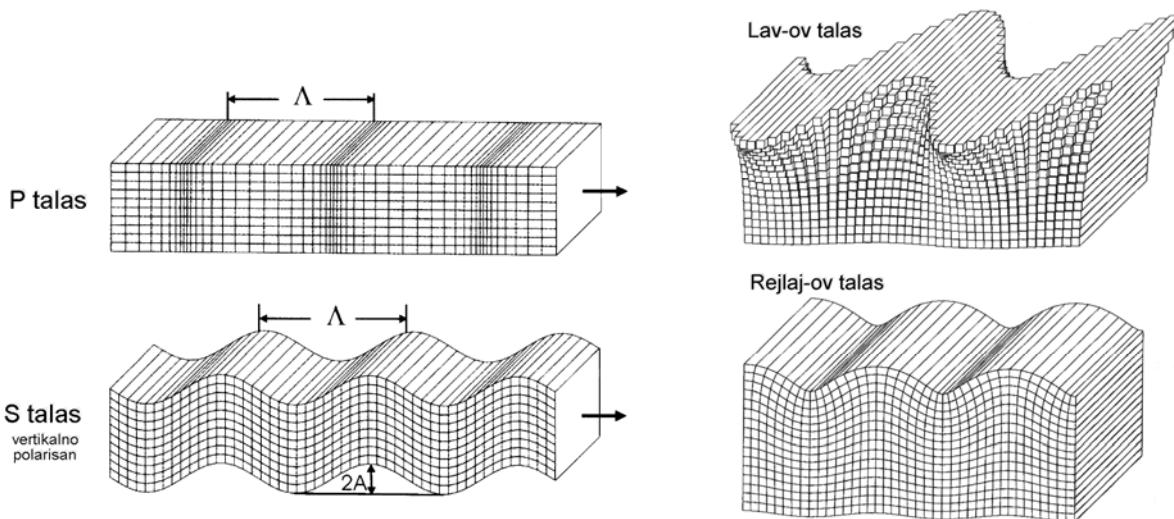
Materijal-stijena	Zapreminska konstanta elastičnosti (modul smicanja) (10^9 Pa)	Modul smicanja (10^9 Pa)	Gustina (kg/m^3)	Poasonov koeficijent	V_p (km/s)	V_s (km/s)	V_p/V_s
Vazduh	0,0001	0	1,0	0,5	0,32	0	-
Voda	2,2	0	1.000	0,5	1,5	0	-
Led	3,0	4,9	920	-0,034	3,2	2,3	1,39
Pješčar	24	17	2.500	0,21	4,3	2,6	1,65
Krečnjak	38	22	2.700	0,19	4,7	2,9	1,62
Granit	56	34	2.610	0,25	6,2	3,6	1,73
Bazalt	71	38	2.940	0,28	6,4	3,6	1,80

(V označava brzinu seizmičkih talasa)

Zapreminski talasi se dijele na dvije podvrste - **longitudinalni** i **transverzalni**. Longitudinalni talasi u čvrstim sredinama, teorijski imaju za oko 73 % veću brzinu prostiranja od transverzalnih (tabela). U prirodnim uslovima odnos ove dvije brzine može da bude i znatno veći. Zbog veće brzine i prednjačenja nad ostalim talasima, longitudinalni talasi se često nazivaju i **primarnim** talasima i označavaju indeksom **P**, dok se transverzalni talasi nazivaju i **sekundarnim** i označavaju indeksom **S**. Oba ova tipa zapreminskih talasa uzrokuju da čestice u posmatranom tijelu osciluju oko njihovog ravnotežnog položaja, ali su karakteri tih oscilovanja različiti. Pod dejstvom longitudinalnih talasa, čestice sredine osciluju **u pravcu prostiranja talasa**, analogno akustičnim oscilacijama (slika 26 lijevo). Kod transverzalnih talasa, čestice sredine osciluju u ravni upravnoj na pravac prostiranja talasa, analogno prostiranju svjetlosti ili elektromagnetskih talasa. Zahvaljujući ovim osobinama, longitudinalni talasi prilikom prostiranja kroz materiju mijenjaju njen oblik i zapreminu, a time i gustinu, dok prilikom prolaska transverzalnih talasa ne dolazi do promjene zapremine materije, već se jedino mijenja njen oblik.

Seizmološkim instrumentima za registrovanje seizmičkih talasa, koji se kratko nazivaju **seismografima**, snimaju se svi tipovi seizmičkih talasa, ali se na tim snimcima (**seismogramima**) ipak svi oni mogu međusobno razlučiti, s obzirom da je svaki tip talasa okarakterisan posebnom brzinom, različitim putanjama kretanja kroz zemljinu unutrašnjost ili dominantnim pravcem oscilovanja u odnosu na pravac prostiranja talasa. Zbog toga će njihova pojava na seismogramu biti specifična i prepoznatljiva. Pri analizi seismograma bliskih i lokalnih zemljotresa, obično se razmatraju samo zapreminski, a analizom seismograma zemljotresa sa vrlo dalekim epicentrom u odnosu na tačku registrovanja seismograma, razmatraju se i površinski talasi, ali takođe i brojni produkti ovih talasa, stvoreni u procesima reflektovanja i refraktovanja na granicama različitih elastičnih svojstava u zemljinoj kori i dubljoj unutrašnjosti.

Postoje dva tipa **površinskih talasa** koji se redovno javljaju kod seismograma zemljotresa iz udaljenijih hipocentara. Oni su dobili imena po istaknutim fizičarima koji su ih prvi identifikovali i proučavali: **Lav-ovi** (Love) i **Rejlaj-evi** (Rayleigh) talasi. Karakteristika svih površinskih talasa je da njihova amplituda eksponencijalno opada sa dubinom, te su iz tih razloga vezani samo za relativno plitke strukture zemljine kore, do dubine od nekoliko kilometara (slika 26).



Slika 26. Osnovni tipovi seizmičkih talasa i njihov način prostiranja: zapreminske P (longitudinalne) i S (transverzalne) na slici lijevo; površinski talasi: Lavovi u gornjem dijelu slike desno i Rejlajevi (donji dio).

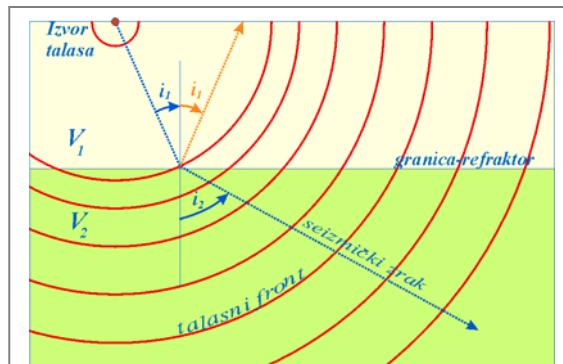
Lavov talas je poseban tip transverzalnog talasa, kod koga se oscilacije čestica sredine dominantno vrše u horizontalnoj ravni, upravno na pravac prostiranja talasa, dok je Rejlajev talas kombinacija longitudinalnog i transverzalnog talasa, pri čemu se oscilovanje čestica dominantno obavlja u ravni upravno na slobodnu površ Zemlje. Rejlajevi talasi obično imaju najveće amplitude na vertikalnim komponentama* seismograma, dok su Lavovi talasi najbolje registrovani na horizontalnim komponentama seismograma. U pogledu brzine prostiranja, oba ova talasa su sporija od zapreminskih talasa, pri čemu se Lavovi talasi prostiru nešto brže od Rejlajevih.

Brzina kretanja seizmičkih talasa zavisi od elastičnih svojstava sredine kroz koju se kreću. Brzina longitudinalnih talasa definisana je preko Lameovih koeficijenata λ i μ (koji izražavaju elastična svojstva materijala) izrazom:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{k + 4\mu/3}{\rho}}, \text{ a transverzalnih izrazom: } V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

pri čemu je ρ gustina sredine (stijenske mase). Dakle, brzina kretanja transverzalnih talasa u sredini sa konstantnom gustinom ρ zavisi samo od modula smicanja μ , što znači da se u sredinama kao što su tečnosti i gasovi, u kojima ovaj koeficijent ima nultu vrijednost, transverzalni talasi uopšte ne prostiru.

Prelamanje i odbijanje seizmičkih talasa na prelazu iz sredine sa različitim vrijednostima brzina prostiranja tih talasa, povezuje se tzv. Snelijusovom zakonu, koji iskazuje da je količnik sinusa



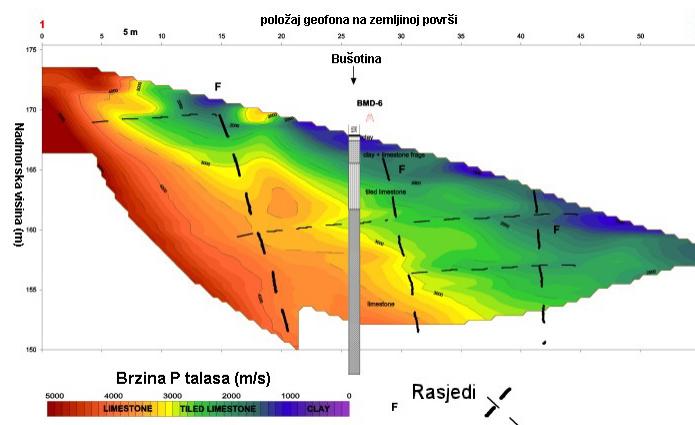
Slika 27. Prelamanje seizmičkih talasa na granici sa različitim vrijednostima brzina prostiranja.

* Registrovanje seizmičkih talasa na seismološkim stanicama i geofonima (za potrebe seizmičkih istraživanja na terenu) obavlja se na trokomponentnim instrumentima, koji su konstruktivno izvedeni tako da mogu reagovati samo na pobudu u određenom pravcu. Ta tri pravca su međusobno upravna, čime se ostvaruje mogućnost potpunog trodimenzionog reprodukovavanja oscilacija sredine u funkciji vremena.

upodnog (i_1) i prelomljenog (i_2) seizmičkog zraka na toj graničnoj ravni, proporcionalan količniku brzina prostiranja seizmičkih talasa u tim sredinama (slika 27):

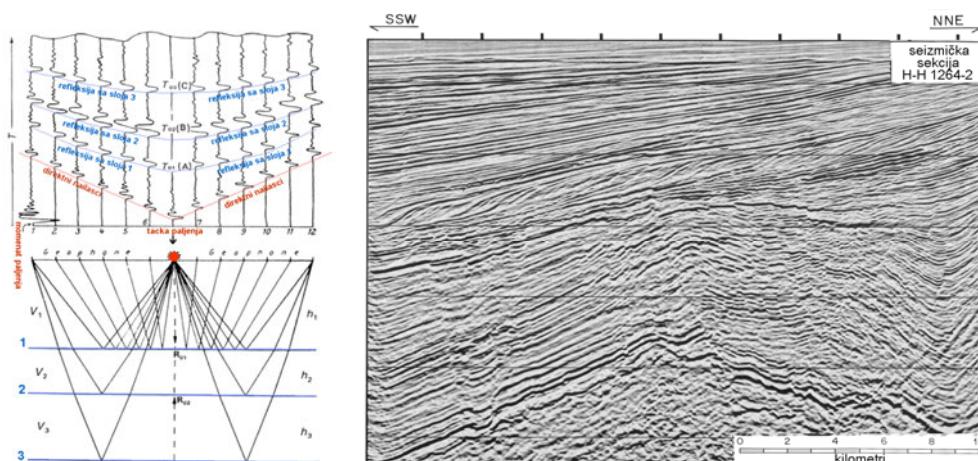
$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

Za potrebe seizmičkih istraživanja u primjenjenoj geofizici, intenzivno su razvijenadva pravca seizmičkih metoda, zavisno od vrste seizmičkih talasa koje koriste: **refrakcione** i **reflektivne** metode. Obije ove metode istraživanja koriste vještačke izvore seizmičkih talasa, a registrovanje elastičnih oscilacija tla obavlja se na velikoj seriji specijalnih seizmičkih senzora (prijemnika) koji se nazivaju **geofonima** koji se obično postavljaju u linijskom rasporedu. Kao izvor seizmičke pobude koriste se najčešće: mehanički udar (za lokalna ispitivanja), zatim eksploziv, specijalni tzv. vobrosajz (vibroseis) mašine sa hidraučki kontrolisanim oscilovanjem, koji se postavljaju na velikim kamionima, najčešće korišćeni u vidu serije sinhronizovanih mašina kojima se izazivaju mehaničke vibracije za duboka reflektivna seizmička istraživanja, itd.



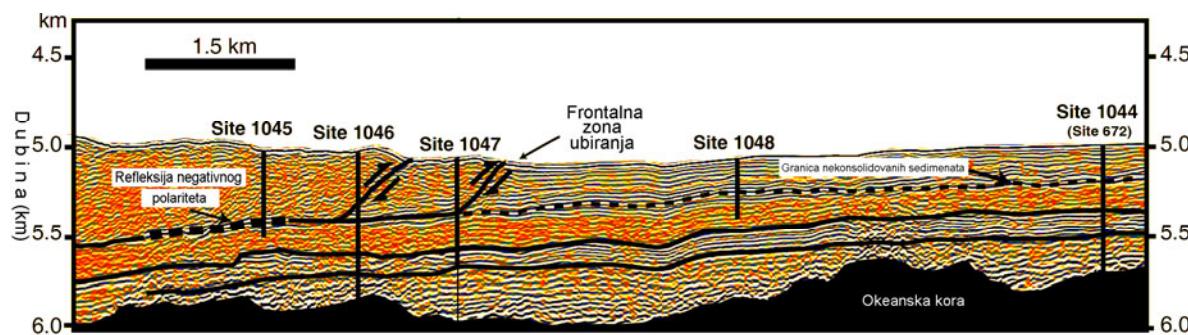
Slika 28. Izgled jednog refrakcionog seizmičkog profila. Različite nijanse boja izražavaju različite brzine prostiranja seizmičkih talasa.

Kod refrakcionih metoda registruju se i proučavaju seizmički talasi prelomljeni (refraktovani) na granicama geoloških sredina sa različitim brzinama prostiranja seizmičkih talasa (slika 28). Kod ove metode je karakteristično da je dubina maksimalnog ispitivanja obično (znatno) manja od dimenzije primjenjenog profila, obično do dubine od nekoliko desetina pa i stotina metara. Izgled jednog interpretiranog refrakcionog profila prikazan je na slici 28, na kojem su različitim nijansama izdiferencirane sredinama sa različitim brzinama seizmičkih talasa.



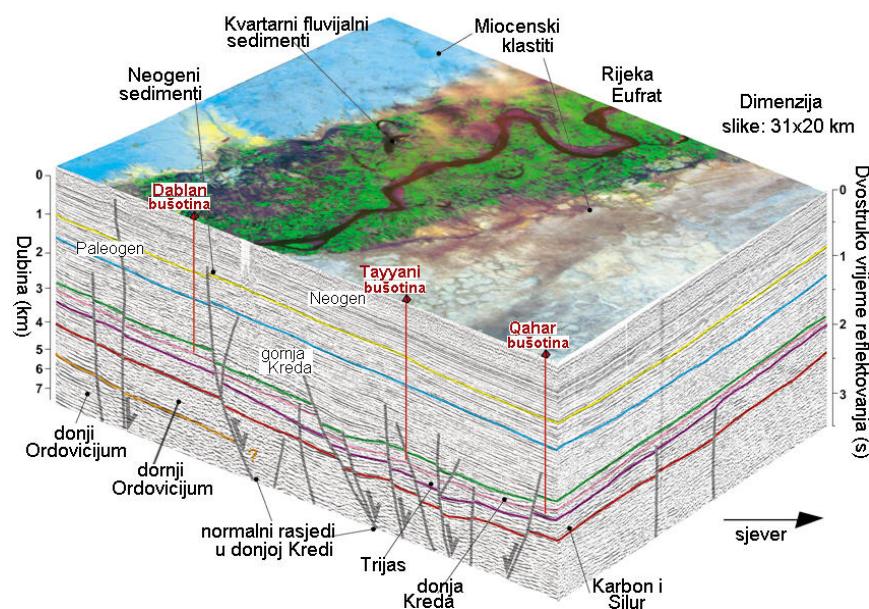
Slika 29. Šema reflekovanih talasa sa različitim graničnim ravnim i odgovarajući izgled registriranih talasnih frontova (gornji dio slike lijevo); b) izgled tipične reflektivne sezmičke sekcijske slike sa osmerom (SSW-NNE) i mjerom dubine u kilometrima (desno).

Kod reflektivnih metoda registruju se odbijeni (reflektovani) seizmički talasi na granicama sredina različitih elastičnih svojstava (slika 29). Ova metoda se dominantno koristi za ispitivanje dubokih geoloških struktura, pretežno za istraživanje ležišta ugljovodonika, dakle za ispitivanja na dubinama i do nekoliko kilometara. Kod takve vrste istraživanja, obavlja se tzv. seizmička stratigrafska interpretacija čiji je cilj identifikovanje stratigrafskih elemenata na profilu, koji su manifestovani kao reflektivni paketi prepoznatljivi na seizmičkim sekcijama. Na slici slika 30 je prikazan izgled jedne tipične reflektivne seizmičke sekcije snimljene u podmorju Atlantika, sa elementima stratigrafske interpretacije. Na ovoj slici je indicirano nekoliko markantnih granica različitih paketa sedimenata, dok se u njenom dnu nazire zatamnjena kontura okeanske kore, kao jasan reflektor seizmičkih talasa.



Slika 30. Izgled jedene tipične seizmičke sekcije registrirane u primjeni reflektivne metode istraživanja dubokih struktura pri istraživanju sedimentnog kompleksa u zoni okeanskog dna, sa elementima strukturne interpretacije.

Za potrebe istraživanja ležišta ugljovodonika, danas se često koristi i tzv. 3D seizmička ispitivanja, odnosno ispitivanja koja se izvode na gustoj seriji ukrštenih seizmičkih profila, na kojima se registruje proces prostornog (3D) reflektovanja seizmičkih talasa. Numerička obrada tih rezultata je vrlo kompleksna, a rezultira interpretacijom cijelog zahvaćenog trodimenzionog prostora, tako da je moguće vršiti potpunu prostornu analizu reflektivnih površi, odnosno izdvojenih geoloških struktura. Na slici 30a je prikazan jedan primjer 3D interpretiranog seizmičkog modela snimljenog u zoni rijeke Eufrat u Siriji, na kojem se mogu vrlo jasno zapaziti kompleksni strukturni i tektonski elementi – u verikalnom i horizontalnom pravcu.



Slika 30a. Primjer rezultata obrade i interpretacije 3D seizmičkih ispitivanja jednog lokaliteta na rijeci Eufrat, u Siriji.

5.6. Daljinska detekcija

Daljinska detekcija je naučna oblast geofizike (iako se može vezati i za mnoge druge oblasti, kao što su geologija, geodezija i dr.) koja se bavi prikupljanjem informacija o zemljinoj površi bez neposrednog kontakta sa njom. Daljinska detekcija se sastoji u registrovanju informacija sadržanih u slici stvorenoj reflektovanjem, ili emitovanjem elektromagnetske energije sa zemljine površi, zatim njihovoj obradi, analizi i primjeni tih informacija. Taj proces obuhvata sljedeće elemente (slika 30b):

A – Izvor energije ili reflektovanje incidentne (upadne) energije na tlo,

B – zračenje i učešće atmosfere u njegovom prenošenju (interakcija) na putu ka tlu i od tla,

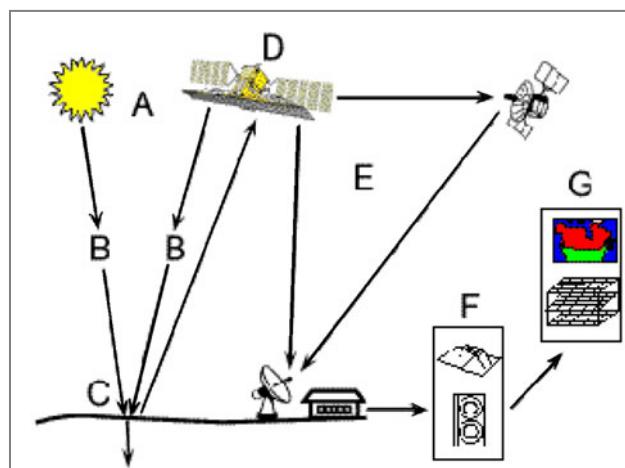
C – interakcija energije zračenja sa tlom (reflektovanje ili emitovanje),

D – registrovanje elektromagnetske energije udaljenim sonzorom,

E – prenos registrovanih informacija u elektronskom obliku do stanice na Zemlji gdje se vrši obrada tih informacija,

F – analiza i interpretacija (tumačenje) podataka o snimljenim objektima na Zemlji i

G – primjena rezultata opservacija daljinske detekcije u cilju rješavanja određenog stručnog ili naučnog problema.

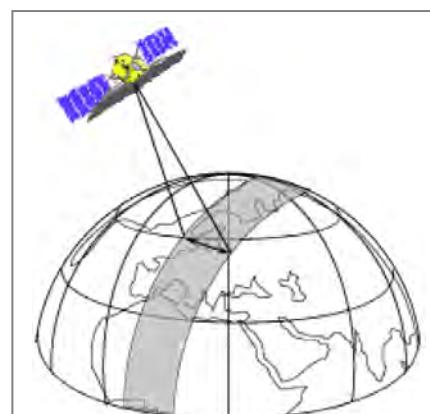


Slika 30b. Principi daljinske detekcije.

Boja	Talasna dužina (μm)	
	od	do
ljubičasta	0,400	0,446
plava	0,446	0,500
zelena	0,500	0,578
žuta	0,578	0,592
narandžasta	0,592	0,620
crvena	0,620	0,700

Talasne dužine boja u vidljivom dijelu spektra.

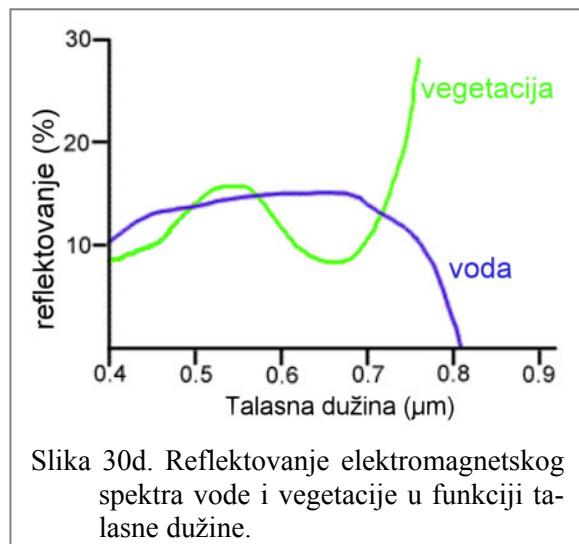
Za potrebe daljinske detekcije, snimanje se obavlja u relativno širokom dijapazonu spektra elektromagnetskog zračenja, obuhvatajući četiri osnovna domena talasnog zračenja: ultraljubičasti, vidljivi, infracrveni i mikrotalasni. Svaki od tih domena koristi se za snimanje određenih karakterističnih objekata i pojava na tlu, kao što su građevinski objekti, reljef, šume, vodene površi, vazdušne mase itd. Svi takvi objekti reflektuju primljeno ili emituju svoje elektromagnetsko zračenje na različitim talasnim dužinama i sa različitim intenzitetom tog zračenja (u domenu infracrvenog, vidljivog, mikrotalasnog ili ultravioletnog zračenja). Tako, na primjer, neke stijene i minerali izražavaju fluoroscentna svojstva kada se osvijetle ultraljubičastim (UV) dijelom spektra elektromagnetskih talasa ("ultraljubičastom svjetlošću"), pa se za njihovo kartografisanje koristi ultraljubičasti dio spektra. Na slici 30d je prikazan primjer ponašanja vode i vegetacije u odzivu na široki spektralni interval elektromagnetskog zračenja (u vidljivom i donjem dijelu infracrvenog zračenja), pri čemu je uočljivo da voda praktično ne reaguje reflektivno na talase iznad 0.8 mikrometara, dok vegetacija, nasuprot tome, iznad 0.75 mikrometra stvara vrlo intenzivno reflektovanje elektromagnetskog zračenja.



Slika 30c. Princip satelitskog snimanja podataka na tlu.

Senzori pomoću kojih se snimaju slike za potrebe daljinske detekcije se obično instaliraju na trupu aviona, kosmičkog broda ili satelita (slika 30c), a mogu biti u vidu kamera, radara, sonara, seizmografa, gravimetara i sl.

Metode daljinske detekcije danas se veoma intenzivno primjenjuju u istraživanjima za potrebe brojnih naučnih domena, a posebno: geodezije, geofizike, geologije, geotermije, meteorologije, ekologije, šumarstva, vodoprivrede, poljoprivrede, hidrologije, za vojne potrebe i u mnogim drugim životnim i privrednim granama. Tako, na primjer, daljinska detekcija se u geologiji koristi pri regionalnom i detaljnem kartografisanju (kartiranju) površinskih sedimenata, za raščlanjivanje litoloških jedinica na terenu, snimanje terenskih strukturnih karakteristika (tektonskih, morfoloških itd.), istraživanje ugljovodonika, ekogeološka, seizmološka i geobotanička ispitivanja, kao i brojna druga.



Slika 30d. Reflektovanje elektromagnetskog spektra vode i vegetacije u funkciji talasne dužine.

6. GEOLOGIJA

Geologija je nauka o Zemlji u cjelini, koja proučava stvaranje stijena od kojih je sačinjena Zemlja, zatim minerala koje čine stijene, kao i svih drugih, brojnih geoloških procesa koji utiču i učestvuju u razvoju naše planete u cjelini.

Geološki procesi na planeti Zemlji su veoma brojni, a prema brzini njihove realizacije, dijelimo ih na *brze* i *spore*. Od sporih geoloških procesa razlikujemo: stvaranje stijena, hemijsko i mehaničko razaranje stijena, hemijsku cimentaciju čestica pjeska i formiranje različitih sedimentnih stijena, prekristalizaciju jedne vrste stijena i formiranje novih vrsta (metamorfizam), formiranje planinskih grebena (tektonizam), lagano kretanje kontinenata (tektonika ploča), glacijaciju, klimatske promjene i slično. Brzi geološki procesi obuhvataju: erozije obala u olujama, vulkanske erupcije i formiranje vulkanskih kupa, zemljotrese, klizišta, odrone, pustinjske oluje, udare meteorita i slično. Svi ovi procesi se stalno odvijaju na Zemlji i danas, a geologija (kao i brojne discipline koje iz nje izviru, ili su njen sastavni dio) konstantno ih proučava i svakim danom bolje spoznaje.



Jovan Cvijić

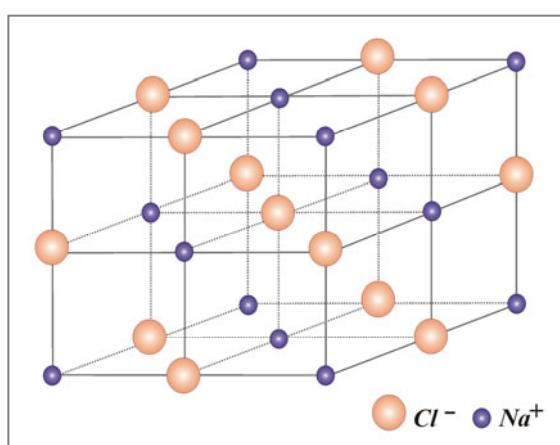
Geologija je veoma kompleksna naučna oblast, koju čini više subnaučnih disciplina. Tako, na primej, **Mineralogija** predstavlja domen geologije u kojem se proučava nastanak, vrste i hemijski sastav minerala, kao gradivnih komponenata stijena. Oblast geologije u kojoj se vrši proučavanje stijena i uslovi njihovog nastanka, naziva se **Petrologijom**, a njen sastavni dio je **Petrografija** čiji predmet je opis stijena, njihov teksturni izgled, mineralni sastav i dr. **Strukturalna geologija** se bavi proučavanjem deformacija stijena, stvaranje nabora, rasjeda i drugih strukturnih oblika u njima. Dio geologije, koji se bavi proučavanjem hemijske kompozicije Zemlje (ali i drugih nebeskih tijela), zatim hemijskim procesima i reakcijama stijena i minerala, kao i ciklusom njihove hemijske razgradnje, transporta i depozicije (odlaganja) u vremenu i prostoru, naziva se **Geochemijom**.

Istorijat geoloških istraživanja na Balkanu, na prostoru bivše Jugoslavije, kao i sadašnje Državne zajednice Srbija i Crna Gora, veoma je dug i plodan, a broj uspješnih istraživača vrlo veliki. Ipak, u toj plejadi velikana geološke nauke sa prostora Balkana posebno se ističe Dr. Jovan Cvijić (1865.-1928.) srpski geograf, geolog i antropolog, koji je bio i dugogodišnji profesor na beogradskom Univerzitetu, kao i na Univerzitetu u Sorboni (Pariz).

6.1. Minerali i stijene

Kao što je to opšte poznato, cijela zemljina kora je izgrađena od **stijena**. Stijene predstavljaju aggregate više minerala, a minerale grade atomi kombinovani u kristalnoj strukturi (rešetci).

Minerali po definiciji predstavljaju prirodne, neorganske čvrste tvorevine sa kristalnom strukturom, različitog hemijskog sastava. Minerali nastaju kristalizacijom u istopljenim magmatskim stijenama, ali i hemijskim očvršćavanjem i kristalizacijom iz vodenog rastvora hidroermalnih voda, kao i biološkom aktivnošću pri formiraju nekih sedimentnih stijena. Hidroermalnim vodama



Slika 79. Šematski prikaz kristalne rešetke kuhiinske soli (NaCl).

se nazivaju vrele podzemne vode, zasićene bogatim hemijskim rastvorima i jonima, koje iz dubljih djelova zemljine unutrašnjosti, cirkulacijom kroz pukotine i porozne djelove stijena, dospijevaju u pliću, hladnije djelove, u kojima zbog pada temperature započinje izdvajanje rastvorenih materija i formiranje kristala u procesu kristalizacije, kao i orudnjenja. Svaki proces kristalizacije se karakteriše određenom temperaturom i pritiskom na kojima se odvija.

Formiranje kristalne strukture zahtijeva organi-zovano ponavljanje atomske kombinacije u kristalnoj rešetci minerala, saglasno nanelektri-sanju atoma koji grade kristal. Pošto dimenzije atoma značajno zavise od broja njegovih elektrona, to atomi različitih elemenata imaju različite dimenzije. Na slici 79 šematski je prikazana kristalna struktura kuhinjske soli (NaCl) na kojoj se vidi da je svaki atom Natrijuma okružen atomom Hlora i obrnuto. Naelektrisanje svakog atoma Hlora je -1 , a svakog atoma Natrijuma $+1$, što rezultuje neutralnim stanjem kristala u cijelini. Način organizacija kristalne rešetke utiče na sam izgled kristala, koji čine kristalne ravni. Dio geologije koji se bavi proučavanjem kristala naziva se kristalografska mineralogija.



Slika 80. Kristali kvarca (SiO_2) lijevo i fluorita (CaF_2) desno.

Do sada je utvrđeno više od 3.000 minerala (slika 80). Njihovim koncentrisanjem nastaju orudnjenja, a kombinovanjem - stijene. Minerali koji grade stijene formirani su različitim komponovanjem hemijskih elemenata. U okviru poglavlja *Zemljina unutrašnjost*, u tabeli 3, naveli smo najzastupljenije hemijske elemente u zemljinoj kori. Radi podsjećanja, ponovimo da pored kiseonika, najveće učešće u zemljinoj kori imaju: silcijum, aluminijum, gvožđe i kalcijum, koji zajedno čine nešto preko 91 % njenog ukupnog, težinskog sastava.

U prirodi postoje minerali koji imaju isti hemijski sastav, ali različite kristalne forme kada se i nazivaju **polimorfni kristali**, a njihov način kristalizacije zavisi od temperature i pritiska sredine u kojoj nastaju. Tako, na primjer, Uglenik (C) gradi dva polimorfna kristala: grafit i dijamant. Grafit je vrlo mek, kristalni oblik ugljenika koji nastaje na relativno niskim temperaturama i pritiscima, dok dijamant, koji je najtvrdja poznata prirodna supstanca, nastaje pod vrlo visokim pritiscima (preko 50 hiljada atmosfera) i temperaturama

Tabela 4.

<i>Grupa minerala</i>	<i>Tipičan predstavnik</i>	<i>Hemijski sastav minerala</i>
Sulfidi	Galenit	PbS
	Pirit	FeS_2
Oksidi	Korund	Al_2O_3
	Hematit	Fe_2O_3
Karbonati	Kalcit	CaCO_3
	Malahit	$\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$
Sulfati	Anhidrit	CaSO_4
	Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$
Silikati	Beril	$\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$
	Kvarc	SiO_2
Fosfati	Apatit	$\text{Ca}_5(\text{F},\text{Cl},\text{OH})(\text{PO}_4)_3$

(iznad 1.500 °C) u dubokim djelovima zemljine kore. Pri višim temperaturama, zbog veće oscilacije atoma, nastaju kristali kod kojih su rastojanja atoma u rešetci veća. Povećanje pritiska, međutim, utiče na sabijanje atomske strukture, što utiče na kompaktnije pozicioniranje atoma u kristalnoj rešetci.

Tabela 4 sadrži neke tipične: sulfidne, oksidne, karbonatne, sulfatne, silikatne i fosfatne minerale i njihov hemijski sastav.

Kao što smo naveli, stijena se može definisati kao agregat, tvorevina jednog ili više minerala. U Geologiji se prema načinu formiranja izdvajaju tri osnovne grupe stijena: **magmatske, sedimentne i metamorfne**.

6.1.1. Magmatske stijene

Prema načinu i mjestu nastanka, magmatske stijene mogu biti **vulkanske i intruzivne**. **Vulkanske stijene** nastaju mirnim ili eruptivnim (u vulkanskim erupcijama) izlivanjem istopljene magme iz zemljine unutrašnjosti (spolašnjeg omotača) i njenim brzim hlađenjem i kristalizacijom na zemljinoj površi (slika 81).

Magma predstavlja mješavinu istopljenih stijena, kristala i gasova. Ona ima manju gustinu od okolnih stijena, pa se zbog toga probija ka manjim dubinama i površi Zemlje. Ukoliko dospije do slobodne zemljine površi (kada se naziva **lava**), eruptivno će se izliti i formirati vulkanske ili izlivne stijene (ekstruzivne). Ukoliko se magma ohladi i kristališe prije nego što dospije na površ Zemlje, formiraće utisnute stijene na nekoj dubini, koje se tada nazivaju plutonske ili intruzivne. Brzo hlađenje magme i nastanak vulkanskih stijena na zemljinoj površi, usloviće nepotpunu kristalizaciju, što će rezultirati formiranjem sitnih kristala, koji će teško moći da se zapaze golim okom. Međutim, lagano hlađenje u dubljim djelovima zemljine kore pri stvaranju intruzivnih stijena, omogućiće stvaranje znatno krupnijih kristala.



Slika 81. Izgled vulkanske erupcije.

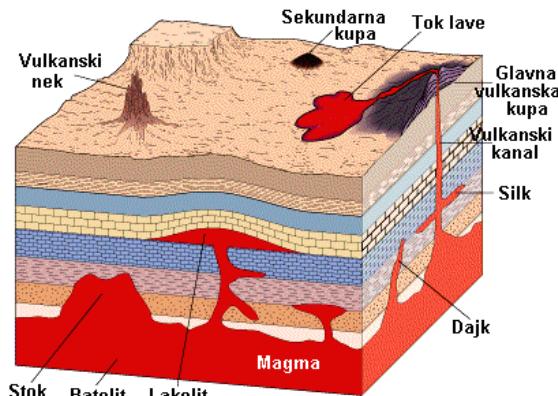
Tabela 5.

Grupa stijena	Tipičan predstavnik	Hemijski sastav			Temperatura magme (°C)
		SiO₂ (%)	sadržaj Fe, Mg	sadržaj Ca,K,Na	
Bazalt	gabro	40 - 55	visok	nizak	1.000 – 1.200
Andezit	diorit	55 - 65	srednji	srednji	800 – 1.000
Riolit	granit	65 - 75	nizak	visok	650 - 800

Hemijski sastav magme je kontrolisan sadržajem elemenata u zemljinoj unutrašnjosti. Ipak, 99.9% sastava magme čine sljedeći elementi: Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, H i O. Pošto je kiseonik najzastupljeniji u sastavu magmatskih stijena, u hemijskim analizama se obično prikazuju sadržaji oksida navedenih elemenata. SiO₂ je najrasprostranjeniji oksid u magmatskim stijenama. Prema učešću ovog oksida u magmatskim stijenama, one se dijele na tri grupe: **bazalne**,

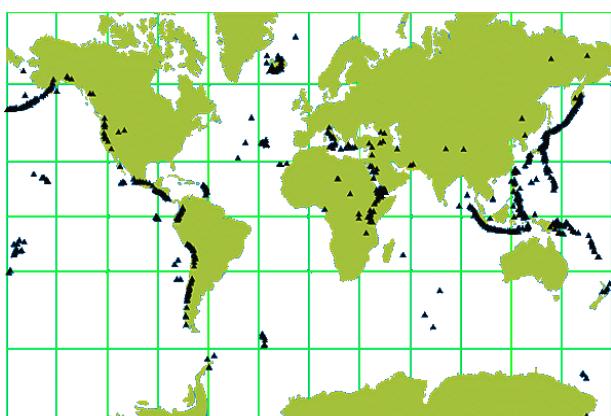
andezitske i **riolitske**, kako je to navedeno u tabeli 5. Tipičan predstavnik bazaltnih stijena je **gabro**, andezitskih - **diorit**, a riolitskih - **granit**.

Kao što smo konstatovali, sastavni dio magme je i gas. On daje magmi eksplozivni karakter. Gasove najčešće čini vodena para, ugljen dioksid, manje količine sumpora, hlora i fluora. Takođe smo već pomenuli da, kada magma dosegne do zemljine površi, nastaje erupcija, koja može biti mirna ili eksplozivna, što zavisi od količine gasova koje sadrži. Pri eksplozivnom izlivanju lave formira se vulkanski krater i nastaju **piroklastiti*** i pepeo koji se rasipaju oko kratera na velika rastojanja (slika 84). Oblaci gasa i pepela obično se izdižu visoko iznad vulkana i mogu dostići visini i preko 50 kilometara (slike 81 i 82).



Slika 82. Bazaltna lava na padinama vulkana (lijevo) i struktura vulkana sa tipovima intruzija (desno).

Intruzivne stijene se stvaraju utiskivanjem magme u pliću stijenu zemljine kore i njenim laganim hlađenjem (uslijed usporenog gubitka topote u zemljinoj unutrašnjosti), kristali-zacijom i očvršćavanjem, stvarajući razne oblike utisnutih stijena (slika 82a): **dajk** (prizmatični plitki intruziv magmatskih stijena strmog nagiba, širine do 20 metara), **lakolit** (forma oblika ogromne pečurke stvorena izdizanjem gonjih slojeva i utiskivanjem magme u stvoreni prostor), **batolit** (vrlo velika intruzivna tijela kompleksnog oblika) i druge.



Slika 83. Raspored vulkana u Svijetu.

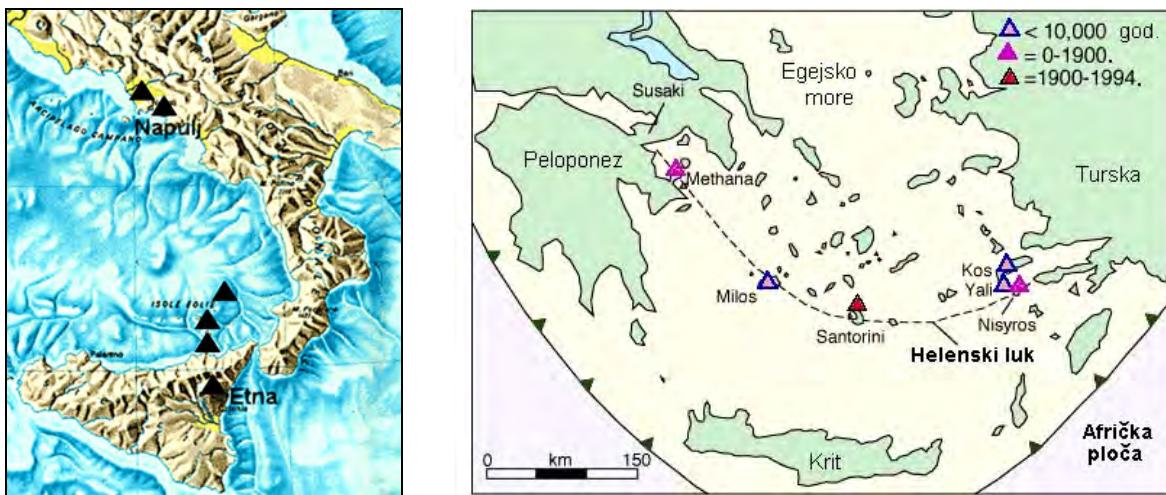


Slika 84. Naslage piroklastita u krateru Dotsero (Kolorado, SAD).

Broj vulkana na Zemlji je vrlo veliki, a njihov položaj je saglasan sa globalnim tektonskim procesima. Praktično svi subduktioni procesi su praćeni aktivnim vulkanima. Na slici 83 prikazana je distribucija vulkana na cijeloj Zemlji, sa koje se vidi vrlo dobra koncidencija njihovog položaja i zona sa intenzivnim procesima globalne tektogeneze.

* Piroklastiti su odlomci vulanskog materijala sa vulanske kupe, koji pod erupcijom mogu biti odbačeni na velika rastojanja.

I na prostoru Mediterana vulkani se javljaju u nizu – duž linije najintenzivnijih tektonskih procesa: na apeninskom poluostrvu, Siciliji, helenskom luka i dalje u Turskoj. Najveći njihov broj je ugašen. Najznačajniji živi vulkani u ovom dijelu su u Italiji: Etna na Siciliji, Vezuv kod Napulja, Lipari, Stromboli i Vulkano na Liparskim ostrvima sjeverno od Sicilije, dok u Egejskom moru ima 7 vulkana: Kos, Milos, Metana, Nisiros, Santorini, Susaki i Jali (slika 85).



Slika 85. Položaj aktivnih vulkana na prostoru Italije (lijevo) i Grčke (desno).

Orudnjenja nastaju koncentrovanjem jednog ili više minerala u stijenskoj masi, djelovanjem nekog geološkog procesa, kao što su hidrotermalna ili sedimentna mineralna depozicija ili izlučivanje iz hladnog hemijskog rastvora nastalog rastvaranjem stijena.

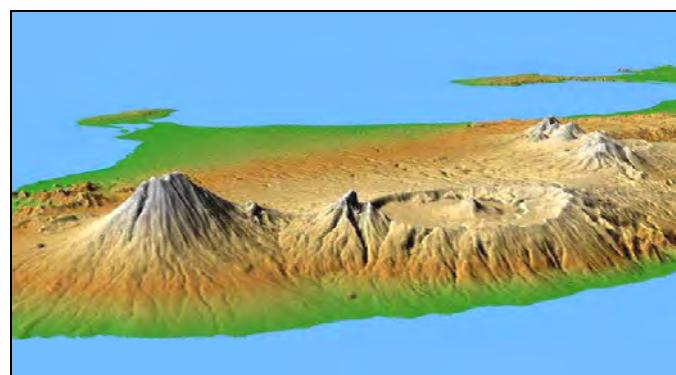
Neki termini vezani za vulkan:

Krater je centralno udubljenje vulkana izazvano eksplozivnim izbacivanjem magme.

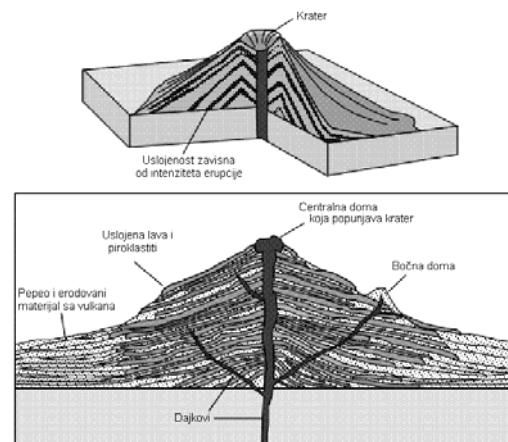
Kaldera predstavlja centralnu depresiju vulkana, formiranu nakon erupcije, kolapsiranjem (urušavanjem) dijela vulkanske kupe u šupljину nastalu izbacivanjem magme.

Termalni izvor nastaje isticanjem zagrijane vode (obično mineralizovane) u zonama ugašenih vulkana, dok **gejzir** označava eruptivno izbijanje vruće vode u okolni prostor pod dejstvom gasova.

Sulfatara i fumarola su otvori u tlu u zonama starih vulkana iz kojih još uvijek izbijaju vulkanski gasovi (obično sumporna jedinjenja).



Trodimenzioni model dva vulkana na Baliju (Filipini)

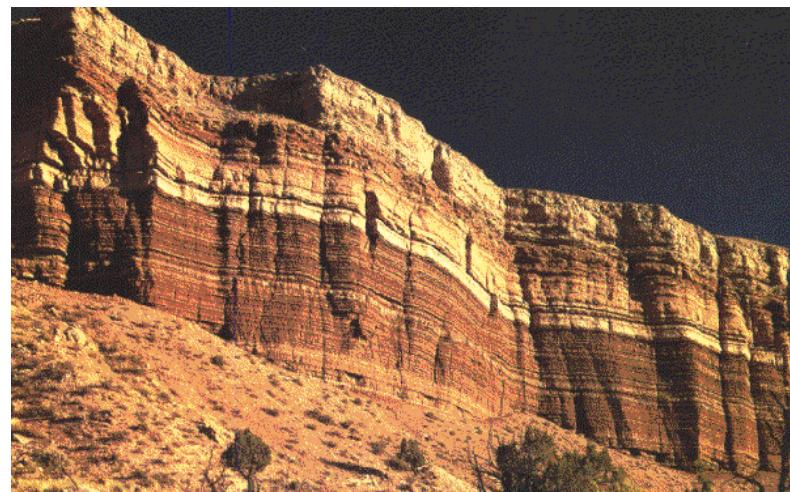


Unutrašnja struktura vulkana

6.1.2. Sedimentne stijene

Sedimentne stijene nastaju u vodenim sredinama (dominantno u morima, okeanima i jezerima, ali i rijekama i potocima) laganim taloženjem sitnozrnog **erodovanog** materijala, koji je na

mjesto taloženja ***transportovan*** dejstvom površinskih vodenih tokova ili vjetrova, formirajući uslojene depozite tog materijala. Sedimentovani materijal zatim, pod dejstvom težine gornjih slojeva, biva izložen značajnim pritiscima pod kojima, tokom vremena doživljava zbijanje i cjementovanje, odnosno očvršćavanje, a čitav proces konsolidacije sedimentne stijene kratko se naziva ***dijageneza***. Djelove sedimentnih slojeva mogu činiti i čvrsti (karbonatni) ostaci uginulih morskih i jezerskih životinja, u vidu ***fosila****. ***Erozija*** je stalno aktivni geološki proces otkidanja sitnih čestica i komadića materijala stijena sa kopna, pod dejstvom površinske vode i vjetra, koje se dalje transportuju vodom ili vjetrom do mjesta pretaložavanja. Većina stijena koje vidimo na zemljinoj površi, kao što je to slučaj i na prostoru Dinarida, pripadaju grupaciji sedimentnih stijena.



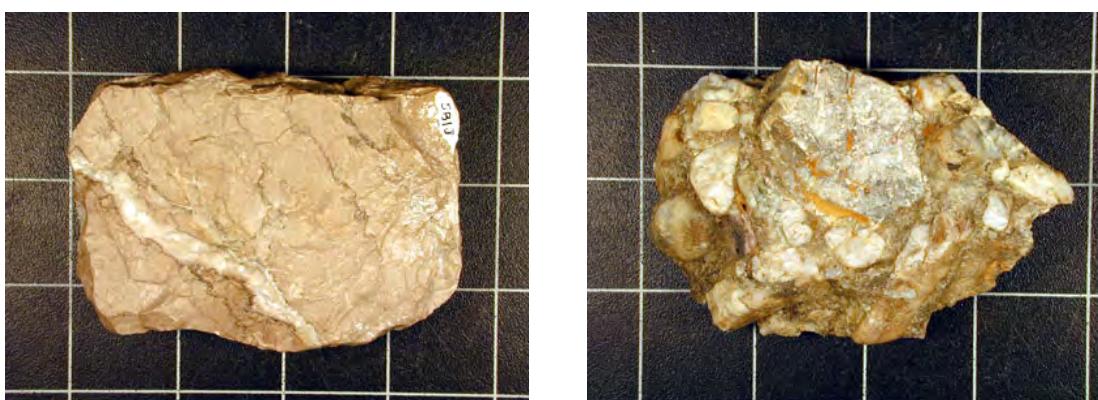
Slika 86. Izgled tipične, neporemećene horizontalne slojevitosti.

Stijene koje nastaju pretaložavanjem nekih drugih, erodovanih stijena i cjementacijom tih fragmenata, nazivaju se ***klastične stijene***. Takve stijene su, na primjer krečnjaci, pješčari, konglomerati, gline itd. Hemijskim odlaganjem rastvorenih materija pretežno u morskoj vodi formiraju se ***hemijske*** sedimentne stijene, kao što su gips, so i slično. Taloženjem i cjementovanjem organskih ostataka biljaka i životinja, nastaju ***organske stijene*** (npr. ugalj).

Veličina zrna u sedimentnim stijenama diktirana je brzinom kretanja tih čestica u fazi njihovog transportovanja do mjesta taloženja. Iz tih razloga, sedimenti su obično sortirani po veličini zrna. Klastični sedimenti se zato dijele na krupnozrne (sa zrnima preko 2 mm u prečniku, kada se nazivaju ***šljunak***), srednjezrne (***pijesak***, sa prečnikom između 0,0625 i 2 mm) i finozrne ili sitnozrne (***glina, mulj, les***, sa prečnikom zrna ispod 0,0625 mm).

Sedimenti koji nastaju erozionim djelovanjem velikih masa lednika na tlu i transportovanjem i oblikovanjem (zaobljavanjem) tako stvorenog krupnozrnog materijala (odlomaka stijena, u vidu krupnozrnog šljunka i pijeska, kao i krupnijih blokova stijena) nazivaju se morenskim sedimentima ili ***morenama***, koje smo već pominjali kod glacijalnih procesa (poglavlje 4.3). Morenski sedimenti obično zapunjavaju veće neravnine u reljefu preko kojih je prešao lednik u fazi njegovog spuštanja ka nižim kotama terena, a takvi sedimenti mogu imati debljinu i do nekoliko desetina metara.

* Fosil je okamenjeni ostatak flore ili faune, koji nastaje dugotrajnim hemijskim procesima u sedimentnim stijenama.



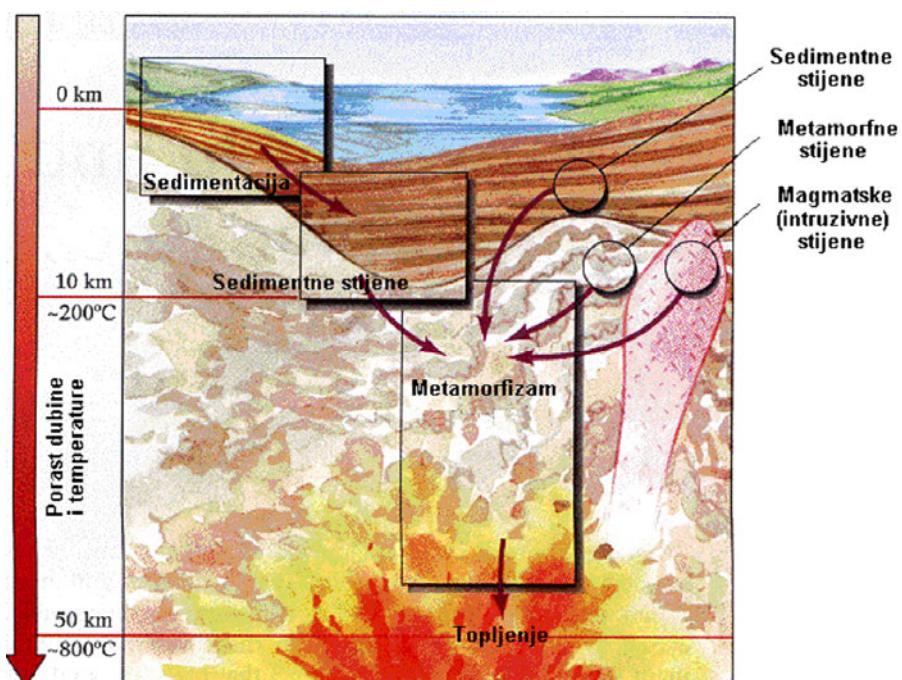
Slika 87. Sedimentne stijene: **krečnjak** (lijevo) i **konglomerat** (desno).

Po svom sastavu, sedimentne stijene mogu biti silikatne ili karbonatne, zavisno od toga dali sadrže više silikatne ili karbonatne komponente u svom sastavu. Takođe, prema stepenu cjementacije čestica, sedimentne stijene mogu biti: nevezane (necjementovane), poluvezane i vezane.

U vrlo rasprostranjene sedimentne stijene Svijeta, ali i prostora Balkana i Crne Gore spada krečnjak (vezana karbonatna stijena), koji je dominantno kalcijum-karbonatni (CaCO_3) sediment, posebno intenzivno stvaran tokom cijeog Mezozoika (slika 87). Pomenimo još neke rasprostranjene sedimentne stijene: glina (poluvezana silikatna stijena), pješčar, konglomerat (vezane, karbonatne ili silikatne stijene).

6.1.3. Metamorfne stijene

Prekristalizacijom (promjenom kristalne strukture) sedimentnih i magmatskih stijena pod dejstvom visokih pritisaka, temperature, kao i infiltriranjem hemijskih i gasnih rastvora u neku sedimentnu ili vulkansku stijenu, nastaju metamorfne stijene. Metamorfoza stijena se obično zbiva u dubljim djelovima zemljine kore. Stijena nastala u metamornim procesima se karakteriše tzv. *folijacionom* strukturom (prethodna struktura minerala je sabijena duž jedne ravni, što rezultira izduženim mineralnim komponentama u jednom pravcu – slika 89).

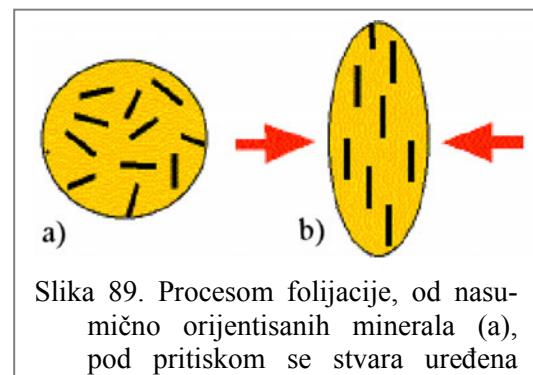


Slika 88. Grafička šema procesa stvaranja metamorfnih stijena.

Toplota je značajan agens u stvaranju metamorfnih stijena. Prve promjene u stijenama pod dejstvom toploće nastaju već na 200°C , kada započinju promjene kristalne strukture minerala u stijeni, čime zapravo nastaju novi minerali (slika 88). Pod visokim pritiskom i temperaturom, nasumično orijentisani kristali u stijeni, zauzimaju uređeni pravac, stvarajući folijalnu strukturu stijene (slika 89). Metamorfoza stijene prestaje kada temperatura izazove kompletno topljenje stijene (između 600 i 1.200°C). Ako se stijena zagrije i istopi do temperature kada postaje magma, tada će magma, nakon hlađenja, formirati novu magmatsku stijenu. Dakle, metamorfizam je evidentan samo kod stijena koje ne dožive potpuno topljenje. Zagrijavanje stijene u njihovoј metamorfozi nastaje kroz procese subdukcije dijela okeanske ili kontinentalne zemljine kore, ili u intruzivnim procesima magme. Na formiranje metamorfne stijene transformacijom sedimentnih i magmatskih stijena, može značajno uticati i visoki pritisak, stvoren u tektonskim procesima.

Najizrazitiji efekat pritiska u metamorfozi stijene je reorientacija kristala minerala u stijeni. Pod vrlo visokim pritiscima, stijena postaje plastična, stvarajući izdužene mineralne strukture. Najzad, kombinovanim djelovanjem vode i ugljen dioksida u procesu metemorfoze, nastaje dodatna hemijska reakcija u stijeni, kada se obično stvaraju novi minerali, zamjenom ili dodavanjem jona nekih elemenata u postojeću mineralnu strukturu.

Tipičan predstavnik grupe metamorfnih stijena je gnajs (slika 90). Metamorfozom krečnjaka (zamjenom dijela kalcijumske komponente magnezijumskom) u procesu koji se naziva metasomatoza, nastaje stijena dolomit, koja je po izgledu slična krečnjaku, ali ima znatno svjetliju boju, sa uočljivom kristalastom strukturom. Prekristalizacijom krečnjaka pod visokim temperaturama nastaje mermer, koji se odlikuje krupnozrnom kristalnom strukturom (slika 90). Prekristalizacijom krečnjaka u metamorfnom procesu, nastaje mermer.



Slika 89. Procesom folijacije, od nasumično orijentisanih minerala (a), pod pritiskom se stvara uređena struktura (b).



Slika 90. Metamorfna stijena **gnajs** (lijevo) i **dolomit** (desno).

6.2. Geološko datiranje vremena

Vremensko datiranje nekog događaja u geologiji može biti **apsolutno** i **relativno**. Apsolutno datiranje prepostavlja izražavanje starosti događaja u apsolutnim vremenskim jedinicama (u geologiji to su godine). Relativno pozicioniranje nekog događaja u vremenu vezuje se za neke druge događaje, koji opet mogu biti postavljeni relativno ili apsolutno u vremenu. Pri tome se njegova starost ne izražava u godinama (u geologiji) već se vezuje za relativne markere u vremenu.

6.2.1. Apsolutno radiometrijsko datiranje

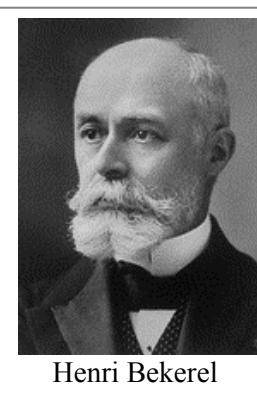
Kao što smo naveli, Zemlja je stara oko 4,6 milijardi godina, dok najstariji mineral pronađen u pješčarima zapadne Australije datira od prije 4,1 do 4,2 milijarde godina. Najstariji ostaci živih organizama potiču od prije 2,5 milijarde godina, dok su prvi reptili nastali prije 245 miliona godina, a prvi sisari prije 66,4 miliona godina. Najstariji ostaci čovjeka datiraju od prije 2 miliona godina. Svi ovi podaci o absolutnom vremenu određeni su primjenom savremenih metoda **radiometrijskog datiranja**.

Radiometrijsko datiranje je bazirano na postojanju procesa spontanog ***radioaktivnog raspada*** pojedinih elemenata, kao i na postojanju ***izotopa**** atoma. Radioaktivnost je otkrio još 1896. godine Henri Becquerel[♦], ali je primjena radiometrijskih metoda datiranja započela tek pronalaskom masenog spektrometra[▼], poslije I svjetskog rata. Do sada je razvijeno preko 40 metoda radiometrijskog datiranja.

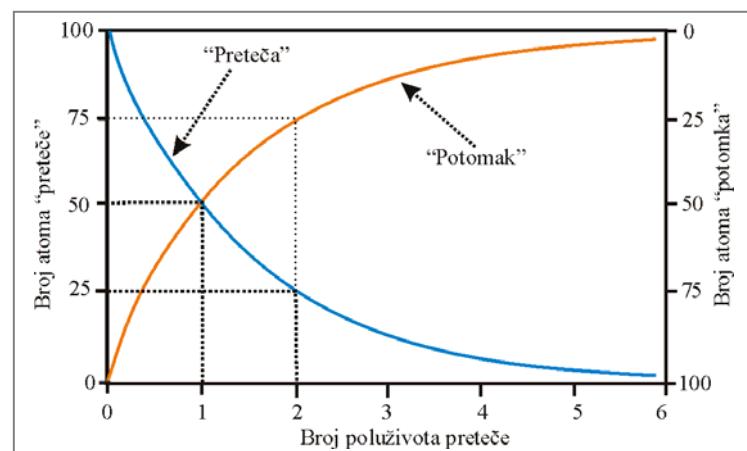
Poznato je da je većina elemenata u prirodi stabilna i da se ne mijenja tokom vremena, dok je izvjestan broj nestabilan i spontano se transformiše u druge elemente, procesom nazvanim radioaktivni raspad. Dakle, radioaktivni raspad elementa predstavlja spontanu transformaciju jednog atoma u drugi - izbacivanjem ili prihvatanjem subatomskih čestica u/iz okolnog prostora.

Radi pojašnjenja procesa prelaska iz jednog atoma u drugi, uzmimo za primjer atom kalijuma (K) koji ima atomsku masu 40, odnosno ima ukupno 19 protona i 21 neutron u jezgru. Prirodno svojstvo Kalijuma je da se tokom određenog vremena 11 % ukupnog broja atoma koji se primanjem jednog elektrona na svoju atomsku ljsku, raspada u Argon (Ar - inertni gas) sa istim masenim brojem, ali sa 18 protona i 22 neutrons, dok se ostatak od 89 % atoma Kalijuma - gubitkom jednog elektrona sa ljske - pretvara u atom Kalcijuma (Ca) sa 20 protona i 20 neutrona.

Radioaktivni atom "preteča" (ili "roditelj") uvijek se raspada na atom **stabilnog "nasljednika"** (ili "potomka"). Mnogi radioaktivni elementi mogu se koristiti kao "geološki časovnici", jer se svaki radioaktivni elemenat raspada konstantnom brzinom (broj raspadnutih atoma u odnosu na ukupan broj), koja je specifična za svaki elemenat. Pri tome je očigledno da je količina raspadnutih atoma u jedinici vremena, proporcionalna početnom broju atoma preteče. Dakle, kada je



Henri Becquerel



Slika 91. Zakonitost raspada radioaktivnog "preteče" u stabilnog "nasljednika"

* Izotopima se nazivaju atomi nekog istog elementa koji u jezgru imaju isti broj protona, ali različit broj neutrona. Dakle, izotopi su elementi sa različitim brojem neutrona u jezgru. Tako, na primjer, u prirodi postoje tri izotopa Kalijuma: ³⁹K (koji je stabilan – ne raspada se), zatim ⁴⁰K (koji se raspada na ⁴⁰Ar i ⁴⁰Ca) i najzad ⁴¹K (koji je takođe stabilan).

♦ Henri Becquerel (1852-1908), francuski fizičar, dobitnik Nobelove nagrade za Fiziku 1903. godine.

▼ Maseni spektrometar predstavlja uređaj za utvrđivanje mase i relativne koncentracije atoma i molekula u uzorku nekog materijala, koji funkcioniše na bazi mjerjenja dužine putanje ionizovanog atoma (koja je diktirana njegovom masom) u snažnom magnetskom polju spektrometra.

poznata brzina raspada nekog elementa, moguće je utvrditi vrijeme u okviru kojeg se odigrao njegov raspad, mjereći odnos preostale količine radioaktivnog atoma “preteče” i količine rezultujućih atoma stabilnog “nasljednika” (slika 91).

Brzina dezintegracije radioaktivnih elemenata izražava se njihovim tzv. **vremenom poluraspada** (ili **poluživotom**) što podrazumijeva vrijeme za koje se polovina atoma originalne količine tog radioaktivnog elementa raspada na svoje potomke. Na primjer, vrijeme poluraspada za ^{238}U iznosi 4,5 milijardi godina, a za ^{14}C samo 5.730 godina.

Matematički izraz koji povezuje brzinu radioaktivnog raspada i proteklo geološko vrijeme (t) od nastanka uzorka, ima jednostavnu formu:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(1 + \frac{D}{P}\right)$$

pri čemu D predstavlja broj atoma “nasljednika” u vrijeme analize uzorka, P je broj atoma “roditelja” u isto vrijeme, \ln je oznaka prirodnog logaritma (za osnovu e), dok λ označava konstantu radioaktivnog raspada atoma, koja je u relaciji sa njegovim poluživotom T (tabela 6) u vidu:

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{\sqrt{T}}$$

U momentu kada magma izlivanjem na zemljinu površ (ili utiskivanjem u stijene) započne proces hlađenja i kristalizacije, broj atoma preteče se “resetuje” (vraća u početno stanje) u kristalnoj strukturi minerala te stijene, odnosno od tog momenta će započeti “evidencija” diferencijacije preteče na potomke, koju ćemo zapravo “konstatovati” ispitivanjem uzorka stijene u laboratoriji. Međutim, ovo neće važiti za sedimentne stijene, jer su radioaktivni minerali u česticama tih stijena formirani u vrijeme stvaranja originalne magmatske stijene, koja je zatim erodovana i pretaložena. Dakle, radiometrijskim datiranjem sedimentne stijene bilo bi utvrđeno vrijeme nastanka magmatskog izliva (odnosno minerala te stijene koji je ispitivan u sedimentnoj stijeni).

Najčešće korišćeni radioaktivni elementi, sa svojim produktima, poluživotom i vremenskim intervalom u kojem se koriste za radioaktivno datiranje, navedeni su u tabeli 6. Radioaktivni elementi Uran, Torijum i Rubidijum (sa istim potomkom – Olovom, ali sa različitim izotopom) koriste se za utvrđivanje vrlo velikih starosti (preko 10 miliona godina), s obzirom na njihovo veoma dugo vrijeme poluraspada. Radimetrijsko datiranje Kalijumom (i njegovim potomcima Argonom i Kalcijumom) upotrebljava se za starosti preko 50 hiljada godina, a Ugljenik ^{14}C (sa potomkom Azotom) za starost između 100 godina i 70 hiljada godina. Brojevi uz elemente u tabeli označavaju tzv. maseni broj atoma, što predstavlja njegov ukupan broj protona i neutrona. Maseni broj može varirati za jedan isti elemenat zbog različitog broja neutrona koji može imati izotop takvog elementa.

Već više puta pomenuta starost

<i>Preteča</i>	<i>Potomak</i>	<i>Poluživot (godine)</i>	<i>Interval primjene (godine)</i>
^{238}U	^{206}Pb	4,5 milijardi	preko 10 miliona
^{235}U	^{207}Pb	710 miliona	
^{232}Th	^{208}Pb	14,0 milijardi	
^{87}Rb	^{87}Sr	48,8 milijardi	
^{40}K	^{40}Ar i ^{40}Ca	1,26 milijardi	50.000–4,6 milijardi
^{14}C	^{14}N	5.730 godina	100 – 70.000

Tabela 6. Najčešće korišćeni elementi za radiometrijsko datiranje, sa njihovim potomcima, poluživotom i intervalom starosti pogodnom za primjenu metode.

Zemlje (kao i ostalih planeta sunčevog sistema) od 4,55 milijardi godina utvrđena je sa tačnošću od 1 %. Ova vrijednost je izvedena iz nekoliko različitih činjenica. Starost Zemlje, kao i drugih nebeskih tijela, ne može se odrediti direktno na osnovu materijala koji se nalazi na Zemlji, zbog jednostavne činjenice da je materijal koji gradi Zemlju u fazi njenog formiranja u potpunosti bio istopljen, kao i da su erozioni procesi uslovili nestanak najstarijih stijena na njenoj površi. Najstarija do sada pronađena stijena na Zemlji je datirana između 3,8 i 3,9 milijardi godina, a kao što je već istaknuto, cirkonovi minerali u pješčarima zapadne Australije stari su između 4,1 do 4,2 milijarde godina. Primjenom utvrđene zavisnosti u vremenu promjene količnika izotopa ^{206}Pb (koji predstavlja produkt raspada ^{238}U) i ^{207}Pb (kao produkta raspada ^{235}U - vidi tabelu), sjedne i ^{204}Pb s druge strane (konstrukcijom tzv. izohrone* olova), u uzorcima vrlo starih stijena sa Zemlje, sa relativno velikom tačnošću je utvrđena starost Zemlje na $4,55 \pm 0,05$ milijardi godina.

Na uzorcima stijena sa Mjeseca utvrđeno je da je starost ovog jedinog zemljinog satelita praktično ista kao i starost Zemlje – do 4,6 milijardi godina. Kada su naučnici započeli sistematsko proučavanje starosti meteorita nađenih na Zemlji, utvrdili su vrlo interesantan podatak – da su gotovo svi ispitivani meteoriti imali identičnu starost od 4,56 milijardi godina. Naime, kada su asteroidi (meteoriti su samo njihovi fragmenti) formirani, ohlađeni su relativno brzo. Stijene asteroida kasnije nikada nijesu bile ponovo istopljene, što znači da “radiometrijski časovnik” u njima nikada nije bio poremećen. Iz svega ovoga možemo izvesti i zaključak da je cijeli sunčev sistem star najmanje 4,6 milijardi godina, s obzirom da je vjerovatno tačna pretpostavka da je cijeli sunčev sistem nastao od istog materijala, približno u istom vremenu, te se radiometrijskim datiranjem utvrđuje to vrijeme njihovog zajedničkog nastanka.

Za radiometrijsko datiranje organskih ostataka nekadašnjih živih organizama (biljaka i životinja) u geologiji i drugim naučnim oblastima, najčešće se koristi metoda bazirana na Ugljeniku ^{14}C . Naime, poznato je da se u gornjim djelovima atmosfere, ^{14}C stalno stvara – kao posljedica bombardovanja atoma Azota ^{14}N kosmičkim zracima. S obzirom na dugoročnu postojanost ovih procesa, odnos ova dva elementa (^{14}C i ^{14}N) u zemljinoj atmosferi je konstantan. Živi organizmi disanjem, kontinualno vrše razamjenu Ugljenika i Azota sa atmosferom, hraneći se i vršeci fotosintezu (biljke). Dakle, sve dok je organizam živ, imaće identičan odnos elemenata ^{14}C i ^{14}N kao i atmosfera. Nakon smrti organizma, započinje radioaktivni raspod nestabilnog ^{14}C (sa poluživotom od 5.730 godina) u stabilni ^{14}N . Mjerenje količine ^{14}C u ostacima takvog organizma omogućuje da se utvrdi vrijeme koje je proteklo od njegove smrti. Obično se datiranje metodom ^{14}C vrši na uzorcima sa kostiju i zuba životinja, fosiliziranog drveta, školjki i slično. Zbog relativno kratkog poluživota ^{14}C od 5.730 godina, ova metoda se koristi samo za datiranje materijala mlađih od 70 hiljada godina.

Imajući u vidu da postoji vrlo dobra podudarnost veoma velikog broja podataka radio-metrijskog datiranja starosti, primjenom do sada razvijenih više od 40 različitih tehnika istraživanja, koje su provjerene na kratkoročnom planu (na primjer datiranjem magmatskih izliva poznate starosti ili analizom organskog materijala poznate starosti – kao što je utvrđivanje starosti drveta brojanjem njegovih godova), možemo konstatovati da se ova metoda može smatrati vrlo pouzdanom, te da su utvrđene starosti geoloških tvorevina na Zemlji vjerodostojne i svakim danom bivaju sve pouzdanije.

6.2.2. Relativno datiranje u geologiji

Stratigrafija, kao geološka disciplina koristi relativno datiranje (vremensko pozicioniranje) sedimentnih slojeva, u proučavanju redoslijeda njihovog nastanka. Proces sedimentacije ili

* Izohrona je termin kojim se označava linija koja spaja tačke sa jednakim vremenima neke pojave.

taloženja materijala obavlja se na relativno ravnim ili blago nagnutim površima morskog ili jezerskog dna, tokom dugog niza godina. Novi, mlađi sedimenti, prekrivaju starije i takav proces se nastavlja sve do popunjavanja basena u kojem se taloženje izvodi ili do pojave nekog novog geološkog procesa, koji će prekinuti ili izmijeniti prethodni režim taloženja.

Stratigrafija je bazirana na nekoliko principa, koji se koriste za relativno datiranje i proučavanje sedimenata. Tako, princip originalne horizontalnosti, izražava upravo opisani proces – da su novonastali sedimenti horizontalni ili blago nagnuti. Princip superpozicije izražava da je, u neporemećenoj sredini, sloj koji se nalazi iznad drugog – mlađi od njega. Princip originalnog bočnog rasprostranjenja iskazuje da se sloj prostire bočno sve dok neka druga struktura stijene to ne promijeni. Princip presijecanja sedimenata nalaže da je sloj koji presijeca drugi sloj, mlađi od njega, dok princip inkruzije (uklopka) kaže da je struktura koja je inkruzirala (uklopjena nekim procesom) u drugu – starija od nje. Svi ovi principi stratigrafije su razumljivi sami po sebi, ali omogućuju praktičnu interpretaciju (tumačenje) relativne dispozicije djelova sedimentnog kompleksa u geološkom vremenu i utvrđivanje istorijskog toka geoloških procesa koji su doveli do stvaranja te stijene.

Identifikovanjem određenih vrsta fosila (koji su nastali u određenom, relativno kratkom geološkom vremenu) u slojevima, moguće je izvršiti nešto detaljnije relativno datiranje, koristeći metode ***biostratigrafije***, odnosno vremenskog pozicioniranja sedimenata na osnovu poznate relativne iliapsolutne starosti utvrđenih fosila u njima.

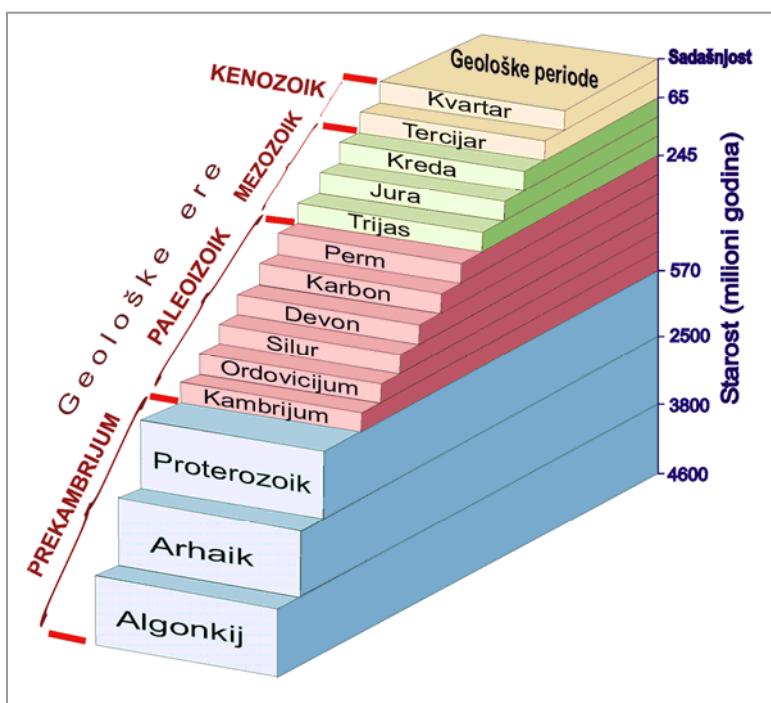
Metod relativnog datiranja stijena i geoloških procesa korišćen je kao jedini metod gotovo stotinu godina. Tek krajem devetnaestog vijeka, otkrićem radioaktivnosti započinje istraživanje apsolutnog datiranja događaja, a samim tim i proučavanje mogućnosti kalibracije (baždarenja) relativne geološke skale vremena u numeričku, apsolutnu.

6.2.2.1. Geološka podjela istorije Zemlje

Kao što smo naveli, prvi jednoćelijski organizmi nastali su prije oko 3,8 milijardi godina. Prve, znatno kompleksnije ćelije su se pojavile prije 2,1-2,5 milijardi godina. Oko 680 miliona godina prije današnjice, nastaju prvi višećelijski organi-zmi, a 540

Grupa organizama	Vrijeme nastanka prije sadašnjosti (milioni godina)
Morski bezkičmenjaci	540
Ribe i kopnene biljke	438
Amfibije	408
Reptili	320
Sisari	208
Biljke cvjetnice	140
Linija hominida (čovjekolikih bića)	15-20

Tabela 7. Vrijeme nastanka glavnih životinjskih i biljnih vrsta



Slika 92. Geološka podjela istorije Zemlje na ere i periode.

miliona godina unazad, započinje nagli razvoj višećelijskih organizama, poznat kao "Kambrijumska^{*} eksplozija živog svijeta". Vrijeme nastanka osnovnih životinjskih i biljnih vrsta može se vidjeti iz tabele 7.

U Geologiji cijela istorija Zemlje je podijeljena na **eone, ere, periode i epohе**. U tabeli 8 grafički je prikazana ta podjela, uporedno sa indikacijom apsolutnog vremena, kao i vremenom pojave značajnijih vrsta organizama, biljaka i životinja.

Osnovni eoni u geološkoj istoriji Zemlje su: **Fanerozoik** (od današnjice do 540 miliona godina unazad) i **Prekambrijum**. Ova dva eona dalje su izdijeljana na po tri ere i to, Prekambrijum se dijeli na **Proterozoik, Arhaik i Algonkij**, dok Fanerozoik sadrži: **Paleozoik** (koji obuhvata period između 245 i 540 miliona godina unazad), **Mezozoik** (66-245 miliona godina prije današnjice) i **Kenozoik** (od danas do 66 miliona godina unazad). Paleozoik se dalje dijeli na 6 perioda: **Kambrijum, Ordovicijum, Silur, Devon, Karbon i Perm**; Mezozoik je podijeljen na tri ere: **Trijas, Juru i Kredu**, a Kenozoik na samo dvije periode: **Tercijar i Kvartar**, pri čemu Tercijar ima dvije podperiode: **Paleogen i Neogen**. Geološka perioda Tercijar se dalje dijeli na pet epoha: **Paleocen, Eocen, Oligocen**, koje pripadaju podperiodi Paleogen i epohе **Miocen i Pliocen**, koji čine Neogen. Najzad, najmlađa perioda Kvartar se dijeli na dvije epoha: **Pleistocen i Holocen**, koji traje i danas.

Geološka podjela istorije Zemlje

Tabela 8.

Eon	Era	Period	Epoha	Starost (milioni god.)	Pojava vrsta			
F a n e r o z o i k	Kenozoik	Kvartar	Holocen	0 – 1,8	Većina životinja današnjice javila se prvi put u ovoj periodi istorije Nestanak dinosaurusa; Razvoj sisara; Pojava prve trave i životinja koje su se njom hranile: konji, kamile, rinoceros, ...			
			Pleistocen					
		T e r c i j a r	Neogen	Pliocen				
				Miocen				
			Paleogen	Oligocen				
				Eocen				
				Paleocen				
	Mezozoik	Kreda		66 - 144	Dinosaurusi i prvi sisari; Pojava savremenog drveća			
		Jura		144 - 208				
		Trijas		208 - 245				
	Paleozoik	Perm		245 - 286	Amfibolije i prvi reptili (ptice)			
		Karbon		286 - 360				
		Devon		360 - 408	Prve ribe; Javljuju se prvi oblici biljaka sa drvenom strukturom stabla, kao i prve šume			
		Silur		408 - 438				
		Ordovicijum		438 - 505	Prvi bezkičmenjaci, primitivni oblici biljaka na kopnu i moru			
		Kambrijum		505 - 540				
Preka- mbrijum	Proterozoik			540 – 2.500	Višećelijski organizmi			
	Arhaik			2.500 – 3.800	Jednoćelijski organizmi			
	Algonkij			3.800 – 4.600	Formiranje planete			

* Kambrijum je prva perioda ere Paleozoika – vidi tabelu sa geološkom skalom vremena.

Paleontologija

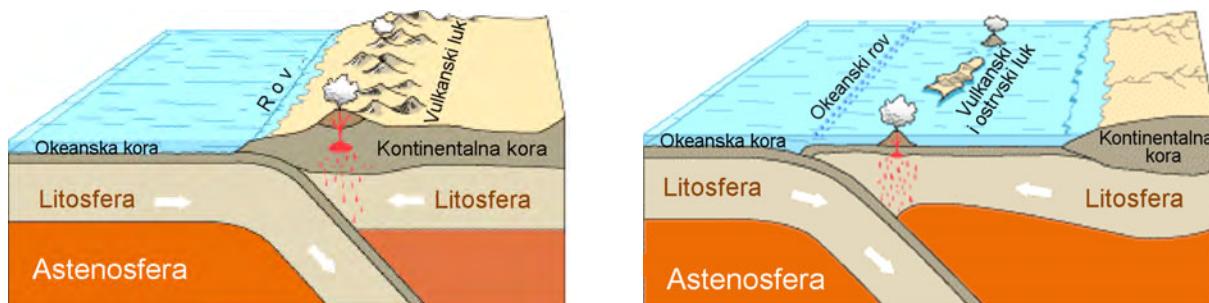
Dio geologije koji se bavi proučavanjem istorijskog razvoja živih bića na Zemlji, baziranim na njihovim fosilnim ostacima i njihovim hronološkim pozicioniranjem, naziva se **paleontologija**. Fosili nastaju hemijskom zamjenom organskih komponenata u životinjskim i biljnim ostatacima kalcijum-karbonatom ili silikatom (slika 93). Sastavni djelovi paleontologije su: paleozoologija (paleontologija životinja), paleobotanika (proučavanje fosilnih ostataka biljaka) i mikropaleontologija (pručavanje mikroflosila, odnosno mikrorganizama). Primarni značaj paleontologije je sadržan u korišćenju fosilnih ostataka za određivanje relativne starosti i porijekla stijena koje ih sadrže.



Slika 93. Fosil raka (lijevo) velikog puža vrste ammonita (u sredini) i stare paprati (desno) u stijeni.

6.3. Tektonika, orogeneza i reljef

Izgled reljefa Zemlje svjedoči o intenzivnim tektonskim procesima u zemljinoj kori, koji, kao što smo već govorili u poglavljiju o zemljinoj unutrašnjosti, predstavlja posljedicu geodinamičkih procesa globalnih razmjera, koji izazivaju pomjeranje kontinenata, odnosno globalnih tektonskih ploča. Tektonske ploče (slika 36 u poglavljiju o zemljinoj unutrašnjosti) obuhvataju oko 150 kilometara debele velike segmente litosfere, koje plutaju po astenosferi, odnosno gornjem dijelu spolašnjeg omotača. Kao posljedica ovog kretanja, nastaju procesi koje smo takođe opisali, kao što su subdukcija djelova zemljine kore, vulkanske i intruzivne aktivnosti, deformacija zemljine kore i slično (slika 96). Subdukcija okeanske litosfere ispod kontinentalne kore pruzrokuje luk vulkana na kopnu (slika 96) koji pretežno izbacuju andezitsku magmu.

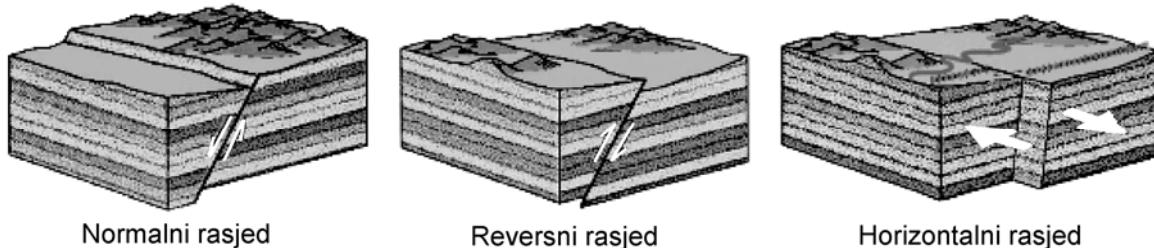


Slika 96. Subdukcionici procesi na rubovima kontinenata (lijevo) i u okeanima (desno).

U međusobnom kontaktu, tektonske ploče stvaraju velike pritiske i napone u stijenama, u kojima se ostvaruje deformacija (lom ili ugibanje) kada postignuti naponi prevaziđu gornje granice njihove mehaničke čvrstoće. Tada nastaje tektonska, mehanička izmjena strukture stijenske mase, obavlja se njeno ubiranje, razlamanje, odnosno rasijedanje, izdizanje itd. Zajedničkim

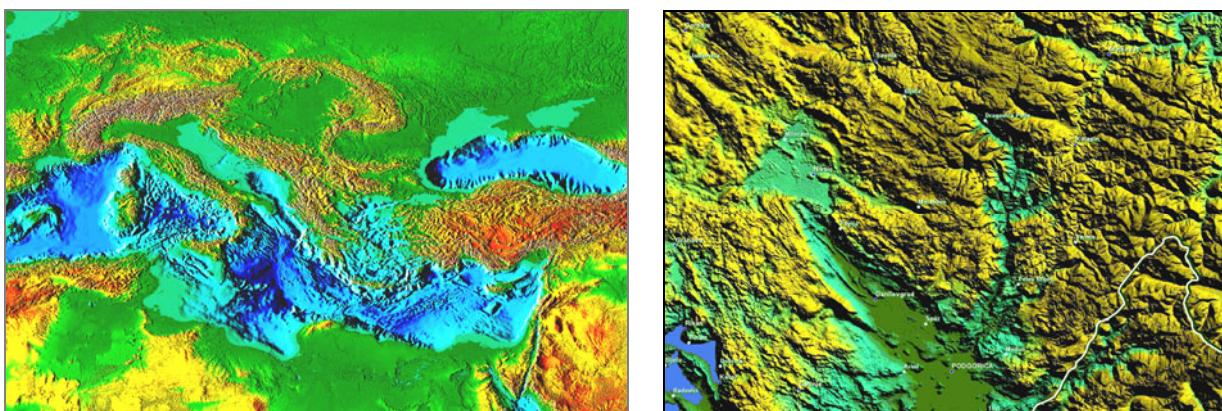
dejstvom ovih tektonskih faktora i erozionih procesa stvara se reljef kao konačni, površinski izgled tla.

Jedan od najmarkantnijih geoloških oblika deformacije stijena zemljine kore je njeno rasijedanje, koje nastaje kao relativno kretanje jednog bloka stijenske mase preko drugog duž stvorene pukotine u stjeni, čime nastaje ***rasjed***. Na slici 97 prikazana su tri osnovna tipa rasijedanja stijena: normalni, reversni i horizontalni rasjed. Njihovom kombinacijom, stvaraju se i kompleksnije tektonske forme (graben, horst, navlaka, kraljušt i dr.).



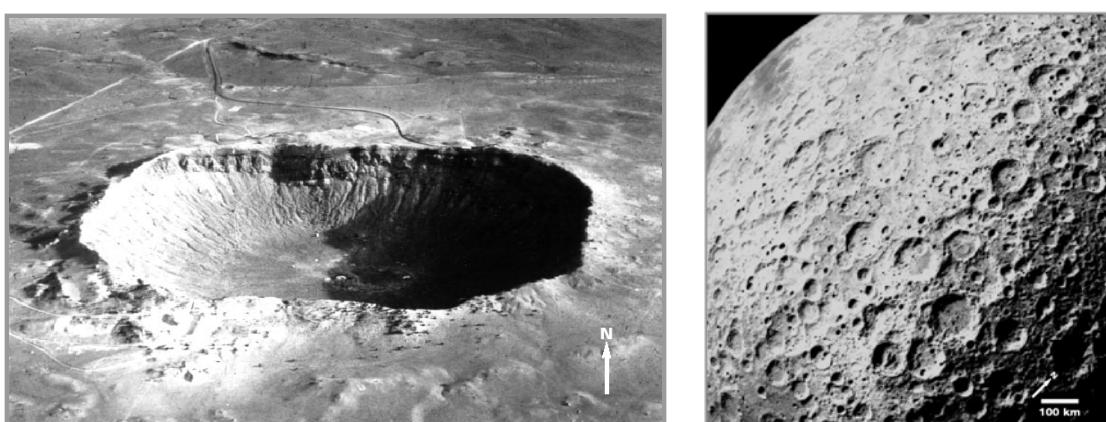
Slika 97. Osnovni tipovi rasijedanja stijena.

Dakle, stalnim kombinovanim dejstvom erozije i tektonskih procesa, vrši se stvaranje i oblikovanje reljefa, praktično tokom cijele zemljine istorije.



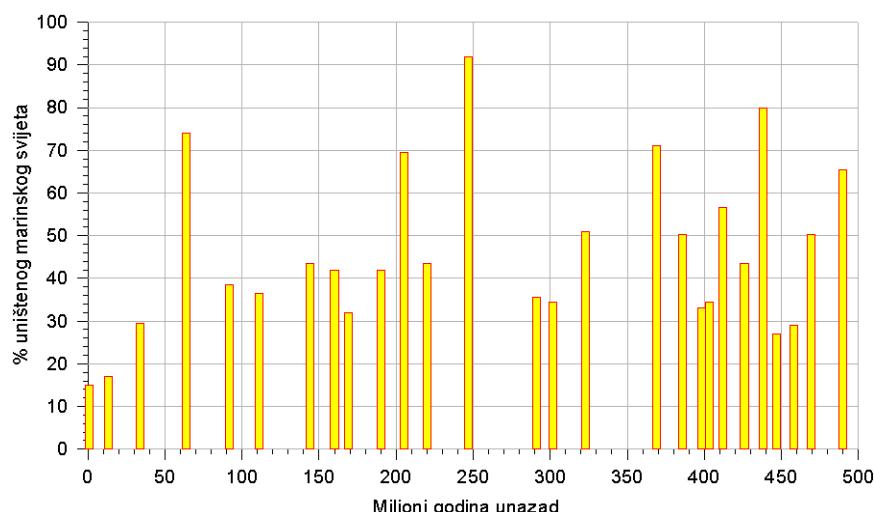
Slika 98. Reljef kopna i morskog dna na prostoru Mediterana (lijevo) i detalj reljefa centralnog dijela Crne Gore (kanjon rijeke Morače i dolina rijeke Zete), na osnovu digitalnog modela terena sa rezolucijom 3x3'' (oko 90m).

Više puta tokom geološke istorije Zemlje, našu planetu su pogadali brojni meteoriti i asteroidi, o čemu svjedoče brojni svježi krateri (slika 99) ali mnogo veći broj kratera je dejstvom intenzivne erozije danas maskiran, tako da se ne zapaža na zemljinoj površi.



Slika 99. Meteorski krater u Arizoni (SAD) prečnika 1.200 metara, nastao prije 49 hiljada godina udarom meteorita prečnika oko 60 metara (lijevo) i ožiljci brojnih kratera meteorita na Mjesečevoj površi (desno).

Zemljin Mjesec je takođe pretrpio veoma veliki broj sudara sa brojnim meteoritima i asteoridima. Kako na Mjesecu nema erozije, s obzirom da na njemu ne postoji ni atmosfera ni hidrosfera, ožiljci meteorita i asteroida na njemu su vrlo dobro vidljivi i može se izbrojati više desetina hiljada manjih i većih kratera. S obzirom da je masa Zemlje 81 puta veća od mjeseceve, to znači da je svojim gravitacionim dejstvom Zemlja privukla znatno veći broj asteroida i meteorita, od kojih su oni manji sagorjeli i raspali se u atmosferi, ali je sigurno da je tokom njene istorije vrlo veliki broj ogromnih kosmičkih objekata pao na zemljinu površ izazivajući značajne promjene u režimu života na Zemlji, često označavajući početke novih geoloških perioda ili epoha.



Slika 99a. Dijagram vremena i intenziteta utvrđenih najznačajnijih masovnih uništenja morskog svijeta tokom posljednjih 500 miliona godina istorije Zemlje (prema brojnim autorima).

Danas postoje jasni dokazi (npr. veća koncentracija iridijuma u nekim sedimentnim slojevima, prepoznatljivi krateri meteorita, vrlo markantne geološke vremenske granice i sl.) da je, više puta tokom geološke istorije, živi svijet na Zemlji prolazio kroz katastrofalna razaranja izazvana udarima asteroida i drugih kosmičkih objekata (slika 99a). Posebno je u tom smislu izražen događaj od prije 65 miliona godina (granica Kreda-Tercijar) kada su nestali svi dinosauri i brojne druge velike životinje. Za istu granicu vezuje se i pojava izuzetno velikih magmatskih izliva u predjelu Dankan u zapadnoj Indiji, kada je u periodu od samo milion godina izliveno između 2 i 3 miliona kubnih kilometara magme na zemljinu površ. Ipak, katastrofa koja se zbila prije oko 250 miliona godina (na geološkoj granici Perm-Trijas) najvjerojatnije je izazvala najveće devastiranje živog svijeta u istoriji Zemlje, s obzirom da je tada uništeno preko 90 % svih živih organizama u okeanima (marinski organizmi) i preko 70 % kopnenih živih vrsta. Na slici 99a na, osnovu paleontološkog i radiometrijskog istraživanja, prikazan je čitav niz najrazornijih sekvenci koje su tokom posljednjih 500 godina zadesile planetu Zemlju, preko procenta uništene marinske populacije biljaka i životinja u određenom istorijskom vremenu prije današnjice.

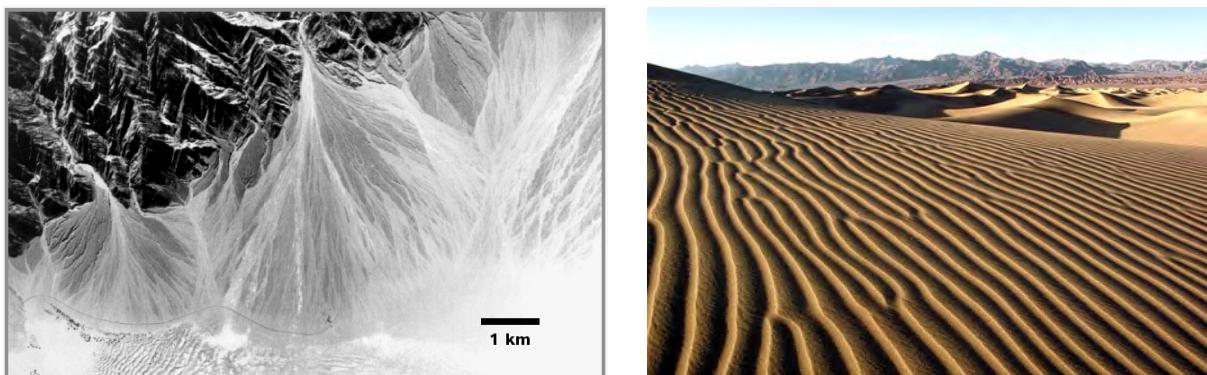
6.4. Geološka svojstva stijena i tla i geološki procesi

Inženjerska geologija, kao dio opšte geologije, zajedno sa **mehanikom tla** i **mehanikom stijena**, bavi se proučavanjem fizičkih, mehaničkih i strukturalnih svojstava stijena, brojnim geološkim procesima u tlu, kao i kvantifikovanjem nivoa geoloških hazarda. Ova svojstva stijena obuhvataju: **ispucalost**, **granulometrijski sastav** (zastupljenost čestica po krupnoći), **poroznost** (procentualno učešće pora i šupljina u ukupnoj zapremini stijene), **vodopropusnost** (svojstvo

propusnosti vode), **higroskopnost** (svojstvo upijanja vlage), **mehaničku čvrstoću, deformabilnost, plastičnost** i sl.

Od geoloških procesa u stijenama, u inženjerskoj geologiji se posebno izučavaju **dezintegracija** ili **raspadanje stijena** u površinskom sloju, pod dejstvom hemijskih, fizičkih i bioloških agenasa, **erozioni procesi**, koji obuhvataju dejstvo vode, mraza, vjetra i topote na stijene, zatim **depozicija** ili **taloženje aluvijalnih i deluvijalnih sedimenata**, stvaranje **fluvijalnih oblika** u površinskim vodenim tokovima, **odronjavanje stijena, kliženje i puženje tla i stijena, glacijalni procesi** i mnogi drugi. Geološki hazardi predstavljaju vjerovatnoću pojave štetnih geoloških procesa, kao što su kliženja velikih masa tla, odron velikih masa stijena, tečenje tla velikih razmjera, hazard od pojave vulkanizma, kao i u širem smislu seizmički hazard, odnosno opasnost od pajave razornih zemljotresa, tektonskih ruptura, itd.

Hemijsko **raspadanje stijena** (dezintegracija) obuhvata alteraciju (izmjenu) hemijskog i menarolškog sastava stijene, dejstvom hidrolize, oksidacije, karbonifikacije i drugih procesa. Raspadanje stijena nastaje i fizičkim dejstvom abrazije (tarenja), kristalizacije, termičke insolacije, kao i učestalom promjenama vlažnosti stijene i promjenama pritiska u njoj (na primjer – uslijed dejstva mraza). Takođe, biološka dezintegracija stijena i minerala odvija se i dejstvom hemijskih i fizičkih agenasa koje proizvode živi organizmi u tlu, pretežno bakterije.



Slika 100. Bogate naslage aluvijalnih sedimenata u Dolini Smrti u Kaliforniji (*Stovepipe Wells, Death Valley, California*) - snimak iz aviona (lijevo i tipičan izgled pustinjskih sedimenata (dina) - desno).

Erozija je proces otkidanja čestica tla i stijena, njihovog transportovanja i pretaložavanja na drugoj lokaciji, pod dejstvom vode, vjetra, leda i gravitacije. Energija erozije sadržana je u gravitaciji koja djelovanjem na čestice tla uslovljava njihovo kretanje ka nižim kotama. Dejstvo sunčevog zračenja i topote je još jedan energetski proces koji pomaže procesu erozije – uslijed značajne promjene temperature u tlu zagrijavenjem stijena tokom dana i hlađenjem tokom noći. Površinske vode koje teku uslijed padavina posjeduju kinetičku energiju koja značajno doprinosi erozionom procesu transportovanjem čestica tla i stijena, dok snijeg i led imaju potencijalnu energiju, koja se aktivira u fazi njihovog topljenja i mehaničkog djelovanja na stimulisanje erozionog procesa u tlu i stijenama.

Površinski vodiči tokovi, erozijom stvaraju grupu posebnih geoloških procesa i oblikovanja reljefa, kao i depresione oblike u vidu rječnih i potočnih korita, kanjona, vododerina i slično – svojim mehaničkim i hemijskim dejstvom na stijene. Istovremeno, pretaložavanjem erodovanog stijenskog materijala i tla, vodiči tokovi stvaraju nove sedimente – plavine (slika 100) sedimentne terase, debele depozite sedimenata u morima i jezerima i slično. Dejstvom vjetra u aridnim regionima nastaju pustinje, potpunim erodovanjem stijena do njihovog prevođenja u pjesak odnosno pješčanu pustinju ili kamenitu pustinju (slika 100). Pjeskoviti nevezani sedimenti zasvođenog oblika nazivaju se **dinama**.

Odronjavanje stijena se javlja obično iznenada, otkidanjem manjih i većih komada stijena, kao i većih količina razdrobljenih stijenskih masa (slika 101). Zbog svoje velike unutrašnje čvrstoće, stijenske mase lako podnose i velike nagibe padina. Međutim, kada se pojave oslabljene zone u obliku prslina i pukotina, koje se šire erozionim procesima, naročito pod dejstvom površinskih padavina i dejstvom leda, nastaje odvajanje manjih i većih komada stijenskog materijala i blokova, a u slučajevima kada se u stijenskom masivu pojave pukotine većih razmjera, mogu se odroniti i ogromne količine materijala. Na slici 102. je prikazan primjer velikog odrona stijena (koji je djelimično nastao i ljudskom djelatnošću) kada se za manje od 2 minuta odronilo 33 miliona kubih metara stijenskog materijala i izazvalo katastrofalni efekat na širem prostoru. Dugotrajni odroni na planinskim padinama stvaraju sipare, odnosno naslage razdrobljenih, nezaobljenih komada stijena različitih dimenzija, čija debljina može imati i više desetina metara.



Slika 101. Tipičan izgled kliženja tla (klizišta) lijevo i veliki odron stijena koji se desio u Britanskoj Kolumbiji, Kanada (desno).

Tečenje tla nastaje kada je tlo toliko natopljeno vodom da materijal koji čini tlo u potpunosti izgubi koheziju između čestica, nakon čega materijal počinje da teče, obično u vidu debelog sloja blata (slika 102).

Kliženje tla je vrlo čest geološki proces koji u naseljenim mjestima rezultira velikim štetama. Nastaje laganim ili brzim kliženjem veće količine tla na kosim padinama, uslijed dejstva gravitacije, kada težina tla na padini prevaziđe unutrašnji otpor tla, odnosno koheziju. Kliženje se obavlja duž klizne ravni koja obično ima zaobljeni, školjkasti, odnosno polukružni oblik. Brzina kretanja klizišta može biti od 1 metar na dan do 300 kilometara na čas – kod klizišta stimulisanih dejstvom zemljotresa. Stabilnost padina analizira se posebnim numeričkim metodama koje su bazirane na rezultatima ispitivanja tla (kohezija i unutrašnje trenje), kojima se utvrđuje tzv. faktor sigurnosti padine.



Slika 102. Odon stijena u oblasti Alberta u Kanadi 1903. godine i primjer tečenja tla (desno), gdje isprekidana linija označava granice toka tla.

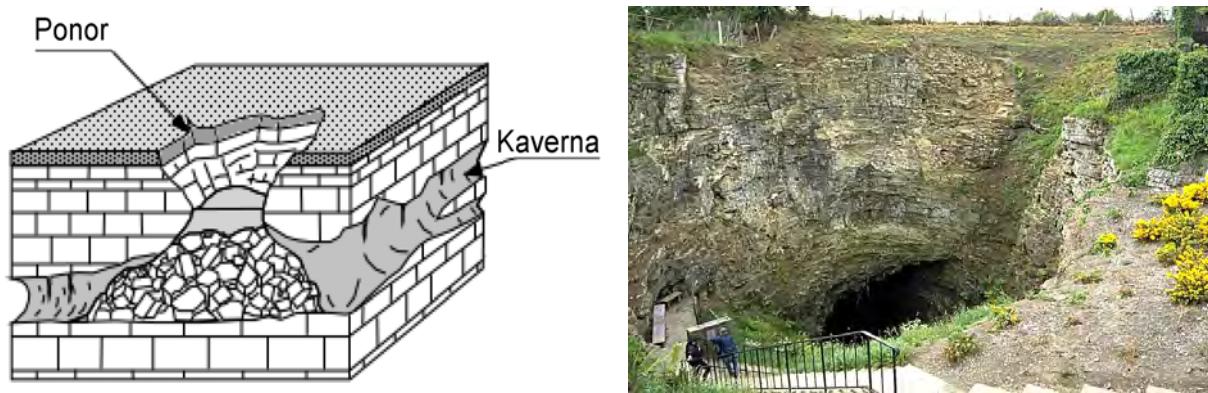
Laboratorijskim geomehaničkim i geotehničkim ispitivanjima tla, utvđuju se brojni parametri kao što su: poroznost, Aterbergove granice tečenja tla i plastičnosti (granice promjene agregatnog stanja tla), zapreminska težina, gustina, granulometrijski sastav tla, mehanička čvrstoća stijene, vodopropusnost i mnoge druge.

Karst je geološki fenomen koji predstavlja hemijski erodovanu, najčešće krečnjačku ili dolomitsku stijenu (slika 103). Karst je dobio ime po oblasti Karst u Sloveniji, gdje je prvo uočen i opisan. Karst se stvara na taj način što kapi kiše koje sadrže rastvoren ugljen-dioksid (odnosno ugljenu kiselinu H_2CO_3) iz vazduha i ostataka biljaka u tlu, prodiru kroz pukotine i prsline u krečnjačku ili dolomitsku stijenu i vrše njenо hemijsko rastvaranje* (na primjer prevodeći $CaCO_3$ u lako rastvorljivi $CaHCO_3$). Većina karstnih terena sadrži malo humusnog pokrivča, odnosno tla. Karstifikacija može zahvatiti veće oblasti, kao što je to na primjer oblast cijelih Dinarida, stvarajući raznovrsne, obično lijepe karstne oblike u terenu. Međutim, zbog vrlo slabe prirodne filtracije, karstni tereni su vrlo podložni zagadenju.



Slika 103. Tipičan izgled "ljutog" karsta (ili krasa).

U karstnim terenima, pored dolina, formiraju se i razni drugi geološki oblici, kao što su vrtače, koje nastaju zarušavanjem svodova velikih pećina i njihovim kasnjijim sedimentnim zapunjavanjem, zatim pećine, kaverne (pećine sa više međusobnih kanala), ponori i slični oblici (slika 104).



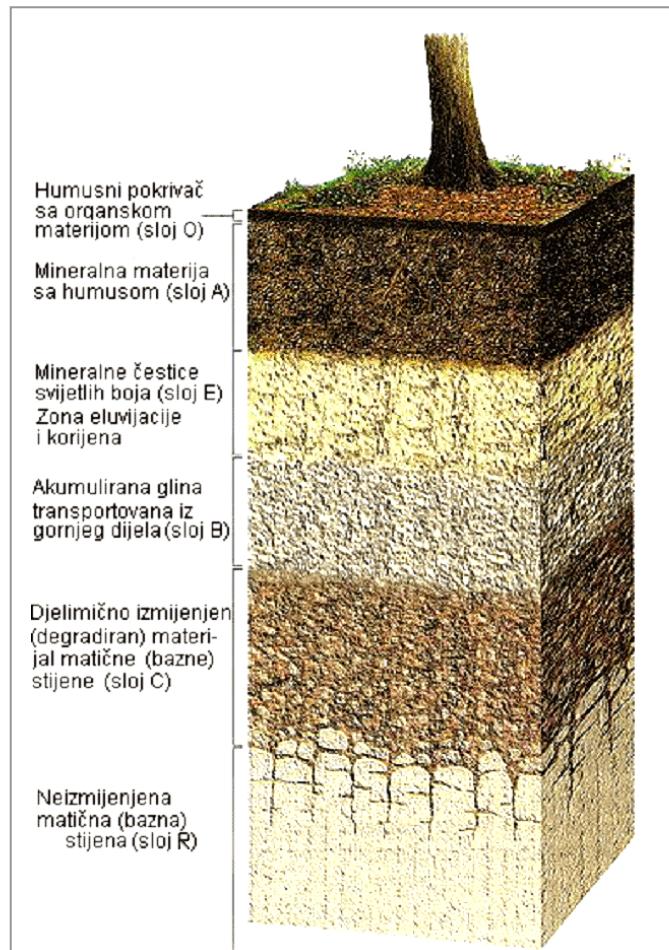
Slika 104. Način stvaranja i izgled ponora (lijevo) i kaverni (pećina) u karstu (desno).

* Proces stvaranja ugljene kiseline H_2CO_3 u vodi odvija se po formuli: $H_2O + CO_2 \rightarrow H_2CO_3 \rightarrow H^+ + HCO_3^-$. Stvoreni pozitivni jon H^+ je mali i lako može prodrijeti u kristalnu rešetku minerala, oslobađajući drugi jon u vodi i na taj način hemijsko rastvaranje.

6.4.1. Pedologija

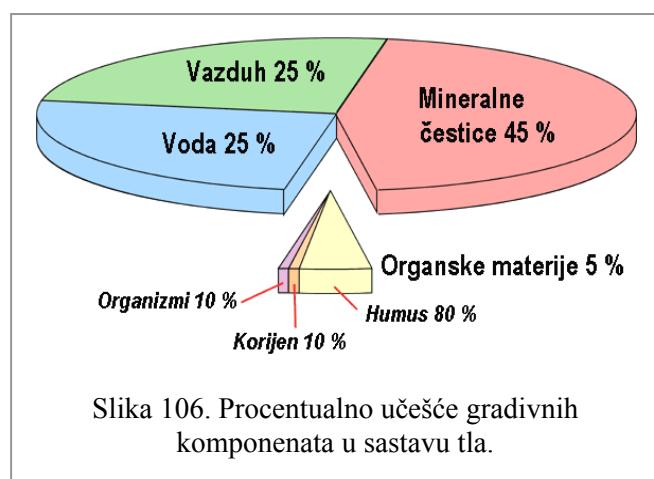
Pedologija predstavlja naučni ogranak geologije, koji se bavi proučavanjem tla u užem smislu, a obuhvata klasifikovanje i proučavanje procesa nastanka tla. Pedologija je značajna za agrikulturu i kultivaciju tla.

Vertikalni presjek tipičnog tla, pokazuje kompoziciju od 6 slojeva (slika 105): na samoj površi nalazi se tanki rastresiti sloj sa organskom materijom i humusom (naziva se i sloj O); ovaj sloj ne mora biti prisutan na nekim terenima. Ispod humusnog pokrivača nalazi se sloj mineralne materije sa dosta organske materije, u kojem se koncentriše korijen biljke (sloj A). U narednom sloju (E), koji je prisutan samo u kiselim tlama, kao što su šume četinara, uočava se dosta svijetlih mineralnih čestica, sa značajnim dijelom korijenovog sistema. Sljedeća je zona maksimalne koncentracije produkata raspadanja tla iz gornjih slojeva, kao što su silikatne gline, zatim minerali i čestice gvožđa, aluminijuma, humus, karbonati, gips (sloj B), zbog čega je najčešće ovaj sloj crvenkaste i braonkaste boje. Djelimično izmijenjen (degradiran) materijal matične stijene je pretposljednji (sloj C), a odlikuje ga svjetlo žuta do braon boja. Najzad, u osnovi je najčešće čvrsta, neizmijenjena, tzv. matična stijena (nekad označena i sa R).



Slika 105. Tipičan presjek tla do osnovne stijene.

Prosječno tlo je obično izgrađeno od mineralnih čestica u (zapreminskom) obimu od 45 %, zatim vode od 25 %, vazduha 25 % i organskih materija u iznosu od oko 5 % (slika 106). Organisku materiju najčešće čine humus do 80 %, korijenova masa oko 10 % i organizmi u tlu u iznosu od oko 10 %.



Slika 106. Procentualno učešće gradivnih komponenata u sastavu tla.

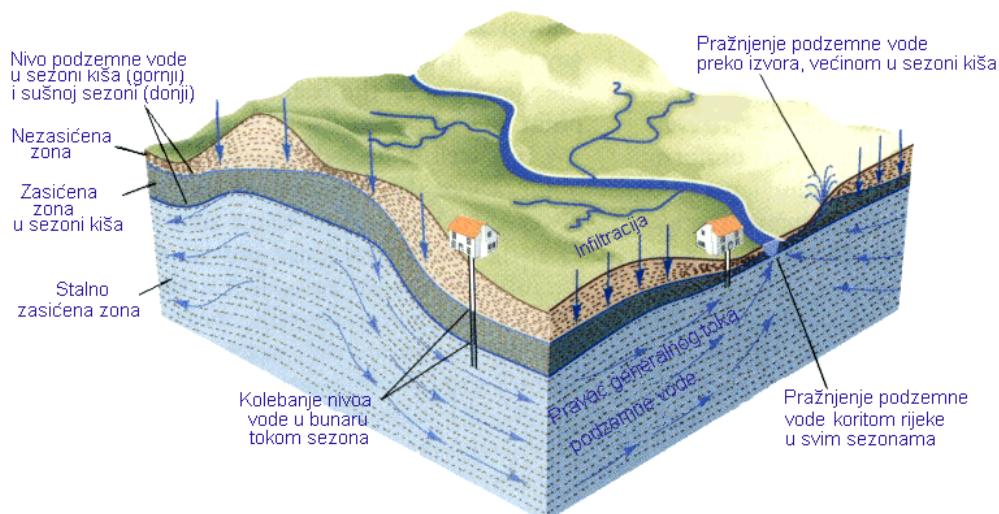


Erozija padine sa koje je uklonjen biljni pokrivač.

Zavisno od klimatskih uslova, za formiranje jednog centimetra tla sa organskim i hemijskim komponentama povoljnim za agrikulturu, potrebno je između 80 i 400 godina. Zbog toga, tlo koje je erodovano, ostaje praktično neupotrebljivo za poljoprivredu za dugi period vremena.

6.5. Hidrogeologija

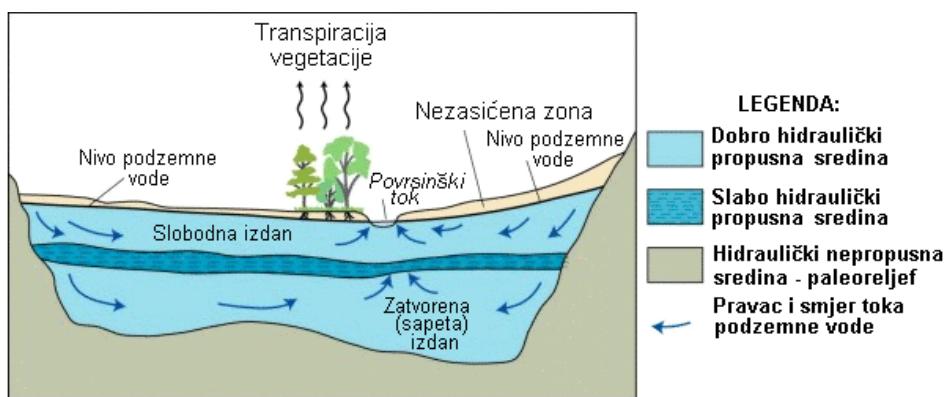
Hidrogeologija je dio geologije koji se bavi proučavanjem formiranja, kretanja i pražnjenja podzemnih voda u plićim stijenskim formacijama. Podzemna voda je zapravo voda koja je prisutna u porama i pukotinama stijena i tla u zemljinoj unutrašnjosti. Ona vodi porijeklo od površinskih padavina, koje prodiru kroz tlo u njegove dublje djelove, odakle se podzemnim tokovima ponovo vraća na zemljinu površ – ulivajući se u jezera, rijeke ili mora ili izvirući preko izvora na površi terena.



Slika 107. Proces akumuliranja i kretanja podzemne vode u tlu.

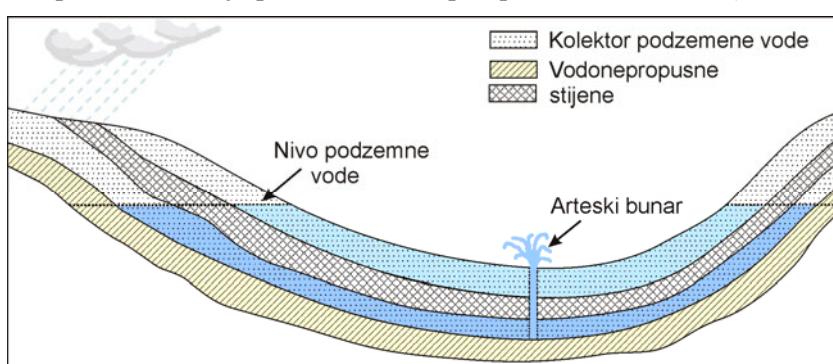
Pored opštег geološkog aspekta, značaj hidrogeologije se manifestuje u oblasti kompleksnih fizičkih, bioloških i hemijskih interakcija između tla, vode, prirode i čovjeka. Podzemne vode obuhvataju samo 1 % ukupne količine vode na Zemlji, ali je ta količina čak 35 puta veća od ukupne količine voda u jezerima i površinskim tokovima. Zapremina podzemnih voda je ekvivalentna sloju debelom 55 metara koji se rasprostire po cijeloj Zemlji. Podzemne vode su prisutne praktično svugdje ispod zemljine površi i obično dosežu dubinu od oko 750 metara, pa čak i na prostorima ispod pustinjskih površi.

Površinska voda koja nastaje od padavina ili topljenja snijega i leda, prodire u tlo i silazi do takozvane zone aeracije (bogate vazduhom) ili nesaturisane (vodom nezasićene) zone, gdje je većina pora tla popunjena vazduhom. Ako prodire dublje, dospjeće u tzv. saturisanu (zasićenu) zonu u kojoj su praktično sve pore zapunjene vodom (slika 107). Površ ispod koje su sve šupljine u stijeni i tlu zapunjene vodom naziva se **nivoom podzemne vode**, a volumen tla zasićenog vodom – **izdan podzemne vode**, ili u anglo-saksonskoj terminologiji – **akvifer** (aquifer). Izdan koja je sa gornje strane otvorena prema slobodnoj zemljinoj površi naziva se **slobodna izdan**, dok se izdan ograničena vodonepropusnim slojevima naziva **zatvorena ili sapeta izdan** (slika 108). U pustinjskim regionima nivo podzemne vode vrlo rijetko izdanjuje (izbjija na zemljinu površ) dok u vlažnim regonima izdan podzemne vode izbija na zemljinu površ u rječnim dolinama i jezerima i generalno prati topografiju. Dubina nivoa podzemne vode tokom godišnjih doba značajno osciluje, povećavajući se tokom sušnih i smanjujući se tokom kišnih perioda (slike 107 i 108).



Slika 108. Način kretanja podzemne vode i vrste izdani.

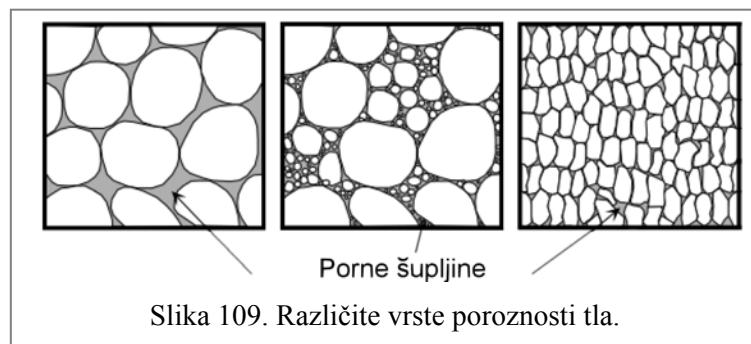
Ukoliko se dio izdani nađe između dva vodonepropusna sloja, koja svojim položajem mogu ostvariti povećani pritisak u toj izdani, stvorice se tzv. **arteska*** izdan ili izdan pod pritiskom. Bušenjem ovakve izdani, nastupiće "eruptivno" isticanje podzemne vode pod pritiskom iz izdani (slika 108a).



Slika 108a. Mechanizam arteske izdani.

Podzemna voda je u stalnom kretanju, iako je brzina tog kretanja manja od brzine površinskih tokova, pošto se voda u tlu mora probijati kroz pore u tlu i stijenama. Brzinu kretanja vode u tlu određuju dva parametra: **poroznost** i **permeabilnost** (vodopropusnost) stijene. Kao što smo već konstatovali, poroznost predstavlja procentualno učešće otvorenih šupljina (pore) u jedinici zapremine stijene (slika 109) i određuje količinu vode koju stijena može da sadrži. Permeabilnost je stepen međusobne povezanosti pore i stepen te veze. Niska poroznost obično rezultira i niskom permeabilnošću, ali velika poroznost ne uslovjava obavezno veću permeabilnost. Način i brzina kojom se podzemna voda kreće kroz saturisanu zonu zavisi od tzv. hidrauličkog gradijenta, odnosno od razlike u visini dvije tačke te zone, podijeljene sa njihovim međusobnim rastojanjem – drugim riječima to je strmina nivoa podzemne vode između te dvije tačke. Veći hidraulički gradijent u načelu znači i veću brzinu kretanja podzemne vode.

Matematičko modelovanje procesa kretanja podzemnih voda u poroznom tlu vrši se primjenom numeričkih metoda baziranih na rješavanju kompleksnih sistema diferencijalnih jednačina koje opisuju distribuciju i kretanje podzemne vode u tlu. Modelska rješenja omogućuju uspješno



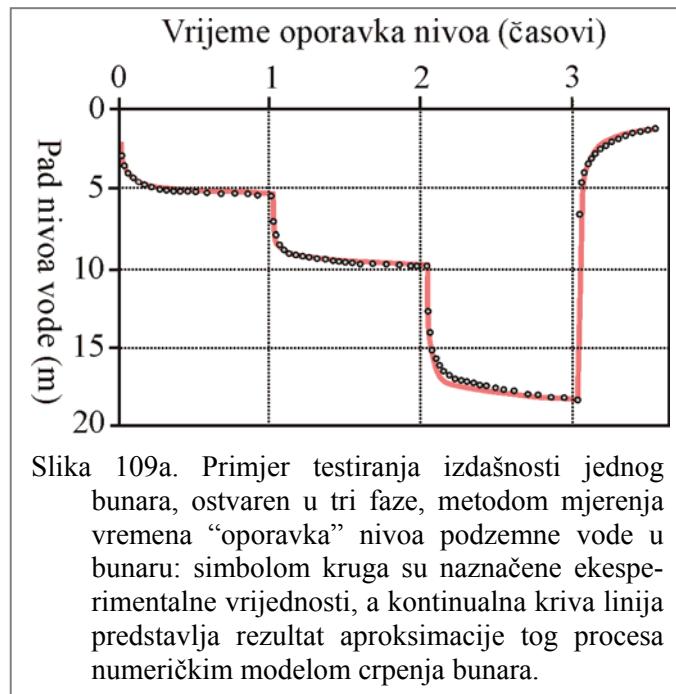
Slika 109. Različite vrste poroznosti tla.

* Naziv arteski potiče od naziva provincije Artoa (Artois) u Francuskoj gdje je takva pojавa prvi put uočena još 1126. godine.

predviđanje ponašanja (toka) podzemne vode u sistemu bunara ili eksploatacionalih bušotina i adekvatno upravljanje resursima podzemne vode.

Za potrebe hidrogeoloških ispitivanja (namijenjenih vodosnabdijevanju, navodnjavanju, ekološkim ispitivanjima, dreniranju itd.) utvrđivanjem prisustva izdani podzemne vode u tlu vrši se istražnim bušenjem ili izradom istražnih bunara ili pak raskopa. Zatim se radi determinisanja karakteristika (izdašnosti) te izdani, obavlja njen testiranje procesom "stimulisanja izdani" na taj način što se vrši višesatno, pa i višednevno ispumpavanje podzemne vode i registrovanje "odziva izdani" preko ostvarene amplitude sniženja nivoa vode u bušotini ili istražnom bunaru. Interpretacija takvih osmatranja i ocjena izdašnosti (vodenosnog kapaciteta bušotine ili bunara) obavlja se preko utvrđenih numeričkih modela izdani. Na slici 109a prikazan je jedan tipičan primjer rezultata probnog crpenja podzemne vode u ispitnom bunaru, obavljenog testiranjem u tri faze. Testiranje je bazirano na mjerenu vremena oporavka nivoa podzemne vode (vrijeme povratka u pređašnje stanje), nakon spuštanja nivoa za određenu veličinu. Rezultati osmatranju su označeni na slici simbolom kruga, a teorijske vrijednosti na bazi definisanog modela izdašnosti bunara, označene su punom debelom linijom. Očigledna je vrlo dobra međusobna korelacija podataka crpenja i modelovanja.

Za potrebe osmatranja karakteristika izdani podzemne vode na širem istražnom prostoru, primjenjuje se mreža posebnih osmatračkih bušotina ili bunara, koji se nazivaju **piezometrima**, u kojima se kontinualno osmatra nivo podzemne vode i određuje hidraulički gradijent.



Slika 109a. Primjer testiranja izdašnosti jednog bunara, ostvaren u tri faze, metodom mjerena vremena "oporavka" nivoa podzemne vode u bunaru: simbolom kruga su naznačene eksperimentalne vrijednosti, a kontinualna kriva linija predstavlja rezultat aproksimacije tog procesa numeričkim modelom crpenja bunara.

7. SEIZMOLOGIJA

Imajući u vidu značaj Seizmologije i njen doprinos geonaukama u cjelini, kao i značaj Inženjerske seizmologije za oblast aseizmičkog¹ planiranja i projektovanja, kao i činjenicu da je kurs Osnovi geonauka namijenjen studentima odsjeka Geodezije na Građevinskom fakultetu, u čijem nastavnom planu i programu nije predviđen poseban predmet iz oblasti inženjerske seizmologije, za razliku od Konstruktivnog odsjeka tog fakulteta, to je poglavlje o Seizmologiji ovdje prikazano opširnije od ostalih.

Seizmologija, kao relativno mlada naučna oblast **geofizike**, proučava geološke i geofizičke procese koji dovode do nastanka zemljotresa, zatim strukturu zemljine kore i dublje zemljine unutrašnjosti, na osnovu karakteristika kretanja seizmičkih talasa kroz tu unutrašnjost, kao i destruktivne efekte dejstva seizmičkih talasa na objektima i tlu. Naziv **seizmologija** potiče od grčkih riječi *seismos* (σεισμος) – potres i *logos* (λογος) – nauka, dakle: nauka o zemljotresima.

Prvi kvalitetniji instrumenti za registrovanje seizmičkih talasa, nazvani **seizmografi**, konstruisani su tek oko 1879. godine. Međutim, prva naučna izučavanja zemljotresa kao prirodnog fenomena i njihovih efekata na tlu i objektima, obavljena su oko stotinu godina ranije.

Zemljotresi su se događali tokom čitave istorije formiranja i razvoja zemljine kore. S obzirom na katastrofalne posljedice razornih zemljotresa koje oni ostavljaju za sobom (ljudske žrtve i gubitak materijalnih dobara), fenomen nastanka zemljotresa uvek je predstavljao predmet proučavanja brojnih istraživača. Tokom posljednje tri decenije došlo je do vrlo intenzivnog razvoja veoma kvalitetnih instrumenata za registrovanje seizmičkih talasa prouzrokovanih zemljotresom, opažanje fizičkih fenomena vezanih za fazu njihove pripreme, kao i metoda za analizu i obradu tih podataka. Time su stvoreni neophodni preuslovi za kvalitetnije proučavanje fenomena zemljotresa uopšte.

Takođe, poslednjih nekoliko decenija ulazu se veliki istraživački napor u seizmološkim institucijama većeg broja država, u cilju utvrđivanja pouzdanih metoda za **kratkoročnu prognozu** mesta i vremena događanja, kao i intenziteta budućih velikih zemljotresa. Preciznost ovih prognoza trebalo bi da se izražava satima i danima. Do sada su postignuti samo početni, ohrabrujući rezultati koji ipak trasiraju dalji put istraživanja ká jednom od konačnih i suštinskih ciljeva Seizmologije kao nauke – ka pouzdanoj kratkoročnoj prognozi zemljotresa.

Prva instrumentalna registrovanja zemljotresa na području zapadnog Balkana, izvršena su još 1882. godine, kada je u Zagrebačkoj meteorološkoj opservatoriji instaliran jedan mehanički seismograf. Nešto kasnije, 1904. godine, počela su instrumentalna seizmološka osmatranja u Sarajevu, a odmah zatim (1906. godine) u Beogradu, kao i u drugim gradovima (Skoplju, Ljubljani, Cerknici, Banja Luci, Titogradu i dr.).

Od najznačajnijih seismologa na području bivše Jugoslavije, posebno mjesto zauzima prof. Dr Andrija Mohorovičić (1857. - 1936.) koji je, proučavajući hodohrone² serije Zagrebačkih zemljotresa iz perioda 1904. - 1909. godine, prvi uspio da identifikuje i kvantitativno utvrdi prostorni položaj i realnu dubinu donje granice Zemljine kore, kao i da definiše prve hodohrone seizmičkih talasa bliskih zemljotresa. Na taj način Andrija Mohorovičić je praktično otvorio novo poglavlje u Seizmologiji - proučavanje unutrašnjosti Zemlje na bazi seizmoloških podataka. Po ovom velikanu Seizmologije, donja granica Zemljine kore je internacionalno nazvana

¹ Seizmički sigurnog planiranja.

² Hodohrona je grafik zavisnosti vremena kretanja seizmičkog talasa u funkciji rastojanja tačke posmatranja od epicentra.

Mohorovičićev diskontinuitet ili (u inostranstvu) kratko – **Moho**. Takođe, kao naučnika koji zauzima istaknuto mesto u seizmologiji bivše Jugoslavije, pa i šire, treba istaći prof. Jelenka Mihajlovića, koji je ostvario poseban doprinos u studioznom izučavanju sezmičnosti mnogobrojnih seizmogenih zona Balkana.

Podaci o brojnim katastrofalnim zemljotresima u Svijetu, sežu u daleku prošlost. Broj žrtava koje su tokom istorije odnijeli razorni i katastrofalni zemljotresi, najveći je u poređenju sa svim drugim prirodnim stihijama. Samo u Kini, u tri katastrofalna zemljotresa u periodu između 1920. i 1976. godine utvrđeni broj žrtava premašio je cifru od 650.000, a procjene se kreću i preko jedan milion (provincija Xining 1927., Tangshan 1976. i Gansu 1920.), dok se ukupan broj žrtava tokom prethodnih 100 godina u Svijetu procjenjuje na više od dva miliona.

Od destruktivnih zemljotresa na prostoru bivše (SFR) Jugoslavije, pomenimo samo nekoliko, još uvijek vremenski bliskih: u Skoplju 1963. godine, sa 1.070 žrtava, Banja Luci 1969., Crnogorskom primorju 1979. sa 136 žrtava (101 žrtva u Crnoj Gori i 35 u Albaniji) i na Kopaoniku 1980. godine.

Veliki doprinos unapređenju seizmološke nauke na području balkanskog regiona ostvaren je kroz dva naučna projekta Ujedinjenih nacija, Programa za razvoj, koja su realizovana u poslednjih 30 godina. „*Proučavanje sezmičnosti balkanskog regiona*”, realizovan u periodu 1974. – 1976. i projekat „*Smanjenje sezmičkog rizika na Balkanu*”, koji je ostvaren u periodu 1980. – 1986. godina, kada je u Crnoj Gori instalirana savremena mreža seizmoloških telemetrijskih stanica.

7.1. Nastanak zemljotresa

Zemljotres, kao prirodna stihija, često se identificira sa samom pojmom potresanja tla, odnosno oscilovanjem tla i svega što je na tom tlu. Međutim, sa naučnog aspekta, zemljotres predstavlja znatno kompleksniju prirodnu pojavu, čija se potpunija definicija ne može sažeti u jednoj rečenici. Zemljotres nastaje iznenadnim lomom u stijenskoj masi, pod dejstvom napona stvorenim tektonskim pritiscima, koji su nastali u geodinamičkim procesima regiona. Lom stijene nastaje u momentu kada naponi prevaziđu fizičku čvrstoću stijene, pri čemu se značajan dio akumulirane energije u pritisku, osloboda u obliku neelastične deformacije – dislociranjem dva stvorena bloka rasjeda a ostatak energije se emituje u okolini prostora u obliku elastične deformacije stijena, odnosno seizmičkih talasa. Seizmički talasi prožimaju cijelu zemljinu unutrašnjost, šireći se od nukleusa zemljotresa – tačke koja se naziva **hipocentrom**, odnosno tačkom začetka loma stijene (slika 100). Veličina rasjeda koji nastaje u ovom tektonском procesu diktira snagu stvorenog zemljotresa, odnosno veličinu mehaničke energije koja će biti emitovana iz hipocentra. Dužina stvorenih rasjeda kod vrlo snažnih i razornih zemljotresa dostiže dimenzije od više desetina kilometara, a veličina dislociranja blokova rasjeda može dostići dimenzije od nekoliko metara.

Da bi se ovaj kompleksni fenomen bolje i potpunije razumio, neophodno je proučiti osnovne **vrste** i **tipove** zemljotresa i shvatiti procese njihove **pripreme** i **geneze**.

Vrste i tipovi zemljotresa

Prema načinu nastanka, razlikujemo dvije osnovne vrste zemljotresa: **prirodne** i **vještačke**. Od **prirodnih** zemljotresa izdvajamo tri tipa ili podvrste:

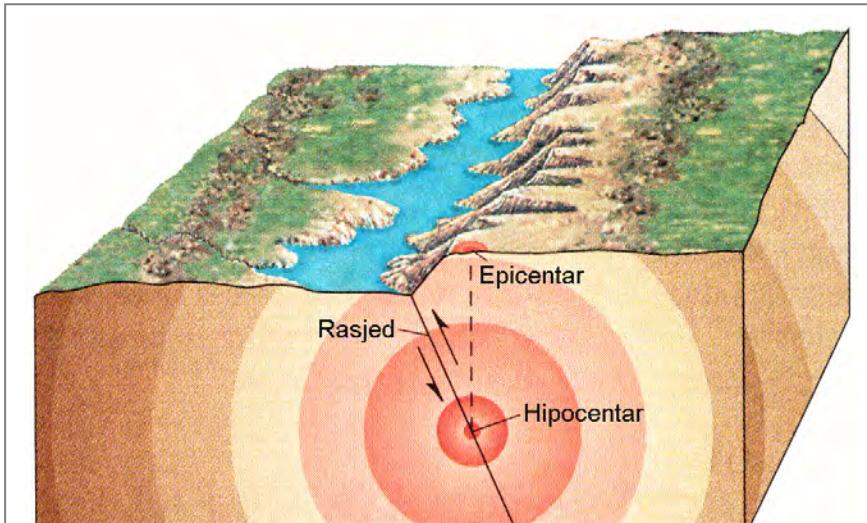
- **TEKTONSKI** zemljotresi predstavljaju najznačajniju i apsolutno dominantnu vrstu zemljotresa (posebno na prostoru Balkana), kako po broju, tako i po snazi. Ovi zemljotresi, kao što smo upravo konstatovali, nastaju u procesu naglog loma stijenske mase, pod dejstvom

velikih pritisaka u stijenama, koji su obično dugotrajno akumulirani u široj zoni **žarišta** zemljotresa (slika 100). Pod žarištem zemljotresa podrazumijevamo mjesto (tačku) maksimalne koncentracije naponu u stijenama, neposredno prije njenog loma, odnosno njenog rasijedanja - dakle mjesto na kojem započinje taj lom. Žarište zemljotresa se često naziva i **hipocentar ili fokus**, a njegova vertikalna projekcija na Zemljinu površ je **epicentar**, koja je zapravo tačka u kojoj će biti najsnažnije manifestovano dejstvo zemljotresa na objektima na zemljinoj površi.

- **VULKANSKI** zemljotresi se stvaraju u vulkanskim zonama, kao posljedica mehaničkog dejstva magme u njenom kretanju kroz vulkanske kanale, kao i pri samoj erupciji vulkana. Na prostoru centralnog Balkana, danas nema aktivnih vulkana, pa ni ove vrste zemljotresa. Međutim, u zoni Vezuva u Italiji, Etne na Siciliji i na mnogim drugim djelovima Zemlje, kao što smo naveli u odjeljku o Geologiji, ovakvi zemljotresi su vrlo česta pojava.
- **URVINSKI** zemljotresi nastaju zarušavanjem podzemnih kaverni i pećina u stijenskim masama površinskih djelova Zemljine kore, koji su izloženi erozionim procesima podzemnih voda. Karakteristični su za kraške terene.

Kao što smo već pomenuli, u procesu nastanka zemljotresa, vrši se transformisanje mehaničkog rada u seizmičku energiju ili energiju seizmičkih talasa, koji se zatim rasprostiru u svim pravcima kroz zemljinu koru i unutrašnjost, izazivajući odgovarajuće efekte, a često i raza-ranja na vještačkim objektima i deformisanje prirodnih terenskih oblika.

Pored eksplozija, najčešći vještački zemljotresi nastaju kao posljedica čovjekovog dejstva na prirodu. Tako se, na primjer, u zoni veštačkih akumulacionih jezera javljaju tzv. **indukovani** zemljotresi, kao posljedica promjene naponskog stanja na dnu i bokovima akumulacije, uslijed povećanja i učestale promjene hidrostatickog pritiska vodenog stuba na stijenske mase, ali i kao posljedica smanjenja mehaničke otpornosti stijene uslijed povećanja pornog pritiska vode u porama. Ova vrsta zemljotresa je znatno učestalija u početnoj fazi eksploatacije akumulacije, kao i u fazama njenog naglog pražnjenja i punjenja.



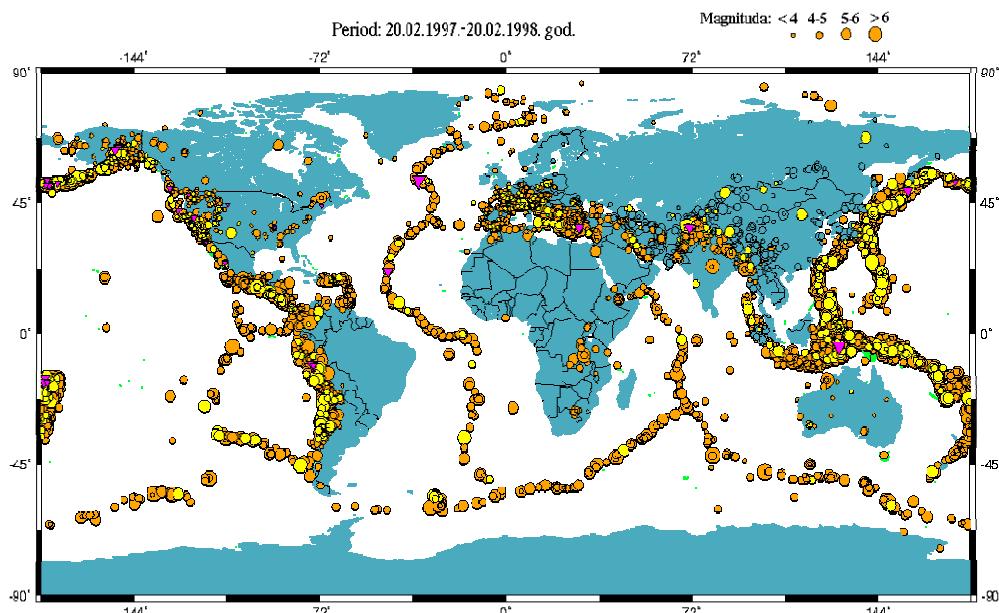
Slika 100. Nastanak tektonskog zemljotresa u procesu rasijedanja stijena, sa karakteristikama kretanja blokova rasjeda, stvorenih seizmičkih talasa i položaj hipocentra i epicentra.

U grupu vještačkih zemljotresa spadaju i zemljotresi nastali tzv. **gorskim udarom**, pretežno u starim rudnicima uglja, kao i drugim podzemnim kopovima uslijed njihovog zarušavanja, kao i manji zemljotresi stvoreni u procesu kliženja tla i odronjavanja stijena u usjecima puteva i sl.

Globalne seizmotektonске karakteristike i seizmogena područja na Zemlji

Analaizom prostornog rasporeda seizmičke aktivnosti, lako se zapaža da su epicentri zemljotresa locirani najvećim dijelom u relativno uskim pojasevima na Zemlji, od kojih su posebno značajni Tihookeanski pojasi sa brojnim ograncima i Mediteranski, odnosno trans-azijski (slika 100a).

Tihookeanski pojasi prostire se duž čitave zapadne obale južne i severne Amerike, zatim preko Aljaske – do Kamčatke, a zatim na jug – preko japanskih ostrva do Filipina i Novog Zelanda.

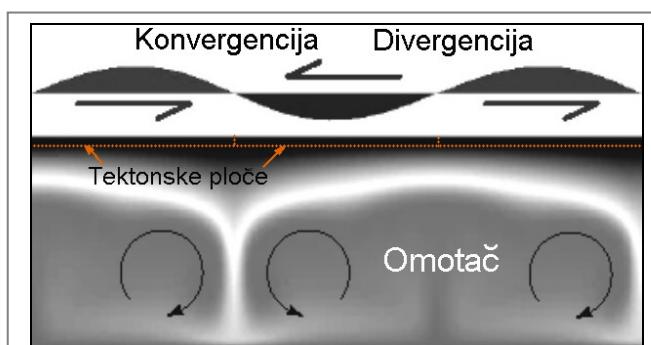


Slika 100a. Distribucija jačih zemljotresa dogođenih tokom jednogodišnjeg perioda na cijeloj Zemlji.

Pojas Mediterana, odnosno krajnji zapadni dio trans-azijskog pojasa, obuhvata zemljotrese dogođene u širem području Mediterana (posebno je izražen pojasi u njegovom sjevernom dijelu – od Španije, preko južne Francuske, Italije, Slovenije, Hrvatske, Bosne i Hercegovine, Srbije i Crne Gore, Albanije i Grčke, do Turske i Crnog Mora) zatim u regionu Bliskog istoka i dalje – preko Indije i Pamira – do Dalekog istoka.

O hipotezi globalne tektonike ploča, koja objašnjava porijeklo osnovnih geodinamičkih procesa na Zemlji, govorili smo dovoljno detaljno u poglavlju o zemljinoj unutrašnjosti, kada smo glavne tektonske ploče prikazali na slici 36.

Za objašnjenje samog pokretačkog mehanizma tektonskih ploča, odnosno za tumačenje porijekla globalnih geodinamičkih sila koje ostvaruju kretanje ploča po viskoznom sloju magme, razvijena je hipoteza **termodinamičke konvekcije**⁽³⁾ koja se odvija u debelom omotaču



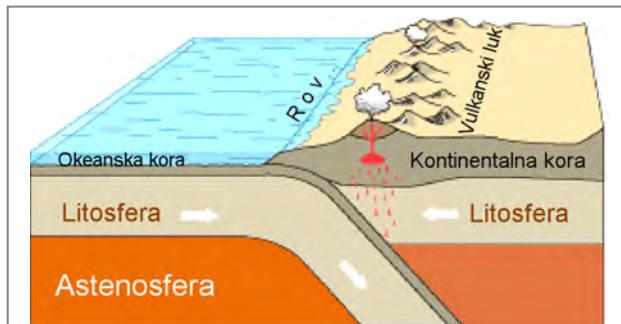
Slika 101. Šematski prikaz termodinamičkih procesa u konvekcionim ćelijama u Zemljiniom omotaču i procesi sučeljavanja i subdukcije tektonskih ploča.

⁽³⁾ Ova hipoteza je još u fazi intenzivnog matematičkog ispitivanja i dokazivanja metodom numeričkog modelovanja. Zbog obilja neriješenih problema sa kojima se suočava (npr. postojanje tzv. faznih barijera na 410 i 670 km dubine, koje limitiraju, ili čak sprečavaju konvekcioni tok magme velikih razmjera, zatim nesaglasnost distribucije uočenih hladnijih i toplijih zona u magmi sa evidentnim tektonskim procesima identifikovanih metodom **seizmičke tomografije** i sl.), ova hipoteza se još uvek može smatrati nedokazanom. Termin **seizmička tomografija** obuhvata numerički metod simultane inverzije podataka o većem broju zemljotresa registrovanih na velikom broju seizmoloških stanica, u 1D, 2D ili 3D seizmički model zemljine unutrašnjosti. Problem je numerički vrlo kompleksan, pošto pri postavci problema nisu poznati ni parametri hipocentara niti građa zemljine unutrašnjosti. Pri numeričkoj inverziji, seizmički model unutrašnjosti se diferencira u veći broj blokova za koji se određuju brzine prostiranja seizmičkih talasa. Iсти postupak se koristi kod savremenih reflektivnih i refrakcionih seizmičkih ispitivanja, uz primjenu kontrolisanih izvora seizmičke energije i geofona kao prijemnika. U ovom slučaju parametri seizmičkog modela sredine su jedine nepoznanice sistema, pošto su parametri, u ovom slučaju vještačkih izvora talasa, poznati.

zemljinog jezgra. Naime, po ovoj hipotezi, kretanje ploča je uslovljeno termodinamičkim procesima u zemljinom omotaču, odnosno sfernem sloju magme koji zaliže ispod donje granice litosfere i zahvata zonu do dubine od 2.900 km. Po hipotezi, termodinamički kovekcioni tokovi u omotaču nastaju u takozvanim ***konvekcionim čelijama*** u kojim se vrši kretanje relativno toplije magme (kao lakše) iz dubljih ká pličim djelovima omotača, uz istovremeno poniranje relativno hladnije magme (kao teže) iz pličih - u dublje djelove omotača (slika 101). U zoni kontakta magme u njenom horizontalnom kretanju - sa donjim djelovima litosfere, uslijed trenja, nastaje pomicanje blokova, odnosno lagano horizontalno kretanje ploča Zemljine kore.

Postoji nekoliko drugih hipoteza o uzročnicima globalnih geodinamičkih procesa, kao što su ***hipoteza ekspanzije Zemlje***, zatim ***njenog skupljanja (kontrakcije), pulsiranja*** i dr. Međutim, za sada jedina kvalitetna alternativna hipoteza, koja je tek u fazi verifikacije, bazirana je na ideji o geofizičkom fenomenu vezanom za globalno gravitaciono dejstvo velikih anomalnih masa visoke gustine, čije prisustvo je evidentno u tranzitnoj zoni na dubini od oko 670 km, a čije tumačenje ipak izlazi iz okvira ovog kursa.

Ponovimo radi podsjećanja, da u slučajevima međusobnog primicanja (konvergencije) dvije susjedne tektonske ploče, nastaje njihovo sučeljavanje (kolizija), kao što je to prikazano na slici 102. U stijenama kontaktne zone nastaju visoki bočni pritisici, pri čemu se akumuliraju naponi u stijenskim masama zemljine kore. Kada naponi dostignu gornju granicu mehaničke čvrstoće stijene, dolazi do njenog pucanja duž najslabijih zona i pri tome nastaju tektonske forme, poznate kao ***rasjed***, ili drugi geološki oblici. Kao što smo već pomenuli, u ovom tektonskom procesu vrši se naglo oslobođanje akumulirane mehaničke energije u obliku seizmičkih talasa, odnosno ***nastaje zemljotres***. Takođe, kao produkt ovakvih tektonskih procesa, u široj zoni sučeljavanja ploča, kumulativnim dejstvom ovakvih dugotrajnih procesa - nastaje regionalno ubiranje stijenskih masa, odnosno formiranje vjenačnih planina (stvaraju se orogeni procesi), a tipičan primer takve pojave je cijela zona spoljašnjih i unutrašnjih Dinarida. Naime, Dinaridi, Helenidi, Apenini, Karpati, kao i drugi orogeni pojasevi u sjevernom obodu Mediterana, nastali su kao posljedica prenošenja bočnih pritisaka iz zone Mediterana (preko apuljske platforme) na sjeverni obod Mediterana, uslijed laganog kretanja Afričke ploče ká sjeveru i sjeverozapadu (slika 37) i istovremeno, translacionim kretanjem evro-azijske ploče u suprotnom smjeru – ká jugoistoku, približno istim brzinama od oko 7 milimetara na godišnjem nivou (ovaj proces i dalje traje).



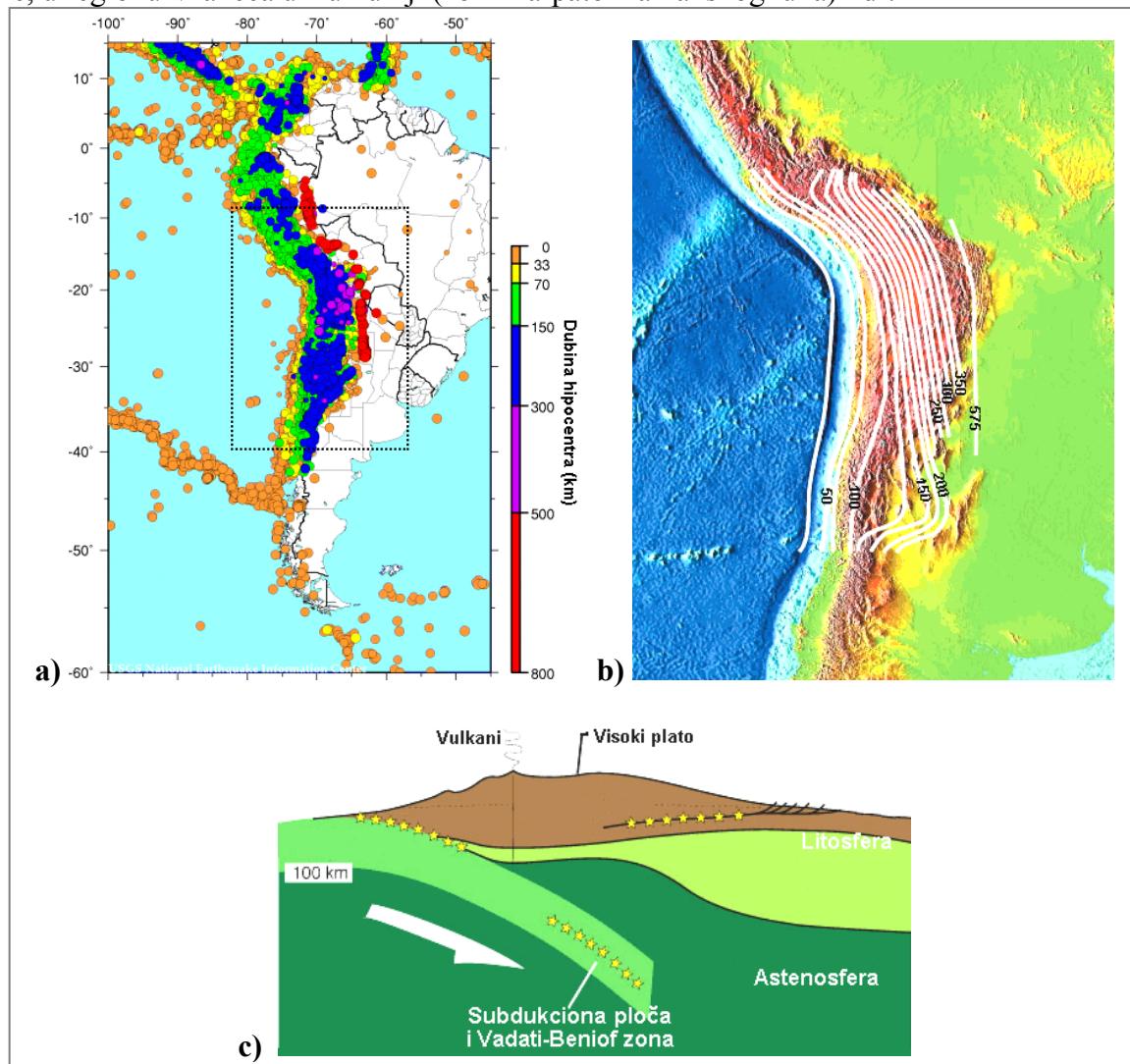
Slika 102. Konvergentno kretanje tektonskih ploča litosfere i rezultujući efekti - formiranje tektonskog rova i subdukcionog procesa u zonama njihove kolizije.

Kao što smo već navodili u poglavljju o unutrašnjoj građi naše planete, najčešće u zonama sučeljavanja tankih oceanskih kora i relativno debelih kontinentalnih ploča, dolazi do podvlačenja djelova oceanske kore pod kontinentalni dio zemljine kore, što se naziva subdukcijom (slika 102). U ovim slučajevima dio kore koji subdukuje pod kontinent, tone do određene dubine – do donje granice tranzitne zone – oko 670 km, postižući maksimalne dubine od oko 700 km. Na tim dubinama subdukovana ploča biva mehanički i termički degradirana i/ili istopljena u magmi. Jedan tipičan primjer subdukcije u oblasti južne Amerike, prikazan je na slici 103, gdje je subdukovana ploča istočnog dijela Tihog Okeana prodrla do dubine od blizu 600 kilometara (slika 103b).

Pošto su ovi procesi praćeni mehaničkim razaranjem stijena u dijelu kore koji vrši subdukciju, to se u ovakvim slučajevima stvaraju (i registriraju) zemljotresi. Analizom prostornog položaja

hipocentara tih zemljotresa jasno se može pratiti opisani proces. Zona koncentracije hypocentara u okviru subdukcione ploče naziva se **Vadati-Benioff zonom** (Wadati-Beonioff) ili kratko - **zona Beniofa** (slika 103c).

Zone subdukcije su najizraženije u regionu zapadnog dijela južne Amerike, Novog Zelanda, japanskih ostrva, ali i na mnogim drugim mestima, kao što je Egejsko more, zatim Tirensko more, u regionu Vrančea u Rumuniji (zoni Karpato-Balkanskog luka) i dr.



Slika 103. Subdukcionalni proces u južnoj Americi: a) položaj hipocentara zemljotresa različite dubine, b) izoloni dubine Vadati-Benioff zone i c) šema vertikalnog presjeka kroz centralni dio ove subdukcione ploče sa indikacijom Vadati-Benioff zone.

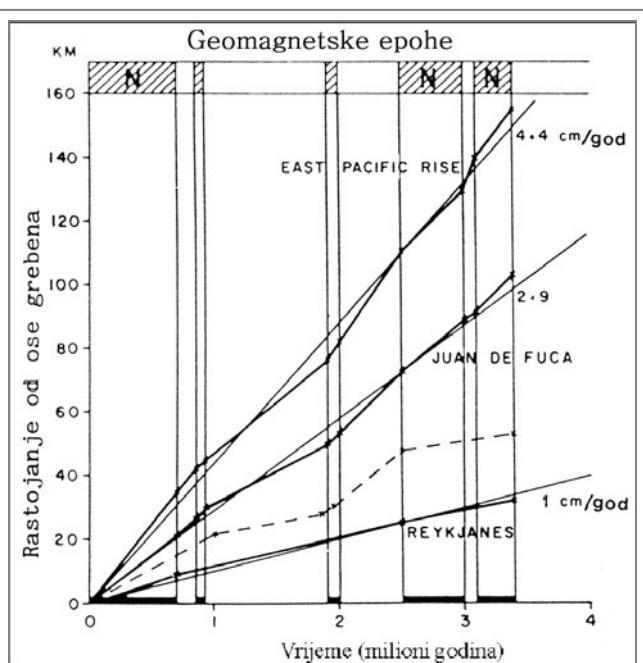
Kao što smo takođe pominjali, u slučajevima kada se vrši međusobno **razmicanje** tektonskih ploča, što se obično dešava u okeanim, tada duž formirane pukotine između dva bloka stijena okeanskog dna, dolazi do izbijanja magme. Magma se u kontaktu sa vodom naglo hlađi i formira bazaltnu koru, popunjavajući nastalu prazninu u kori – do sljedećeg pucanja, odnosno razmicanja blokova. I ovi procesi su praćeni stvaranjem zemljotresa, čijim se registrovanjem opisani procesi mogu posredno proučavati. Snaga ovih zemljotresa znatno je manja od onih koji se dešavaju u zonama kolizije tektonskih ploča.

Teorija globalne tektonike ploča stalno se potvrđuje novim dokazima u svojoj osnovnoj postavci. Tako, na primjer, pored rezultata paleomagnetskih ispitivanja okeanskog dna, u prilog ispravnosti ove teorije je i izrazita sličnost u sastavu i starosti stijena na susjednim rubovima kontinenata. Savremena satelitska osmatranja omogućuju kontinualna i precizna kvantitativna

mjerena kretanja kontinenata, tako da se danas putem posebnih telekomunikacionih (GPS⁴) satelita sa milimetarskom tačnošću i u apsolutnom iznosu, kontinualno prati pomjeranje velikog broja segmenata tektonskih ploča.

Brzina pomjeranja pojedinih tektonskih ploča je vrlo različita i iznosi do 12 cm na godinu. Kao što smo već naveli, afrička ploča lagano klizi u pravcu sjever-sjeverozapad brzinom od oko 7 mm/godinu, dok se na primjer, filipinska i japanska ploča kreću brzinama od oko 9 cm/godinu ka zapadu, i tako dalje. Na slici 104. prikazan je dijagram brzine kretanja tri tektonske ploče u zoni Tihog Okeana tokom prethodnih 4 miliona godina.

Na osnovu paleomagnetskih i drugih vrsta geofizičkih ispitivanja, kao i seizmoloških proučavanja, utvrđeno je da su neki djelovi Zemljine kore transportovani i više hiljada kilometara. Takav je slučaj i sa cijelom Afrikom, Indijom i Australijom.



Slika 104. – Dijagram brzine kretanja za tri tektonske ploče u Tihom Okeanu, na osnovu rezultata paleomagnetskih ispitivanja, sa naznakom tipa geomagnetske epohe u vrhu slike (“N” indicira normalnu epohu, u kojoj je magnetsko polje Zemlje po polaritetu istovjetno sa današnjim).

Mehanizam nastanka tektonskih zemljotresa

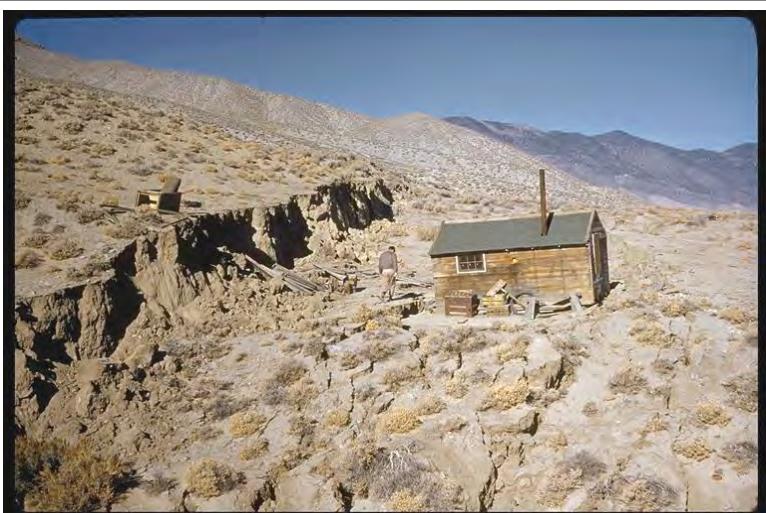
Pošto su proces i mehanizam nastanka vulkanskih i urvinskih zemljotresa dovoljno razumljivi iz izlaganja u okviru poglavlja o vrsti i tipovima zemljotresa, ovdje ćemo detaljnije obraditi samo mehanizam nastanka tektonskih zemljotresa.

U prethodnom poglavlju naglasili smo da su neposredni uzročnici procesa koji dovode do nastanka tektonskih zemljotresa – kretanje tektonskih ploča zemljine kore. Ovdje ćemo, bez ulazeњa u teorijska razmatranja kompleksnih matematičkih formulacija elastičnih i plastičnih deformacija u fazi pripreme i stvaranja diskontinuiteta u stijenskim masama, samo ukratko opisati procese koji nastaju u zoni žarišta tokom pripreme zemljotresa, njegovog nastanka i postzemljotresnoj fazi.

Bočni pritisci u zemljinoj kori, stvoreni uslijed kretanja tektonskih ploča, kao što smo opisali, koncentrišu se u vidu napona u stijenama - duž linija sučeljavanja ploča i u neposrednoj okolini. Pošto tektonske ploče u kretanju predstavljaju ogromne mase stijena, sa zapreminom reda veličine miliona kubnih kilometara, to je i njihova kinetička energija ogromna, bez obzira na relativno malu brzinu tog kretanja, za koju smo vidjeli da je reda veličine centimetra na godinu. Pri sučeljavanju dvije tektonske ploče, vrši se transformisanje njihove kinetičke energije u mehaničku energiju, koja se preko pritisaka koncentriše u stijenama zone sučeljavanja. Akumuliranje pritisaka (i njihovih posljedica – napona) u stijenama obavljaće se do momenta kada ovi naponi dostignu granicu mehaničke čvrstoće stjene. Tada, duž površi maksimalne koncentracije napona, nastaje mehanički lom stijene, formiranje rasjeda i dislociranje stijenskih masa duž rasjedne ravni. Na taj način se postiže naponsko rasterećenje stijena i privremeno se uspostavlja novo stabilno stanje, a stijena je zatim sposobna da akumulira nove napone.

⁽⁴⁾ GPS – globalni pozicioni sistem satelita (postoje tri nezavisna sistema: Američki, Ruski i Kineski) čijim korišćenjem je moguće utvrditi apsolutne vrijednosti svih prostornih koordinata tačke na Zemlji, sa maksimalnom tačnošću od blizu 1 milimetar.

U zavisnosti od karakteristika kretanja tektonskih ploča u zoni sučeljavanja, tj. u zavi-snosti od odnosa pravaca vektora kretanja ploča, kao i od debljine sučeljenih ploča – mogu se javiti različite forme rasijedanja stijenskih masa, o čemu smo dovoljno detaljno govorili u poglavlju o Geo-logiji. Na slici 105 prikazan je jedan tipičan realni primjer normalnog rasijedanja, nasta-log u snažnom zemljotresu koji se dogodio 1964. godine u Nevadi (SAD), pri čemu je kretanje krila rasjeda (vertikalna denivelacija) bilo veće od 2 metra.



Slika 105. Primjer tipičnog “normalnog” tektonskog rasjeda koji je nastao u zemljotresu u Nevadi (SAD) 1964. godine.

Sam proces rasijedanja obično traje samo nekoliko sekundi, pošto je brzina rasijedanja najčešće u granicama 2 - 4 km/s, što je sporije od brzine primarnih (longitudinalnih⁽⁵⁾) seizmičkih talasa u zemljinoj kori (tabela 9). Ovo znači da će prvi nailasci longitudinalnih seizmičkih talasa na seismološku stanicu (bez obzira na njen položaj) biti posljedica započinjanja procesa rasijedanja. Drugim riječima, prva longitudinalna faza seizmičkih talasa na **seizmogramima**, sadrži podatke o karakteristikama naponskog stanja u trenutku prvog loma stijena u žarištu zemljotresa, pa se taj podatak sa većeg broja seismoloških stanica, koristi za utvrđivanje parametara mehanizma žarišta u kojem je generisan zemljotres.

Opisani proces akumuliranja napona u zoni budućeg žarišta zemljotresa, ili kako se još naziva proces **pripreme glavnog zemljotresa**, često je praćen stvaranjem manjih zemljotresa koji nastaju uslijed čestog prisustva lokalnih nehomogenosti u strukturi stijene u zoni žarišta, pri čemu nastaju manji lomovi i dislokacije. Dakle, u zoni pripreme zemljotresa gotovo redovno se događa i niz tzv. **prethodnih zemljotresa** (ili for-shock /for-šok/ u anglosaksonskoj literaturi) sa znatno manjim intenzitetom u poređenju sa glavnim zemljotresom.

Takođe, odmah nakon pojave glavnog zemljotresa, u fazi konsolidovanja stijenskih masa i uspostavljanja novog stabilnog stanja u zoni žarišta, počinje da se odvija čitav proces događanja serije manjih **naknadnih zemljotresa** (ili engl. after-shock /after-šok/).

Empirijski je utvrđeno da je stepen prethodne i naknadne aktivnosti, ako se izrazi preko zbiru ukupnog broja i intenziteta tako dogođenih zemljotresa, približno proporcionalan jačini glavnog zemljotresa. Tako, na primjer, katastrofalni zemljotresi velikog intenziteta, obično su praćeni prethodnom i naknadnom aktivnošću koje traju i više od jedne godine.

Napomenimo, najzad da je u seimološkoj praksi često osmotrena i pojava tzv. **migracije** epicentara zemljotresa u regionu, posebno u sekvenci koja slijedi nakon događanja vrlo snažnih

⁽⁵⁾Longitudinalni seizmički talasi predstavljaju elastičnu deformaciju sredine (tla) koja se ostvaruje oscilovanjem čestica sredine prenosnika talasa - u pravcu kretanja seizmičkog talasa (naizmjeničnim sabijanjem i rastezanjem sredine). Ovi talasi se nazivaju i primarnim (i kratko označavaju sa "P") (zbog najveće brzine kretanja) ili uzdužnim talasima. Longitudinalni talasi se prostiru kroz čvrste, tečne i gasovite sredine. **Transverzalni sreizmički talasi** nastaju oscilovanjem mikročestica tla dominantno u pravcu upravnom na pravac kretanja talasa. Oni su manje brzine od longitudinalnih (za oko 73 %) i ne prostiru se kroz tečnosti i gasove. Nazivaju se i sekundarni talasi (kratko se označavaju sa "S").

zemljotresa. U tim slučajevima, distribucija epicentara tokom vremena realizacije serije naknadnih zemljotresa, zahvata široki prostor (i po nekoliko hiljada kvadratnih kilometara). Tipičan primjer takve seobe epicentara registrovan je i kod Crnogorskog zemljotresa od 15. aprila 1979. godine sa magnitudom 7,0. Tom prilikom, u toku nešto više od jedne godine, koliko je trajala after-šok sekvenca, bio je seizmički veoma aktivan čitav prostor od Herceg Novog do Ulcinja i približno od lokacije glavnog zemljotresa (na oko 15 km od obale u podmorju Jadrana) pa do Skadarskog jezera i Cetinja. U tom regionu u okviru te sekvene, registrovano je više hiljada naknadnih zemljotresa, od kojih je iznad magnitude 4 bilo oko 100.

Prekursori zemljotresa i mogućnost njihovog prognoziranja

Većina jakih zemljotresa je praćena prethodnim manifestovanjem specifičnih prirodnih fizičkih fenomena, tzv. **prekursora zemljotresa**. Ovi fenomeni se izražavaju neposredno prije pojave glavnog (najjačeg zemljotresa) u seriji – obično nekoliko sati, ali i znatno ranije – nekoliko dana, pa i mjeseci.

Prekursori zemljotresa su obično najizrazitiji u epicentralnoj oblasti glavnog zemljotresa, ali nekad i na znatno većim rastojanjima od žarišta zemljotresa u fazi njegove pripreme.

Sam proces pripreme zemljotresa traje dosta dugo, a zavisi od jačine zemljotresa koji će biti generisan. Tako na primjer, zemljotres sa magnitudom 7 biće praćen pojmom raznih fenomena, odnosno predznaka zemljotresa u periodu od par godina prije njegovog događanja. Istovremeno, prateći fenomeni su, kao sto smo već naglasili, veoma brojni, ali se, na žalost, ne manifestuju po nekom standardnom obrascu. Naime, izvjesni fenomeni u nekim slučajevima su vrlo naglašeni, dok su u drugim njihove pojave minorne ili sasvim izostaju. Ovakvo ponašanje prekursora jakih zemljotresa obavezuje istraživače da istovremeno osmatraju što veći broj takvih fenomena i da iz njihove manifestacije tokom vremena, pokušaju da izvedu kratkoročnu prognozu sljedećeg jakog zemljotresa u regionu.

Razlozi manifestacije raznih geofizičkih i geoloških fenomena u fazi pripreme zemljotresa vezani su za proces akumuliranja naponskog polja, najčešće kao posljedice bočnih tektonskih pritisaka u zemljinoj kori.

Od brojnih prekursora zemljotresa, pomenimo samo one najznačajnije i najčešće osmotrene u praksi:

- *Promjena brzine seizmičkih talasa u zemljinoj kori, zbog izmjene gustine stijenskih masa - uslijed promjene unutrašnje strukture stijena pod pritiskom,*
- *Smanjenje električne otpornosti tla - zbog pojave mikropukotina u stijenama, promjene poroznosti tla, sadržaja vode i sl.,*
- *Fluktuacija gravitacionog i geomagnetskog polja u regionu - zbog promjene gustine stijena i drugih fizičkih svojstava u fazi pripreme zemljotresa,*
- *Pojava "rojeva" manjih i većih zemljotresa u periodu od nekoliko dana prije glavnog zemljotresa,*
- *Emisija elektromagnetskih zračenja u širokom dijapazonu frekvencija u široj zoni žarišta budućeg velikog zemljotresa,*
- *Pojava impulsivnih tokova podzemnih (telurskih) električnih struja u tlu,*
- *Pojava spontanog nanelektrisanja i pražnjenja elektriciteta iz tla u obliku svjetlosnog isijavanja (vidljivog tokom noći),*
- *Povećana emanacija gasa radona iz tla i vode,*
- *Nagle promjene nivoa podzemne vode (oscilovanje vode u bunarima, promjena izdašnosti izvora i sl.),*

- Lagano izdizanje ili spuštanje djelova tla u zoni budućeg rasjeda (epicentralno područje), male promjene nagiba terena,
- Termičke anomalije zemljine kore na površinama većih razmjera, registrovane uporednim satelitskim osmatranjem itd.
-

Sve pomenute prekursore zemljotresa možemo svrstati u dvije osnovne grupe: **seizmički fenomeni i fenomeni promjene fizičkih polja** (geofizički i geološki).

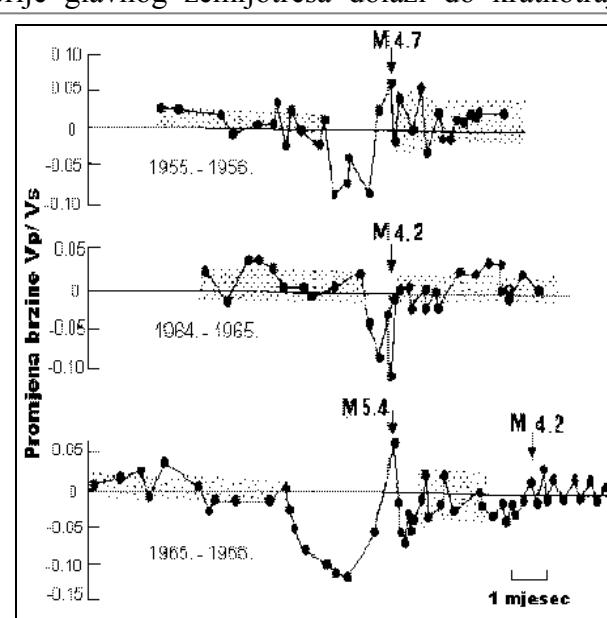
Od **seizmičkih** prekursora uočeno je nekoliko različitih tipova, od kojih ćemo navesti samo dva najznačajnija:

- Kao indikator snažnih zemljotresa, gotovo redovno, javlja se čitav "roj" slabijih zemljotresa, čija učestanost raste sa približavanjem trenutka nastanka glavnog zemljotresa. Često je karakteristično da neposredno prije glavnog zemljotresa dolazi do kratkotrajnog "zatišja", odnosno odsustovanja slabijih zemljotresa, nakon čega slijedi glavni zemljotres. Odmah zatim, redovno se razvija novi "roj" slabijih zemljotresa, čija su učestanost, vrijeme trajanja aktivnosti i veličine magnituda naknadnih zemljotresa, direktno proporcionalni jačini glavnog zemljotresa.
- Drugi oblik seizmičkih prekursora javlja se u vidu **promjene brzine zapreminskih seizmičkih talasa**. Naime, u fazi pripreme velikih zemljotresa, u zoni akumuliranja napona u Zemljinoj kori, primjećeno je fluktuiranje odnosa brzine longitudinalnih i transverzalnih talasa koji dostiže izražen minimum neposredno prije pojave glavnog zemljotresa. Nakon toga, dolazi do naglog rasta ovog količnika, kada dostiže uobičajene vrijednosti za region. Ova pojava je rezultat promjene veličine Poasonovog (Poissonovog) koeficijenta elastičnosti stijene (σ) uslijed promjene naponskog stanja u zoni budućeg žarišta zemljotresa. Zbog tih promjena, mijenja se i odnos brzina longitudinalnih (V_p) i transverzalnih (V_s) talasa, pošto su na osnovu teorije elastičnosti ova tri parametra u sljedećoj međusobnoj vezi:

$$\frac{V_p}{V_s} = \left[2 \frac{1-\sigma}{1-2\sigma} \right]^{1/2}$$

Za slučaj idealno elastičnih čvrstih stijenskih masa, $\sigma = 0,25$, pa gornji odnos ima vrijednost $V_p/V_s \approx 1,73$. Međutim, u prirodi ovaj količnik redovno ima nešto veće vrijednosti: 1,75 – 1,85.

Kao ilustraciju za ovaj tip fizičkog fenomena manifestovanog u fazi pripreme jačih zemljotresa, navedimo primjer promjene odnosa brzine longitudinalnih i transverzalnih seizmičkih talasa (V_p/V_s) u regionu Garm u Rusiji, koji je osmatran tokom tri perioda vremena. Na slici 106, koja prikazuje rezultate ovih analiza, prikazani su momenti pojave snažnih zemljotresa u regionu (iznad magnitudo 4.2). Uočljivo je na slici da je nekoliko mjeseci prije pojave indiciranih jakih zemljotresa, nastupio period smanjenja posmatranog

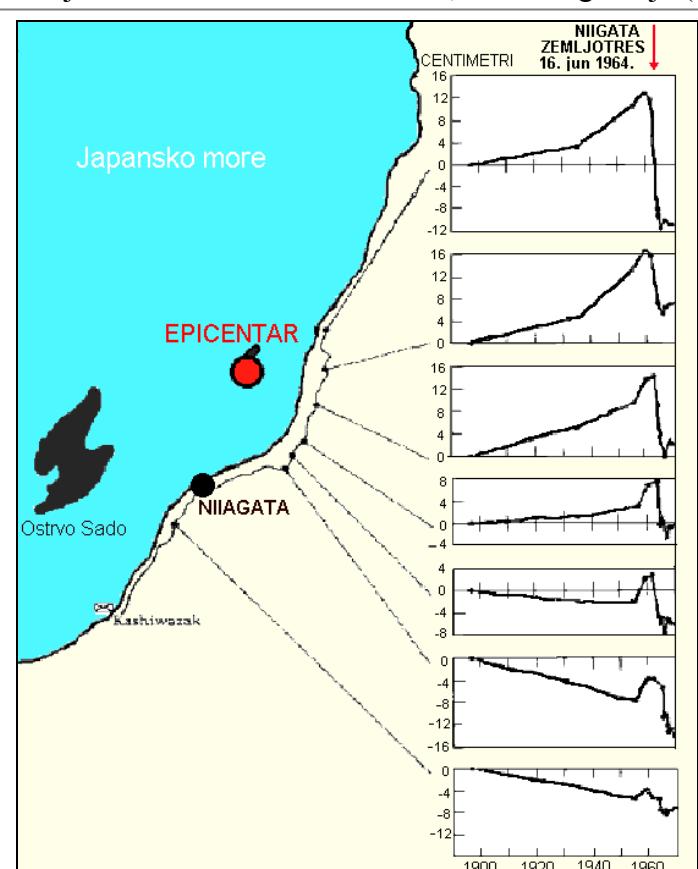


Slika 106. Promjena odnosa brzine longitudinalnih i transverzalnih talasa (V_p/V_s) u fazi pripreme tri zemljotresa u regionu Garm (Rusija).

odnosa brzina seizmičkih talasa, da bi se praktično odmah nakon događanja zemljotresa, naponsko stanje stijenskih masa vratilo na pređašnji, normalni nivo.

Od **geofizičkih** prekursora, često se prije pojave snažnih zemljotresa registruju značajna variranja geomagnetskog i gravitacionog polja u širem regionu žarišta zemljotresa, što se, kao što je rečeno, takođe može tumačiti kao posljedica promjene naponskog stanja i gustine stijena uslijed velikih bočnih pritisaka i sabijanja stijenske mase.

- Mjerenjem karakteristika prirodnog električnog toka u tlu (telurske struje) između nepolarizirajućih elektroda (postavljenih obično na međusobnom rastojanju od 100-200 m) uočene su impulsivne promjene prirodnog električnog potencijala neposredno prije pojave većih zemljotresa. Utvrđeno je da ovaj fenomen nije samo lokalno manifestovan, već se registruje (sa manjim intenzitetom) i na većim rastojanjima od žarišta zemljotresa u fazi njegove pripreme. Višegodišnjim istraživanjem na nizu stanica posebne telemetrijske mreže u Grčkoj, prikupljen je veliki broj značajnih podataka o svojstvima ovog fenomena. Na osnovu tih rezultata sada se vrše pokušaji uspostavljanja odgovarajućih matematičkih modela, koji bi omogućili prognoziranje vremena, lokacije i veličine budućih snažnih zemljotresa.
- Intenzivna naprezanja stijena u zoni pripreme zemljotresa, često rezultiraju i emitovanjem elektromagnetskih talasa vrlo različitim talasnih dužina. U većem broju istraživačkih centara registrovano je više slučajeva snažnih emisija radio-talasa srednjetalasnog opsjega, na nekoliko časova prije pojave glavnog zemljotresa.
- Od glavnih prirodnih pojava vezanih za fenomen zemljotresa, možemo navesti česte slučajeve laganog pražnjenja statičkog elektriciteta iz tla, akumuliranog u procesu priprema najčešće vrlo snažnih zemljotresa. Tada se u prizemnim slojevima atmosfere javlja slaba svjetlost koja je vidljiva u toku noći. Ova pojava se tumači piezoelektričnim efektom u stijenama izloženim pritisku.
- Promjena naponskog stanja u stijenama u fazi pripreme zemljotresa, uslovjava i vrlo često uočenu pojavu povećane emanacije radona (i nekih drugih inertnih gasova) iz tla i vode u tlu.
- Oscilovanje nivoa podzemne vode, zatim promjena hemizma vode, fluktuacija izdašnosti izvora i druge pojave u režimu podzemnih voda, često su registrovani prekursori zemljotresa, koji su zapaženi i prije više stotina godina.



Slika 107. Primjer proučavanja pripreme jakog zemljotresa u Japanu osmatranjem vertikalnog pomjerenja (denivelacije) tla prije pojave velikog zemljotresa u Niigati, 1964. godine.

Svi navedeni prekursori zemljotresa, kao i mnogi drugi, pručavaju se u sprezi sa rezultatima vrlo preciznih kontinualnih mjerena efekata promjene napona u stijenama u zonama rasjeda, za koje se pretpostavlja da mogu biti generatori nekog budućeg snažnog zemljotresa.

Na slici 107 prikazan je primjer osmatranja vertikalnih pokreta tla duž zapadne obale Japana tokom 80 godina. Dijagrami na desnoj strani ove slike prikazuju izdizanje (pozitivno) i sruštanje tla (negativno) izraženo u centimetrima na različitim tačkama osmatranog dijela obale. U vrhu slike iznad prvog dijagrama strelicom je indiciran momenat pojave razornog zemljotresa u blizini grada Niigata 1964. godine. Položaj epice-ntra ovog zemljotresa je prikazan simbolom kruga na slici regiona. Većina prikazanih dijagrami jasno izražava trend laganog izdizanja tla do pojave zemljotresa, a zatim efekat naglog relaksiranja stijenskih masa.

Velika kompleksnost fenomena pri-preme i realizacije zemljotresa, nameće potrebu veoma složenog i multidisciplinarnog naučnog pristupa njegovom proučavanju, posebno u cilju njegove uspješne prognoze. Međutim, istovremeno, proces pripreme razornih i katastrofalnih zemljotresa uvijek je praćen obiljem informacija koje se manifestuju u domenu praktično svih geofizičkih polja, zatim pojavom raznih geoloških fenomena, i dr. Ove okolnosti takođe pružaju nadu i predstavljaju snažan motiv za pomno istraživanje mogućnosti pouzdane prognoze budućih snažnih zemljotresa. Ovom problematikom danas se u Svetu bave hiljade naučnika i dosadašnji uspjeh, koji je još uvijek skroman i sporadičan, međutim ipak, uliva nadu da će se uskoro definisati pouzdan metod za sigurno kratkoročno predviđanje pojave jakih zemljotresa.

Kada se govori o "prognozi zemljotresa" misli se na tzv. **kratkoročnu prognozu**, koja treba da izradi **vrijeme, mjesto i jačinu** (magnitudu) budućeg zemljotresa. Vrijeme ove pojave kod kratkoročne prognoze treba da bude definsano sa tačnošću reda veličine jednog dana. Kratkoročna prognoza još uvijek nije zaživjela u rutinskom obliku, ali se brojne seizmološke istraživačke institucije širom Svetog intenzivno bave ovom problematikom - još uvijek u eksperimentalnom obliku. Praktično jedini uspješno kratkoročno prognozirani katastrofalni zemljotres (po intenzitetu, ali ne i po efektima) do danas, je zemljotres u provinciji Hajčeng u Kini, koji se dogodio 4. februara 1975. godine, sa magnitudom 7,3 i površinskim intenzitetom IX-X stepeni MCS skale⁶. Tom prilikom, zahvaljujući uspješnoj i pravovremenoj prognozi ovog zemljotresa od strane kineskih stručnjaka, evakuacijom cijelog regiona, spašeno je preko 100.000 ljudskih života (po nekim izveštajima čak oko 400.000). Međutim, nažalost, već naredne godine (1976.) u susjednoj provinciji Tangšan, potpuno nenajavljenog dogodio se još razorniji zemljotres (sa magnitudom 7,6) i odnio preko 250.000 ljudskih života (po nekim izveštajima oko 600.000), što govori koliko je prognoza ovog fenomena istovremeno složen i odgovoran zadatak.

Pored kratkoročne, razlikujemo i tzv. **dugoročnu** i **srednjeročnu** prognozu zemljotresa. **Dugoročnom prognozom** se definiše potencijalna oblast i povratni period (statistički period ponovnog događanja) jačih, razornih i katastrofalnih zemljotresa u većem regionu. Ovaj oblik prognoze se najčešće izražava seizmološkim kartama koje prikazuju zone različitog stepena intenziteta zemljotresa, koji će se u **narednom periodu vremena** (obično od 50, 100 i više godina) dogoditi na tom prostoru, sa određenom dozom **vjerovatnoće realizacije** te prognoze (obično 70 %). Takve karte su pripremljene i za teritorije Crne Gore tokom 1986. godine.

Srednjeročna prognoza je vezana za manje teritorije - kao što su zone tektonskih rasjeda u kojima se očekuje pojava velikih zemljotresa, a vrijeme prognoziranog zemljotresa se izražava sa tačnošću reda veličine godine (ili decenije).

⁶ MCS je skraćenica za Merkali-Kankani-Zibergovu (Mercalli-Cancani-Sieberg) skalu intenzitea zemljotresa, sa 12 podeoka, o čemu će kasnije biti više detalja.

Kao što je već rečeno, sve vrste prognoze zemljotresa moraju biti rezultat kompleksnih multidisciplinarnih studija, pa je zato ova vrsta istraživanja vrlo skupa. Na širem području Balkana do sada nije finansiran praktično nijedan projekt usmjeren na prognozu zemljotresa, izuzimajući višegodišnji projekat "VAN" u Grčkoj, baziran na praćenju pojava telurskih struja u seizmogenim zonama. U Turskoj upravo započinje realizacija kompleksnog naučnog projekta nazvanog "ELECTRA", sa ciljem multidisciplinarnog posmatranja i izučavanja niza fizičkih fenomena - prekursora zemljotresa.

Da bi kratkoročna prognoza zemljotresa bila naučno utemeljena, neophodno je prethodno izvesti dugoročnu prognozu u širokoj oblasti, zatim izdvojiti potencijalno seizmički najopasniji region, utvrditi relevantne tektonske strukture kao kandidate za generisanje sljedećeg jakog zemljotresa i dalja, praktična, terenska istraživanja i osmatranja, usmjeriti na taj prostor.

7.2. Seismometrija

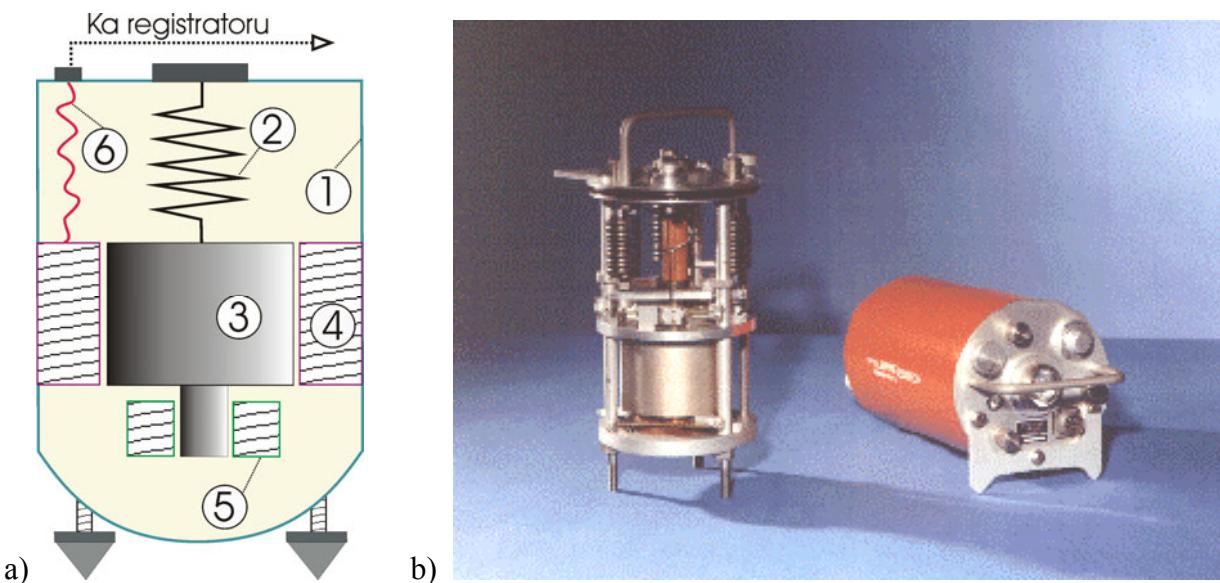
Prvi pokušaji registrovanja zemljotresa pomoću odgovarajuće aparature, sežu u daleku kinesku prošlost, kada se pomoću mehaničkih naprava tražio način za odgonetanje iskonske tajne prirode - zvane zemljotres. Kao što smo već pomenuli, konstrukcija prvih seismoloških instrumenata vremenski je vezana za kraj XIX vijeka, kada je konstruisan prvi tip **seismografa** – kao uređaja za grafičko registrovanje seizmičkih talasa stvorenih zemljotresom.

Od tada do danas, u Svetu je razvijen veliki broj raznih vrsta i tipova instrumenata za registrovanje različitih parametara dejstva zemljotresa. Tako se u instrumentalnoj tehnici registrovanja zemljotresa jasno izdvajaju tri osnovna tipa seismoloških uređaja: **seismografi**, **akcelerografi** i **seizmoskopi**, čije ćemo osnovne namjene i svojstva samo kratko opisati.

Nakon uvođenja u seismološku praksu automatskih telemetrijskih seismoloških mreža i sistema za registrovanje podataka o zemljotresima, a poslednjih nekoliko godina, kada se intenzivno uvodi digitalna tehnika registrovanja pomoću širokopojasnih seismografa, uz automatsku obradu podataka u realnom vremenu, instrumentalna seismologija je praktično iskoracila ispred zahtjeva teorijskih i aplikativnih potreba seismologije u cjelini.

SEIZMOGRAFI predstavljaju fundamentalne registracione instrumente u seismološkoj praksi, pomoću kojih se mehanički efekat seizmičkih talasa zemljotresa u tlu, pretvara u elekromagnetski indukovani napon (kod elekromagnetskih tipova seimografa). Stvoreni napon se nakon elektronskog pojačanja zatim registruje na odgovarajućem **rekorderu** (registratoru) u vidu ekvivalentnog grafičkog zapisa – **seizmograma** - ili ekvivalentnog magnetskog digitalnog zapisa, koji se koristi za automatsku obradu na računaru. Zavisno od načina transformisanja mehaničkih vibracija tla u seismometru, registruje se veličina pomaka tla (pomjeranje) ispod seismometra ili (što je danas najčešći slučaj) brzina oscilovanja tla.

Osnovni princip rada **elektromagnetskog seismografa** (slika 108) koji se danas najčešće koristi u seismološkoj praksi, sadržan je u stvaranju električnog napona u **radnoj navojnici** (kružni kalem) koja je fiksirana za kućište seismometra u kojoj osciluje **trajni magnet** relativno velike mase (koji praktično predstavlja fizičko klatno), vezan za finu čeličnu oprugu, i na taj način indukuje elektromagnetsku silu u navojnici. Veličina indukovanih napona direktno je proporcionalna brzini oscilovanja tla, odnosno brzini relativnog kretanja navojnice sa kućištem seismometra u odnosu na inertnu masu magneta. Zbog potrebe brzog umirivanja ovakvog oscilatornog sistema, klatno seismometra se pomoću posebne **prigušne navojnice** brzo smiruje – čekajući novu seizmičku pobudu. Napon u navojnici direktno je proporcionalan i uslovjen karakteristikama seizmičkih talasa, koji izazivaju oscilovanje seismometra.



Slika 108. Elektromagnetski seizmometar: a) šema vertikalnog seizmometra: (1)-kućište; (2)-čelična opruga; (3)-trajni magnet; (4)-radni kalem; (5)-prigušni (i kalibracioni) kalem; (6)-kabl za odvođenje indukovanih napona na pojačavač i registrator signala; b) Realni izgled seizmometra tipa S-13 Teledajn-Džiotek (Teledine-Geotech) u vertikalnom (raskolpljenom) i horizontalnom položaju.

Stvoreni napon, kao elektromehanička slika seizmičkih talasa, zatim se vodi na elektronski pojačivač - kako bi se doveo na odgovarajući nivo osjetljivosti registratora. Seizmički pojačivači obično uvećavaju napon stvoren u seismometru za nekoliko desetina, pa i stotina hiljada puta, zavisno od namjene uređaja i lokalnih uslova rada. S obzirom na uvijek prisutne prirodne i vještačke mikrovibracije u tlu, optimalno elektronsko uvećanje analognih seismografa najčešće iznosi oko 100.000 puta.

Treba naglasiti da su seismometri **polarisani instrumenti**, sa određenim frekventnim karakteristikama. Ovo praktično znači da je konstruktivnim rješenjem dozvoljeno oscilovanje mase klatna seismometra samo duž jedne ose, registrujući samo **translatorna kretanja tla** u tom pravcu, prigušujući istovremeno sva ostala **rotaciona** (koja inače imaju daleko manje učešća u ukupnom kretanju tla) i **translatorna** kretanja u svim ostalim pravcima. Prema pravcu polarizovanja, razlikujemo takozvane **vertikalne** i **horizontalne** seismometre. Istovremeno, zavisno od konstruktivnih karakteristika seismografa, ovaj uređaj neminovno vrši određene transformacije u spektralnom sastavu registrovanih seizmičkih talasa u odnosu na seizmičku pobudu. Ovim filtarskim svojstvima seismografa u obradi registrovanog signala posvećuje se posebna pažnja, pošto se ta svojstva mogu uspješno iskoristiti za izdvajanje određenih grupa seizmičkih talasa.

Registrovanje seismograma - kao zbira talasnih formi jednog zemljotresa (koji su frekventno modifikovani u saglasnosti sa konstruktivnim karakteristikama sistema seismometar - seizmički pojačivač - registrator) obavlja se u seismološkim stanicama - u **analognoj formi** (na kvalitetnom papiru - pomoću mastila, zatim na filmu, foto-papiru ili magnetskoj traci) ili, danas mnogo češće, u **digitalnom obliku** (na magnetskoj traci ili disku, fleš memoriji i slično).

Paralelno sa registrovanjem seizmičkih talasa, obavlja se i registrovanje informacije o vrlo **tačnom tekućem vremenu** (sa greškom manjom od 1/1000 od sekunde), u cilju precizne identifikacije trenutka prijema pojedinih faza seizmičkih talasa. U ovu svrhu, seismografi su opremljeni i visoko kvalitetnim časovnicima, sa vrlo malim "hodom", na kojima se vrši sinhronizacija sa tzv. svjetskim vremenom, ili srednje-griničkim vremenom (GMT- Greenwich Mean Time). Sinhronizacija časovnika obavlja se pomoću odgovarajućih radio-prijemnika

vremenskog koda, koji kontinualno emituju brojne radio-stanice širom sveta (npr. DCF, WWV, WWVH, Moskva) ili, što je danas najčešći slučaj – korišćenjem vremenske baze GPS satelita za automatsku sinhronizaciju časovnika seismografa. U seismološkoj praksi se koristi isključivo GMT vreme, radi izbjegavanja konfuzije podataka prilikom razmjene istih sa drugim seismološkim centrima.

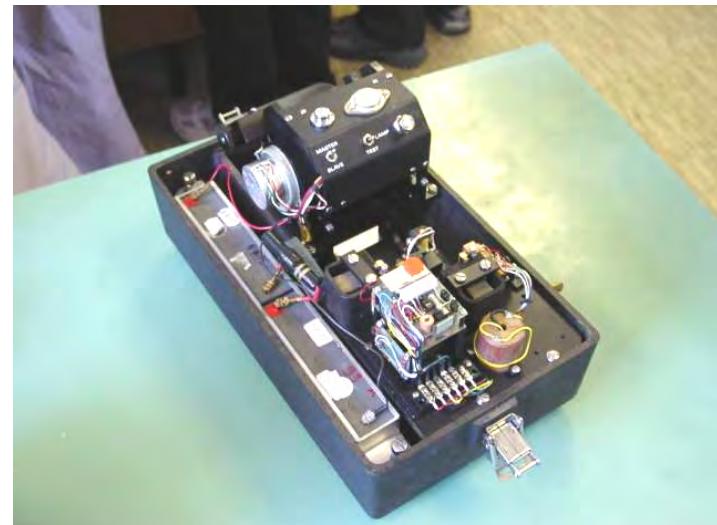
Pored elektromagnetskih seismografa, čiji princip rada je kratko diskutovan, još ponegdje se u seismološkoj praksi koriste i stari, tzv. **mehanički seismografi**, kod kojih se kretanje tla prenosi preko mehaničkog pojačivača - u vidu mehaničkog kretanja - do pera. Ranije su korišćeni i tzv. **kapacitivni seismometri** (na principu promjene kapaciteta pločastog kondenzatora), kod kojeg se rastojanje ploča kondenzatora mijenja pod mehaničkim dejstvom seizmičkih talasa.

U savremenoj seismološkoj praksi sve više se koriste (posebno za registrovanje mikro-seizmičke aktivnosti i lokalnih zemljotresa) tzv. **piezoelektrični seismometri** u kojima se mehaničkim dejstvom seizmičkih talasa na kristal kvarca stvara odgovarajući piezoelektrični odziv u vidu električnog napona, koji je proporcionalan brzini oscilovanja tla.

AKCELEROGRAF je poseban **inženjersko-seizmološki** instrument, koji je po svojim konstruktivnim principima vrlo sličan seismografima. Osnovna razlika je sadržana u vrsti podataka koji se registruju, ali i u frekventnim karakteristikama instrumenta.

Akcelerografi registruju **ubrzanje oscilovanja tla**, koje su izazvali seizmički talasi. Ovakav princip je izведен konstruktivno - izborom velike sopstvene kružne frekvencije sistema trokomponentnog klatna - obično između 25 i 30Hz, tako da ovaj uređaj praktično direktno registruje ubrzanje tla. Podatak o ubrzaju se registruje na foto-filmu u kontinualnom obliku, ili na magnetskoj traci ili fleš memoriji - u digitalnij formi. Treba naglasiti da su ovakvi uređaji obično **latentno operativni**, odnosno da ih aktivira zemljotres određene jačine, na koju je senzor prethodno podešen (obično oko IV stepena MCS /Merkalijeve/ skale).

Kao što ćemo vidjeti nešto kasnije, registrovani akcelerogrami (ili kako se još nazivaju - istorije ubrzanja tla) koriste se u oblasti inženjerske seismologije - za izučavanje amplifikacionih svojstava tla, u zemljotresnom inženjerstvu - za kompjutersko simuliranje realnih zemljotresa na matematičkim modelima i na dinamičkim platformama i fizičkim modelima građevinskih objekata, zatim u kvantitativnoj seismologiji - za interpretaciju elemenata mehanizma kompleksnih tipova žarišta zemljotresa i dr.



Izgled trokomponentnog akcelerografa (rasklopljenog) tipa Kinemetriks SMA-1 sa registracijom na foto-filmu.

c) **SEIZMOSKOP** je posebno dizajniran seismološki instrument, namijenjen registrovanju dinamičkog odgovora hipotetičkih građevinskih objekata, u uslovima dejstva jakih bliskih zemljotresa. Seizmoskop u suštini ne registruje ni jednu fizičku karakteristiku oscilovanja tla (kao npr. seismograf ili akcelerograf) već na jednostavnom rekorderu bilježi informacije koje direktno reprezentuju dinamički odziv nekog hipotetičkog građevinskog objekta, koji bi bio lociran na mjestu seizmoskopa za vrijeme zemljotresa.

Mehaničke karakteristike seizmoskopa su tako odabrane da dobijene registracije reprezentuju očekivanu dinamičku reakciju tipičnog višespratnog građevinskog objekta. Tako, seizmoskopi najčešće imaju sopstvenu periodu oscilovanja 0,75 s, sa faktorom prigušenja oscilacija 10% od kritične vrijednosti.

Zbog vrlo niske cijene ovih instrumenata, u trusnim oblastima se obično postavlja gusta mreža - u uslovima različitih geoloških formacija i lokalnih geotehničkih uslova.

d) DRUGE VRSTE INSTRUMENATA koje su u upotrebi u seizmolškoj praksi, većinom su namijenjene za direktno mjerjenje određenih fenomena vezanih za pojavu zemljotresa. To su na primjer, **tiltmetri** (ili naklonometri) odnosno instrumenti za mjerjenje enormno malih i sporih relativnih promjena položaja dva bloka (krila) rasjeda u fazi pripreme zemljotresa, kao i kasnije. U upotrebi su i tzv. **naponometri** – za registrovanje naponskog stanja u zoni potencijalnih žarišta zemljotresa. Sličnu namjenu imaju i tzv. **ekstenziometri** pomoću kojih se registruje veličina horizontalnih deformacija (ekstenzija ili dilatacija) između dvije tačke na Zemljinoj površi.

U seizmološkim istraživanjima često se koriste i različiti uređaji za mjerjenje promjena geofizičkih polja – kao prekursora zemljotresa, npr.: magnetski variometri, visokoosjetljivi gravimetri, instrumenti za mjerjenje intenziteta telurskih električnih polja i drugi.

7.3. Analiza i obrada seizmoloških podataka

Metode analize analognih i digitalnih registracija seizmičkih talasa zemljotresa (seizmograma) i numerička obrada rezultata tih analiza, u savremenoj seizmološkoj praksi obuhvataju sljedeće elemente:

- Identifikaciju **vrsta i tipova seizmičkih talasa** na seizmogramu,
- Utvrđivanje **tačnog vremena registrovanja** određenog tipa seizmičkog talasa,
- Numeričku **obradu registrovanih talasa** na većem broju seizmoloških stanica, u cilju utvrđivanja prostornih parametara hipocentra zemljotresa i trenutka njegovog nastanka,
- Definisanje **mehanizama žarišta zemljotresa** i dinamičkih parametara žarišta,
- Energetske karakteristike (magnituda) zemljotresa i analizu distribucije **makroseizmičkog polja**, odnosno formiranje matematičkog modela raspodjele površinskog efekta zemljotresa,
- Utvrđivanje **elemenata strukturne građe Zemljine kore** na osnovu interpretacije površinskih i zapreminskih talasnih formi,
- Proračun empirijskih vrijednosti **amplifikacionih karakteristika tla** u lokalnim razmjerama i utvrđivanje matematičkih zakonitosti tih pojava.

Seizmički talasi, na svom putu od žarišta zemljotresa do prijemne seizmološke stanice, prolaze kroz stijene zemljine kore i njene unutrašnjosti, povezujući se njihovim elastičnim svojstvima, što značajno utiče na formu samog talasa. Dakle, finalni oblik svakog seizmičkog talasa i vrijeme koje on utroši na putu od izvorišta do prijemnika, sadrže informacije o sljedećim parametrima:

- **Energetskim karakteristikama žarišta** zemljotresa i dinamičkim procesima njegovog nastanka,
- **Prostornom položaju žarišta** i trenutku započinjanja rasijedanja stijene u žarištu,
- **Elastičnim svojstvima stijena i strukturne građe Zemljine kore**, na putu do prijemnika (seizmografa),
- **Dinamičkim svojstvima lokalne geološke sredine** na mjestu seizmološke stanice i drugo.

Primjenom adekvatnog matematičkog aparata, moguće je sve navedene informacije izdvojiti i numerički izraziti iz registrovane grupe seizmičkih talasa.

Strukturna građa Zemljine kore i dublje unutrašnjosti Zemlje, utvrđuje se, kao što je pomenuto, kroz proces numeričke inverzije hodohrona, odnosno obrade i interpretacije rezultata registrovanja seizmičkih talasa na Zemljinoj površi, na brojnim seismološkim stanicama. Pri rješavanju ovakvoga zadatka, koriste se rezultati registrovanja zemljotresa i jakih eksplozija, posebno nuklearnih. Prednost korišćenja rezultata opservacija nuklearnih eksplozija sadržana je u činjenici da su položaj žarišta eksplozije i trenutak njenog iniciranja, najčešće poznati sa visokom tačnošću. Kod zemljotresa, međutim, svi parametri hipocentra predstavljaju takođe nepoznate veličine.

Obradom većeg broja jakih zemljotresa, koji su registrovani na većem broju seismoloških stanica, odnosno inverzijom hodohrona serije takvih zemljotresa i eksplozija, uz primjenu savremenih matematičkih metoda, moguće je kvalitetno definisati parametre reprezentativnog seizmičkog modela Zemljine kore. U savremenoj seismološkoj praksi, primjenom metoda simultane obrade veće grupe lokalnih zemljotresa ili metode seizmičke tomografije, definiše se znatno detaljniji seizmički model zemljine kore u 1D ili 3D obliku. Zbog svoje kompleksnosti i složenog numeričkog postupka proračuna vremena putovanja seizmičkog zraka kroz 3D model, u rutinskoj praksi i danas se koristi praktično samo 1D model. Rezultujući seizmički model opisuje se geometrijskim parametrima (vrstom modela – na primjer horizontalno uslojeni poluprostor, model sa promjenljivom brzinom u slojevima u funkciji dubine, kao i debljinom pojedinih slojeva) i brzinama longitudinalnih i transverzalnih talasa. Kvalitetan seizmički model možemo uspješno koristiti u postupku lociranja tekuće seizmičnosti, zatim pri relociranju ranije dogodenih zemljotresa, a za proučavanju strukturne građe Zemljine kore i za seismotektonska proučavanja, vrlo je pogodan 3D model.

U analizi seizmičkih talasa stvorenih zemljotresom na relativno malim epicentralnim rastojanjima (do oko 1.000 km) posebna pažnja se posvjećuje zapreminskim talasima, a na većim rastojanjima i površinskim talasima oba tipa, kao osnovnim fazama, ali takođe i brojnim produktima ovih talasa, stvorenim u procesima reflektovanja i refraktovanja na granicama sredina različitih elastičnih svojstava u Zemljinoj kori i dubljoj unutrašnjosti.

Pored seizmičkih talasa stvorenih zemljotresima, u seismologiji se proučava još jedna specifična vrsta talasa – **mikroseizmi**, odnosno mikro-oscilacije tla, sa periodama između 2 i 20 sekundi (relativno homogenog spektra) i sa relativno malim amplitudama (obično manjim od $1\mu\text{m}$). Mikroseizmi se intenzivnije registruju na priobalnim seismološkim stanicama, a njihove amplitude se povećavaju sa pojmom bura na moru. Do sada nije u potpunosti utvrđen neposredni uzročnik ovih pojava, ali se pretpostavlja da su oscilovanje vodene mase u morima, u zonama strmih obala, kao i izvesne atmosferske turbulencije, njihovi potencijalni uzročnici.

ZEMLJINA KORA I BLISKI ZEMLJOTRESI

Generalno posmatrajući, Zemljina kora se odlikuje vrlo kompleksnom struktturnom građom. Područje Balkana se u tom smislu posebno ističe. Naime, tektonska aktivnost u tom regionu tokom geološke istorije, bila je veoma izražena. Kao rezultat takve aktivnosti na području Srbije i Crne Gore formirana je Zemljina kora različite debljine – od oko 22 do 54 km – sa vrlo složenim geološkim odnosima u horizontalnoj i vertikalnoj ravni, što je posebno izraženo u zoni sedimenata, sa debljinom od 5-15 km (čak i preko 20 km u nekim regionima).

Za potrebe rutinskog lociranja zemljotresa, najčešće se čitava Zemljina kora predstavlja uprošćenim modelom, koji čini nekoliko osnovnih, generalizovanih slojeva: **sedimentni kompleks, granitski sloj, bazaltni sloj i Mohorovičićev diskontinuitet** (odnosno gornji dio

spoljašnjeg omotača). Sedimentni kompleks predstavlja debelu seriju sedimentnih stijena, koja je nataložena preko kiselih stijena (tzv. granitskog sloja). Kod nešto detaljnijih modela, ovaj paket sedimenata se dijeli na plići kompleks (2-3 km) koji se karakteriše relativno malim brzinama seizmičkih talasa i dublji kompleks sedimentnih stijena (tabela 9). Granitski sloj obuhvata stijene kiselog sastava i prostire se obično do dubine od 15-20 km. Između granitskog sloja i Mohorovičićevog diskontinuiteta lociran je bazaltni sloj, koji obuhvata stijene mahom bazičnog sastava. Njegova debljina u kontinentalnom delu Zemljine kore iznosi obično oko 5-15 km, a nešto više u okeanskim korama. Granica između granitskog i bazaltnog sloja naziva se Konradovom granicom, prema seizmologu V. Conradu. Ispod bazaltnog sloja, odnosno Mohorovičićeve granice započinje Zemljin omotač, slojem ultrabazične magme.

Seizmički model horizontalno uslojene zemljine kore (za prostor Crne Gore)

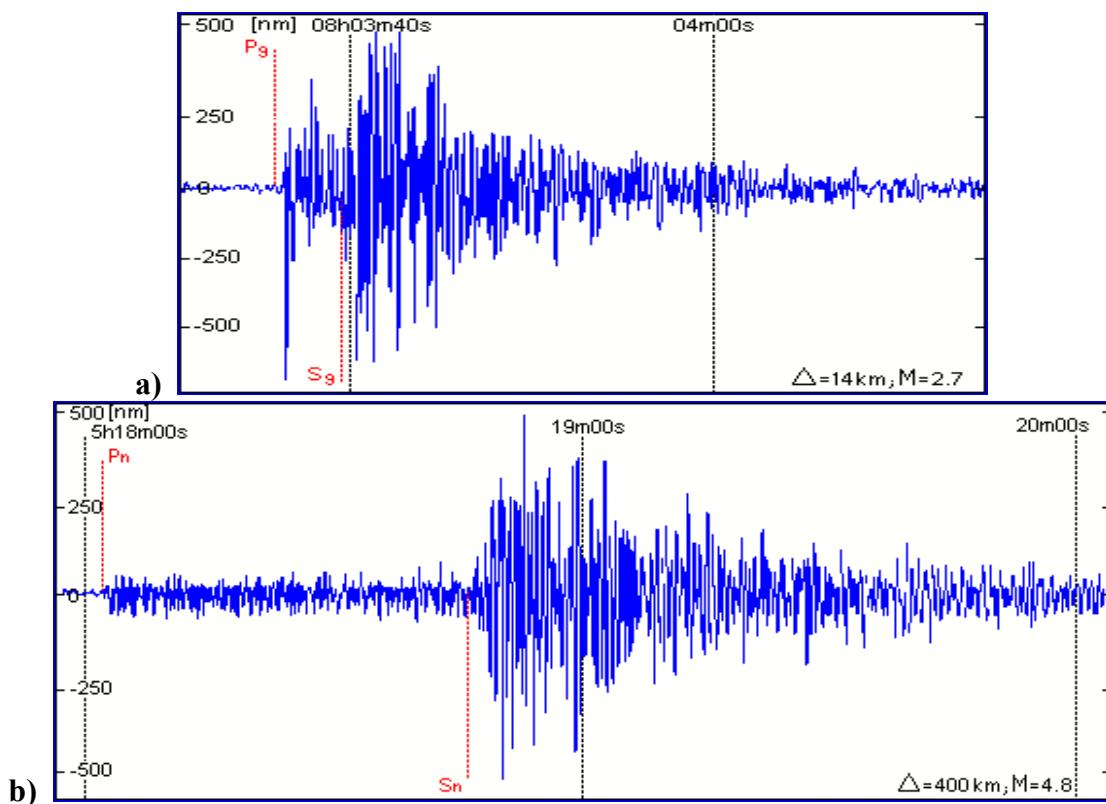
Tabela 9

EKVIVALENTNI SEIZMIČKI SLOJ	BRZINE SEIZMIČKIH TALASA (km/s)		DEBLJINA (km)
	Longitudinalni	Transverzalni	
Plići dio sedimentnog kompleksa	4,49	2,52	3
Dublji dio sedimentnog kompleksa	6,14	3,21	7
Granitski sloj	6,60	3,71	23
Bazaltni sloj	6,82	3,86	9
Mohorovičićev diskontinuitet	8,01	4,60	-

Ako se složena strukturalna građa i elastična svojstva slojeva Zemljine kore, generališu jednim ekvivalentnim uprošćenim seizmičkim modelom koji je reprezentovan horizontalno uslojenim poluprostorom, tada se optimalni parametri takvog modela mogu izraziti kao u tabeli 9, u primjeru za prostor Crne Gore. Ovi parametri su dobijeni seizmičkom 1D tomografijom, pri simultanoj obradi grupe od 64 zemljotresa, koji su kvalitetno digitalno registrovani. Ovaj model je dobijen pod pretpostavkom o nepostojanju sloja male brzine u zemljinoj kori (kada dublji sloj ima manju brzinu od prethodnog plićeg sloja).

Pomenuta kompleksnost strukturne građe Zemljine kore na području Dinarida, predstavlja osnovni uzrok generisanja vrlo složenih seizmičkih talasnih formi pri dejstvu zemljotresa, koje su zatim multiplikovane u složenim tektonskim uslovima. Spektralna analiza seizmičkih talasa (zapreminske i površinske) ili u uslovima registriranja seizmičkih talasa na malim epicentralnim rastojanjima na ovom području, ukazuje da dominirajuće periode ovih talasa zauzimaju relativno širok dijapazon – od 0,1 do 2,0 sekundi, zavisno od vrste i tipa talasa. Tako, na primjer, tip longitudinalnih talasa, obično se karakteriše dominantnim periodama u intervalu između 0,1 – 0,4 s, a transverzalni talasi u intervalu 0,3 – 0,8 s, dok ostatak spektra pokrivaju obije vrste površinskih talasa (Rajlaj i Lav).

Zavisno od mjesta nastanka zemljotresa, odnosno položaja žarišta u Zemljinoj kori, kao i od pravca kretanja registrovanih seizmičkih talasa, možemo generalno zaključiti da su kod tzv. bliskih i lokalnih zemljotresa (do epicentralnih rastojanja od oko 1.100 km), na području centralnog Balkana, amplitudno dominantni direktni ili refraktovani longitudinalni i transverzalni talasi vezani za granitski sloj (Pg i Sg faze talasa), na epicentralnim rastojanjima do kritične tačke ili tačke smjene faza na hodohroni (najčešće na oko 175 km - što zavisi od dubine žarišta i debljine Zemljine kore) i refraktovani zapreminski talasi na Mohorovičićevoj granici (Pn i Sn faze) – na rastojanjima preko 175 km.



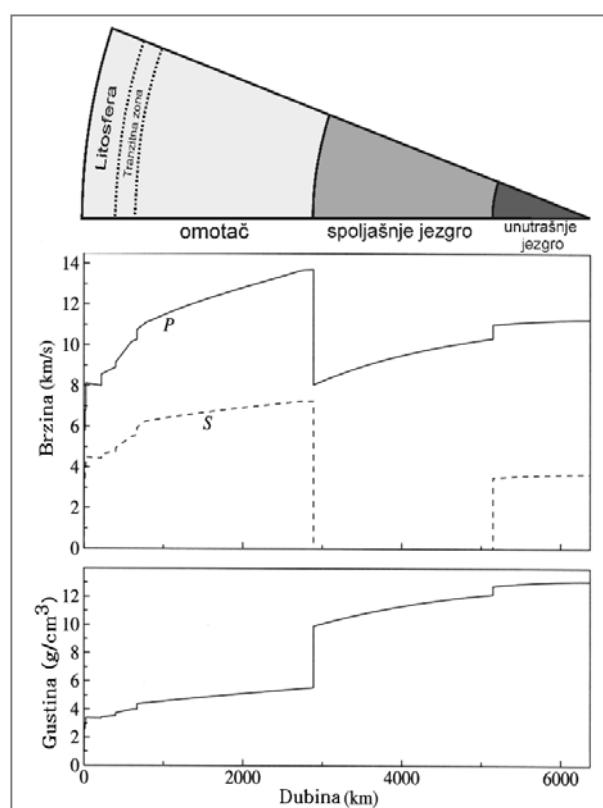
Slika 110. Primjeri seizmograma lokalnog (a) i bliskog (b) zemljotresa: a) Zemljotres registrovan na epicentralnom rastojanju od 14 km, sa magnitudom 2.7 sa naznačenom Pg i Sg fazom; b) Seizmogram na epicentralnom rastojanju 400 km od epicentra zemljotresa sa magnitudom 4.8 i primarnim fazama seizmičkih talasa Pn i Sn.

Tipičan izgled seizmograma sa indikacijom osnovnih faza seizmičkih talasa, za tzv. lokalni i bliski zemljotresa, prikazan je na slici 110 (za tip tzv. bliskog zemljotresa na slici 110a i za tzv. lokalni zemljotres, na slici 110b).

Kretanje seizmičkih talasa, njihovo prelamanje i reflektovanje na granicama sredina sa različitim elastičnim svojstvima, u cijelosti se može izraziti elementima geomtrijске optike, odnosno zakonima optičke fizike, što izlazi iz okvira ovog kursa.

ZEMLJINA UNUTRAŠNJOST I TELESEIZMI

Kod zemljotresa sa hipocentrom u Zemljinoj kori, kao **primarne** faze zapreminskih talasa, pored Pg i Sg, registrovaćemo Pn i Sn faze longitudinalnih i transverzalnih talasa, respektivno – sve do epicentralnih rastojanja od oko 10 lučnih stepeni ($1^\circ = 111,195 \text{ km}$). Nakon ovog rastojanja, na Zemljinu površ prvi počinju da stižu tzv. P i S talasi, odnosno longitudinalni i transverzalni talasi koji su dio svog puta od



Slika 111. Unutrašnjost Zemlje i dijagrami promjene brzine longitudinalnih (P) i transverzalnih (S) talasa i gustine materijala sa dubinom (Z), uz indikaciju osnovnih slojeva.

hipocentra do seizmološke stanice prešli kroz zonu ispod Mohorovičićeve granice, odnosno kroz zemljin omotač. Seizmički talasi koji se registruju na rastojanjima većim od 10 lučnih stepeni nazivaju se **teleseizmima**.

Hodohrone teleseizama, koje su konstruisane na bazi kvalitetnih podataka registracije velikog broja zemljotresa na velikom broju seizmoloških stanica, raspoređenih na različitim epicentralnim rastojanjima, mogu se koristiti za numeričku inverziju – radi definisanja raspodjele brzina seizmičkih talasa u Zemljinoj unutrašnjosti.

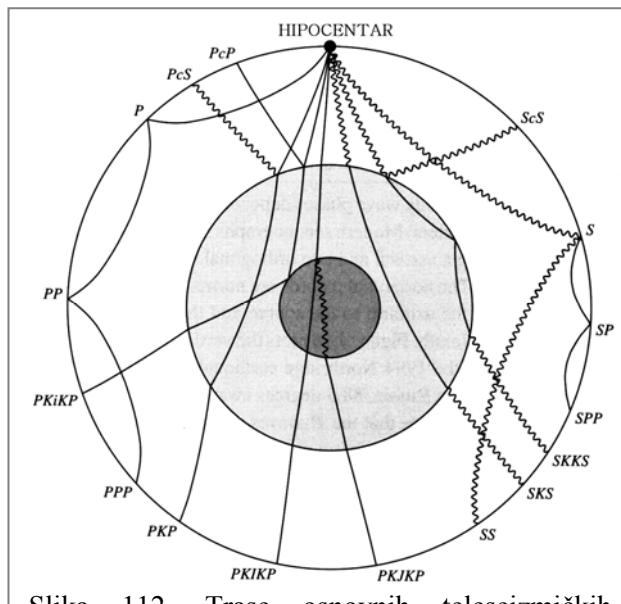
Dosadašnja saznanja o Zemljinoj unutrašnjosti ukazuju da raspodjela materije različite gustine u Zemlji vrlo dobro odgovara modelu sa serijom **konfokalnih** sfera (sfera sa centrom u centru Zemlje) odnosno tzv. sferno simetričnom modelu, o čemu smo govorili u poglavljaju o zemljinoj unutrašnjosti (slika 111). U takvom modelu seizmički zraci imaju zakrivljen oblik zbog sistematskog povećanja brzine sa dubinom.

Postupkom numeričke inverzije hodohrona zemljotresa, koje su registrovane na velikim epicentralnim rastojanjima (od 10 do 180 lučnih stepeni) moguće je utvrditi unutrašnju strukturnu građu Zemlje, što se realizuje i primjenom metoda seizmičke tomografije. Osnovna struktura unutrašnjosti Zemlje može se sagledati iz dijagrama promjene brzine P i S faza seizmičkih talasa sa dubinom, kao na slici 111, na osnovu tzv. IASP91 numeričkog modela zemljine unutrašnjosti (model Međunarodne asocijacije za seismologiju i zemljinu unutrašnjost razvijen 1991. godine). Na ovoj slici su označene granice dominantnih slojeva Zemlje u kojima se brzina sa dubinom značajnije mijenja.

U seizmološkoj praksi najčešće se složena struktura unutrašnje građe Zemlje generalizuje sa ukupno 4 sloja. Prvi sloj predstavlja zemljinu koru, sljedeći sferni sloj, odnosno zona koja se prostire od Mohorovičićeve granice do dubine od 2.900 km, naziva se **omotač jezgra** (ili mantija). Ovaj sloj obuhvata tzv. spoljašnji omotač (od zemljine kore do **tranzitne zone** na 670 km) i unutrašnji omotač, koji obuhvata ostatak ovog sloja. Najniži sferni sloj u Zemlji, tzv. **jezgro**, obuhvata spoljašnji i unutrašnji dio, pa se dijeli na spoljašnje i unutrašnje jezgro.

Kao što se vidi na slici 111, u Zemljinom omotaču postoji izrazit vertikalni priraštaj brzine oba tipa zapreminskega talasa: za longitudinalne talase – od $\approx 8,0$ km/s na donjoj granici Zemljine kore (tabela 9) do 13,6 km/s na donjoj granici omotača (2,900 km), a za transverzalne talase od $\approx 4,6$ km/s do 7,3 km/s. Ispod donje granice omotača, dakle unutar spoljašnjeg jezgra Zemlje, transverzalni talasi se ne prostiru, što ukazuje da se ovaj dio Zemljine unutrašnjosti ponaša kao tečnost. Karakteristično je i to da se na granici između omotača i jezgra brzina P-faze talasa naglo smanjuje sa 13,6 na 8,1 km/s.

Na slici 112 prikazani su seizmički zraci osnovnih tipova **P** i **S** faza u Zemljinoj unutrašnjosti. Indeks K označava da je seizmički talas **prošao** kroz jezgro (njem.: kernell= jezgro) a indeks c indicira da se odgovarajući seizmički zrak **reflektovao** na gornjoj granici jezgra (engl. core=jezgro). Uobičajeno je da se, radi skraćivanja, faza PKP kratko označava kao **P'**.



Slika 112. Trase osnovnih teleseizmičkih zapreminskega talasa u Zemljinoj unutrašnjosti (transverzalni zraci su prikazani krivudavom linijom).

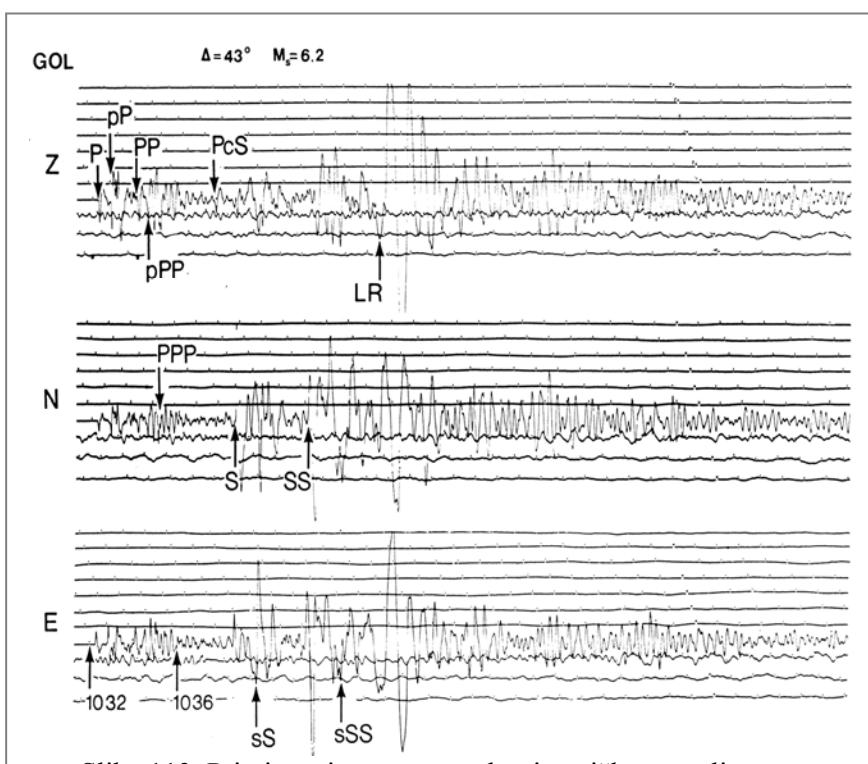
Direktni zapreminske talasi registruju se do epicentralnih rastojanja od 103° , a u tzv. **difragovanom** obliku (kada su slabo amplitudno izraženi na seismogramu) i na nešto većim rastojanjima – do oko 110° . U intervalu $103^\circ - 142^\circ$ na hodohroni je izražena tzv. **zona sjenke** za longitudinalne talase (pošto se u jezgru njihova brzina smanjuje na $\approx 8,6$ km/s). Nakon 142° , kao prvi nailazak registruje se PKP faza. Nakon 103° prvo se registruju **PKP** (kao prvi longitudinalni) i **SKS** (kao prvi transverzalni) talasi (slike 112 i 113). SKS faza nastaje kretanjem transverzalnog talasa kroz omotač – do jezgra, zatim nakon prelamanja – daljim kretanjem kroz jezgro u obliku longitudinalnog talasa i konačno, ponovo kroz omotač – u vidu transverzalnih talasa.

Primjer seismograma sa registrovanim karakterističnim telesizmičkim talasima, na epicentralnom rastojanju od 43° , sa magnitudom $M_s=6,2$, prikazan je na slici 113.

Određivanje položaja žarišta zemljotresa

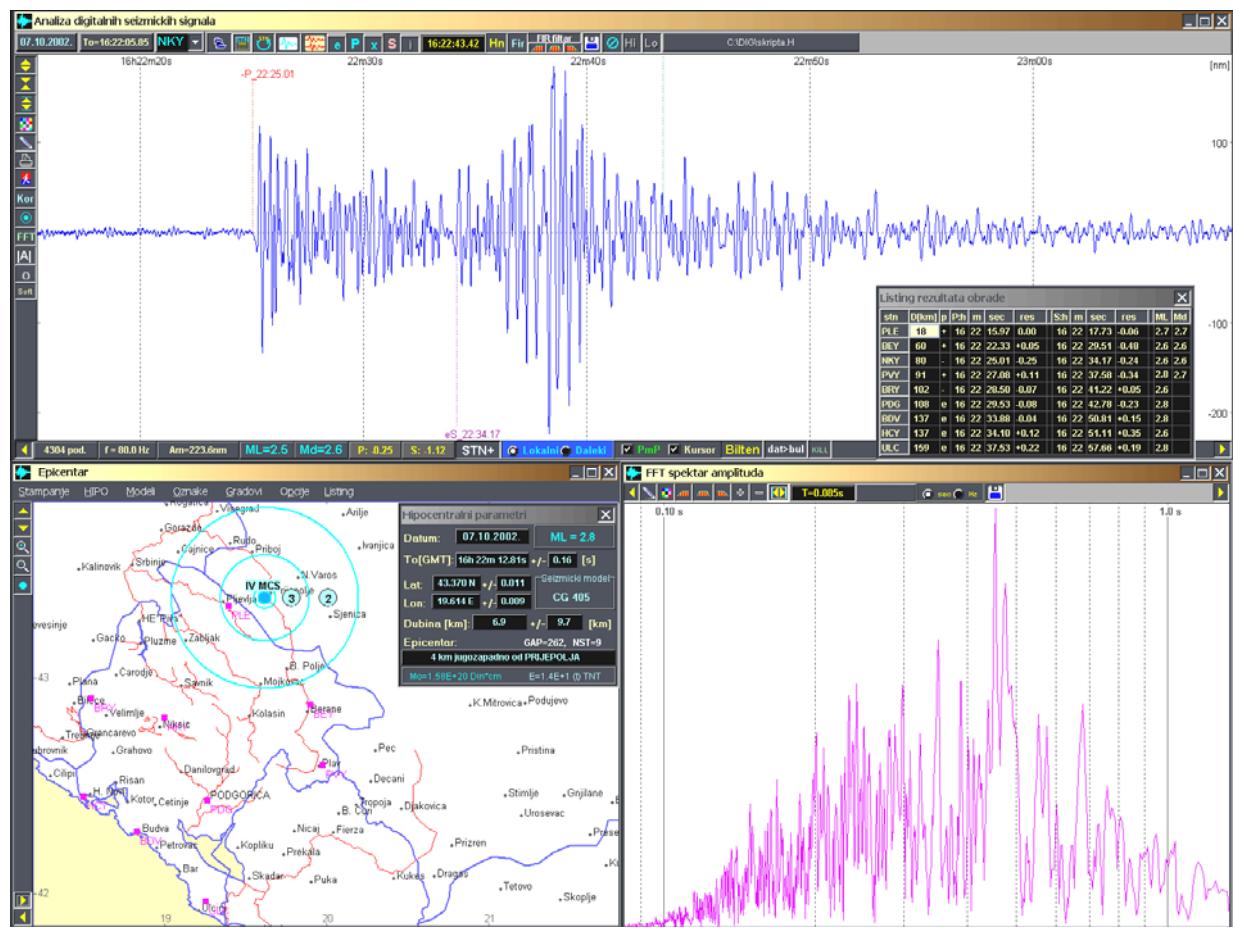
Jedan od najznačajnijih zadataka u obradi seismoloških podataka je određivanje prostornih koordinata žarišta zemljotresa i hipocentralnog vremena (momenta generisanja zemljotresa) sa maksimalno mogućom tačnošću. Jedini raspoloživi podaci za rješenje ovog zadatka predstavljaju vremena registriranja seismičkih faza na seismogramima većeg broja seismoloških stanica, koje su distribuirane na različitim rastojanjima i u različitim pravcima od epicentra.

Za proračun položaja epicentra (geografske širine i dužine) i trenutka nastanka zemljotresa (u slučaju epicentra to je tzv. **epicentralno vreme**, ili momenta pojave prvih seismičkih talasa u epicentru) dakle za definisanje ove tri nepoznanice, potrebno je raspolagati podacima registriranja zemljotresa na najmanje tri seismološke stanice (pretpostavljajući bar po jedan podatak o nekoj seismičkoj fazi). U seismološkoj praksi se obično raspolaze sa znatno većim brojem podataka, posebno kod jačih zemljotresa, čime se postiže veći kvalitet utvrđenih parametara žarišta.



Slika 113. Primjer seismograma telesizmičkog zemljotresa, registrovanog na epicentralnom rastojanju od 43° .

Za definisanje dubine žarišta zemljotresa potreban je bar jedan podatak više, odnosno rezultat registriranja istog zemljotresa na najmanje 4 seismološke stanice. Pri proračunu dubine hipocentra, potrebno je da je ispunjen još jedan uslov – da se bar jedna od seismoloških stanica nalazi na epicentralnom rastojanju koje je istog reda veličine kao dubina hipocentra.



Slika 114. Primjer kompletног numeriчког rješenja sa grafičkim reprezentacijom položaja hipocentra zemljotresa od 7.10.2002. godine ($ML=2,8$) u blizini Prijeopolja (na slici 118 prikazani su svi seismogrami registrovani mrežom stanica u Crnoj Gori). Koncentrični krugovi oko epicentra na karti označavaju položaje izoseista, sračunatih na osnovu empirijskih izraza. Dijagram u dnu slike - desno prikazuje Furijeov (Fourierov) amplitudni spektar za seizmički signal prikazan u vrhu slike (registrovan na stanici NKY /Nikšić/ u Crnoj Gori).

Kao značajno pomoćno sredstvo za rešavanje problema lociranja hipocentra koristi se prethodno utvrđeni seizmički model Zemljine kore regiona ili snimljena hodohrona seizmičkih talasa.

Metode lociranja hipocentra zemljotresa (ili kratko: lociranja zemljotresa) intenzivno su razvijene u dva pravca: grafičko-analitičke metode i numeričke metode. Danas se u praksi koriste isključivo numeričke metode. Položaj žarišta u prostoru i trenutak nastanka zemljotresa (hipocentralno vrijeme) moguće je numerički odrediti iz rezultata registrovanja vremena (najčešće) prvih nailazaka longitudinalnih i, eventualno, transverzalnih talasa.

Jedan primjer tipičnog izgleda kompletног numeriчkog rešenja hipocentralnih parametara sa grafičkim prikazom položaja epicentra i Furijeovim amplitudnim spektrom signala, za zemljotres od 7.10.2002. godine ($ML=2,8$) u blizini Prijeopolja, prikazan je na slici 114.

Energetski parametri zemljotresa

Kvantitativna ocjena jačine zemljotresa u žarištu ili količine oslobođene energije, dugo je bilo otvoreno pitanje, sve do 1935. godine, kada je Čarls Rihter⁷ u originalnom pristupu definisao **magnitudu zemljotresa**. Na taj način omogućen je proračun **relativne** jačine zemljotresa –

⁷ Charles Francis Richter (1900.-1985.) američki seismolog.

izražene kao funkcija maksimalne registrovane amplitude seizmičkog talasa na seismogramu i epicentralnog rastojanja. Ovakva definicija magnitudo zadržana je do danas. Za savremeniji i znatno potpuniji opis dinamičkih i energetskih karakteristika zemljotresa u žarištu, uveden je i pojam **seizmički moment (M_0)**.

MAGNITUDA ZEMLJOTRESA

Obavljujući grafičku i numeričku obradu podataka o seriji zemljotresa u Kaliforniji, (registrovanih na horizontalnom torzionom seismometru tipa Vud–Anderson /Wood–Anderson/, sa maksimalnim uvećanjem od 2.800 puta i sopstvenim periodom klatna 0.8 s) Rihter je uočio međusobnu korelabilnost funkcionalne zavisnosti maksimalnih amplituda transverzalnih seizmičkih talasa registrovanih kod različitih zemljotresa (slika 115). Naime, Rihter je tzv. **lokalnu magnitudu (M_L)** zemljotresa (za lokalne i bliske zemljotrese) izrazio preko maksimalne registrovane amplitude seizmičkog talasa (A) na Vud–Andersonovom seismografu, koja je normirana ekvivalentnom (kalibracionom) amplitudom (A_0), a koju bi proizveo zemljotres **nulte magnitudo ($M_L=0$)** na istom epicentralnom rastojanju:

$$M_L = \log \left[\frac{A}{A_0} \right]$$

Naime, A_0 je pomenuta generalizovana funkcionalna zavisnost amplitude od epicentralnog rastojanja, koja je izvedena tako da za epicentralno rastojanje od 100 km, tzv. zemljotres nulte magnitudo rezultira ekvivalentnom maksimalnom amplitudom od $1\mu\text{m}$ na Vud–Andersonovom standardnom seismografu.

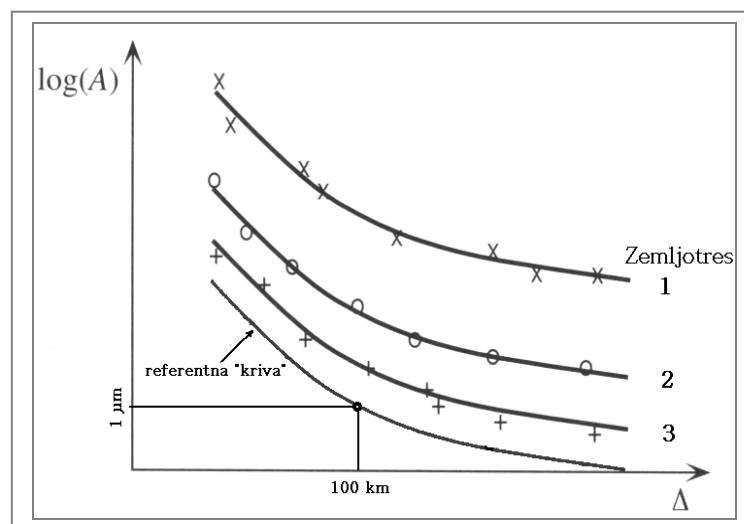
Dakle, magnituda je definisana kao relativna mjera oslobođene energije u žarištu zemljotresa i predstavlja neimenovan broj.

Pošto se danas koristi veliki broj seismografa čije se karakteristike bitno razlikuju od Vud–Andersonovog torzionog seismografa, to se za izražavanje Rihterove lokalne magnitudo (M_L) često koristi postupak svođenja kara-kteristika seismograma za takve seismografe na Vud–Andersonov tip, odnosno, vrši se transformacija maksimalne registrovane amplitude na ekvivalentnu amplitudu koju bi u istim uslovima registrovao standardni Vud–Andersonov seismograf.

Iz iznijete definicije magnitudo proističe da su **gornja i donja** granica Rihterove relacije **otvorene** (termin "skala" je ovdje uslovno korišćen). Naime, donja granica je uslovljena osjetljivošću seismografa (dan se registruju i vrlo slabi zemljotresi koji imaju negativnu magnitudo) a gornja granica – sposobnošću stijenskih masa u regionu žarišta da akumuliraju maksimalne napone. Do sada registrovan zemljotres sa najvećom magnitudom 9.5 (po nekim podacima čak 9.8) dogodio se na Aljasci 1964. godine.



Čarlz Rihter



Slika 115. – Richterovi dijagrami u definiciji magnitudo zemljotresa, prikazani shematski sa indikacijom referentnog "nultog" zemljotresa.

Za utvrđivanje veličine magnitude zemljotresa, do sada je razvijeno pet principijelno različitih empirijskih metoda, i to na osnovu:

- Veličine maksimalne amplitudine seizmičkog signala, njegove periode i epicentralnog rastojanja,
- Dužine trajanja seizmičkog signala iznad određenog amplitudnog nivoa,
- Karakteristika anvelope seizmičkog signala na seismogramu,
- Integrisanja cjelokupnog seimičkog signala, odnosno na osnovu sračunatog mehaničkog rada seizmičkih talasa u tački osmatranja i
- Spektralnih karakteristika seismograma.



Katastrofalni efekti zemljotresa na Aljasci (Enkoridž) 1964. godine, sa magnitudom 9,5.

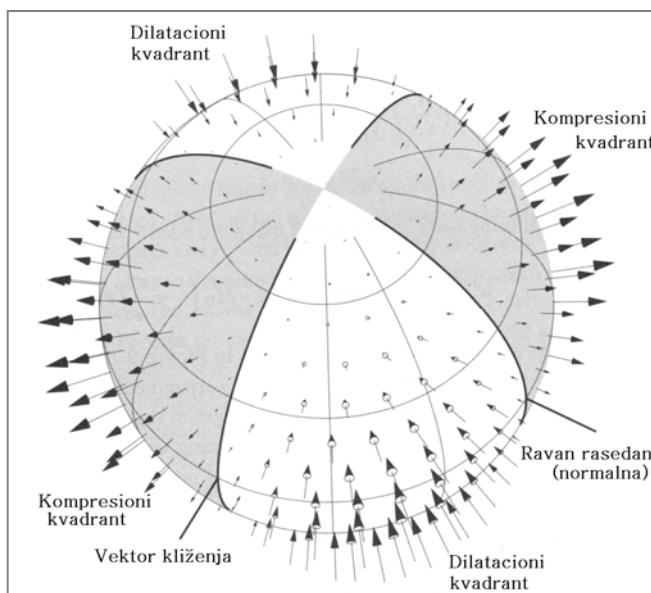
S obzirom da magnituda, kao parametar zemljotresa, ne izražava i spektralni sadržaj seizmičkih talasa stvorenih u žarištu (jer je magnituda veličina koja zavisi od spektralnog nivoa talasa na periodi bliskoj sopstvenoj periodi seismometra na kojem je seizmički signal detektovan), to je u seismologiji definisan kompleksniji parametar relativne jačine u žarištu zemljotresa, koji je nazvan **seizmički moment (M_0)**. Seizmički moment se definiše kao apsolutna mjeru oslobođene energije, na tzv. **spektralnom nivou nulte frekvencije** seizmičkih talasa, a izražava se kompleksnim tenzorskim relacijama.

Mehanizam žarišta zemljotresa

Distribucija naponskog stanja u stenama u trenutku događanja tektonskog loma stijene, odnosno geneze zemljotresa, a samim tim i rasterećenja napona u zoni hipocentra, uslovjava karakterističan oblik longitudinalnog talasa (prvi otklon na seismogramu).

Naponsko stanje u stijenama može biti dvojako: stanje **kompresije** (sabijanje) ili **dilatacije** (istezanje). Cjelokupna zona žarišta zemljotresa prema teoriji tzv. **tačkastog izvorišta** seizmičkih talasa, u trenutku neposredno prije zemljotresa, polarisana je u 4 prostorna kvadranta sa ta dva različita naponska stanja. Seizmički talasi, koji u trenutku rasjedanja duž formirane rasjedne ravni, napuštaju žarište zemljotresa, nose informaciju o vrsti napona u dijelu žarišta gdje su generisani.

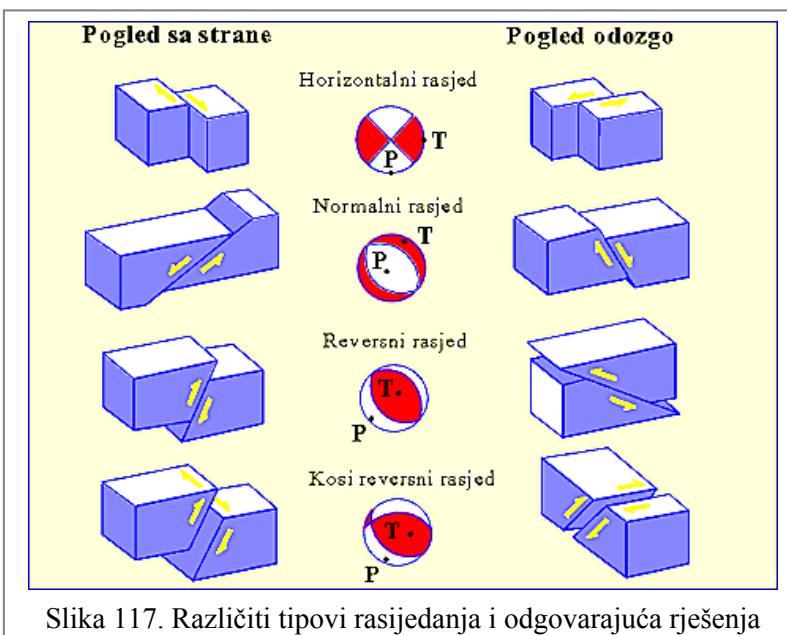
Na osnovu podataka o prostornom položaju seismoloških stanica sa kojih su prikupljeni podaci o polaritetu prve P-faze (koriste se i lokalne i teleseizmičke registracije) u odnosu na epicentar,



Slika 116. Šema procesa radijacije seizmičkih talasa u hipocentru zemljotresa u trenutku njegovog nastanka. Kompresioni kvadranti su zasjenjeni.

vrši se projektovanje na Šmitov (Schmittov) dijagram tog relativnog položaja stanica u odnosu na epicentar – u funkciji azimuta stanice i tzv. ugla emergencije (ugla koji zaklapa seizmički zrak sa vertikalom u tački u kojoj je napustio žarište). Položaj projekcije stanice na dijagramu označava se odgovarajućim simbolom – u zavisnosti od polariteta prve faze longitudinalnog talasa.

Matematičkom analizom ovih rezultata definiše se prostorni položaj dvije ortogonalne ravni koje će optimalno razdvojiti različite tipove podataka (kompresiju i dilataciju). Dobijeno rješenje za položaj ovih ravni ujedno definiše prostorni položaj 4 kvadranta u žarištu zemljotresa sa različitim napo-nskim stanjem. Raskidanje, odnosno rasijedanje stijenskih masa u žarištu, događa se uvijek duž jedne od dvije utvrđene nodalne ravni. Identifikacija pravog od dva dobijena rješenja za položaj ravni rasijedanja, utvrđuje se na osnovu orijentacije tog rasjeda koji je najčešće ranije kartografisan na terenu, ili na osnovu pravca u kojem su izdužene izoseiste (grafička predstava površinskih efekata) tog zemljotresa.



Slika 117. Različiti tipovi rasijedanja i odgovarajuća rješenja mehanizma žarišta (u sredini slike).

Rešenje mehanizma žarišta, pored azimuta pružanja rasjeda, sadrži i elemente pada rasjedne ravni i komponente vektora kliženja krila rasjeda. Na slici 117 prikazan je izgled rješenja mehanizma žarišta za četiri tipa rasijedanja.

Osnovni zadaci seismološke službe

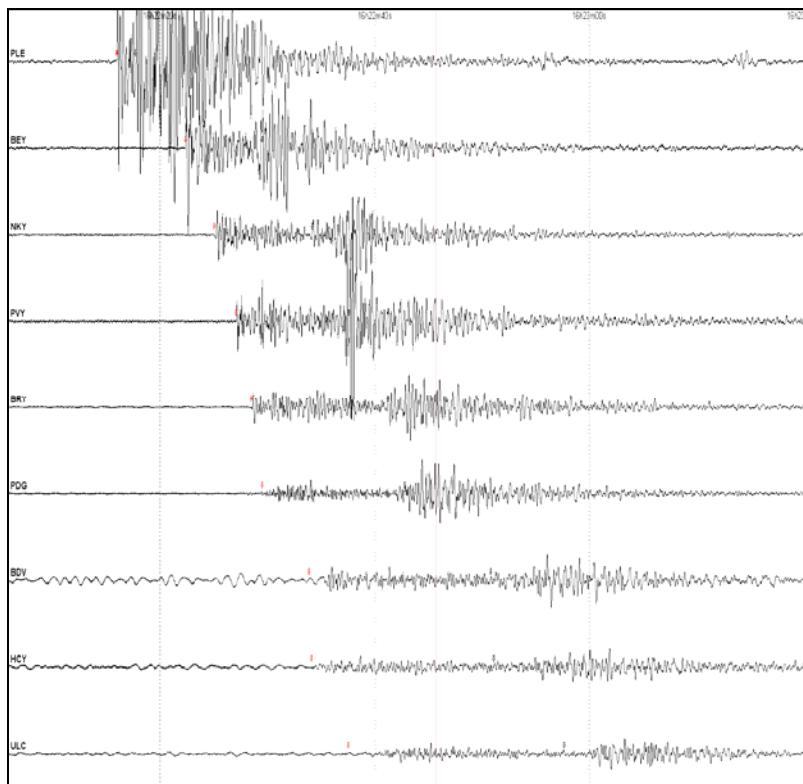
Osnovni zadaci seismološke službe na seismološkim opservatorijima su vrlo raznovrsni i obuhvataju sljedeće najznačajnije operacije:

- Održavanje tehničke ispravnosti seismoloških instrumenata i njihovog punog operativnog statusa;
- Periodično kalibriranje svih seismoloških instrumenata i izrada kalibracionih dijagrama uvećanja seismografa;
- Održavanje sistema tačnog vremena sa kojim su povezani seismografi;
- Registrovanje i analiza seizmičkih faza zemljotresa na svim seismogramima;
- Obrada rezultata analize i proračun parametara žarišta zemljotresa: lokacije žarišta, magnitude, mehanizma žarišta, intenziteta zemljotresa (na bazi empirijskih relacija);
- Izrada seismoloških biltena sa svim relevantnim podacima o registrovanim zemljotresima u određenom periodu: preliminarni bilten (sa podacima koji su definisani odmah nakon dogodenog zemljotresa) koji se izrađuje za kraći period vremena (10-30 dana) i finalni bilten (u kojem su sistematizovani svi podaci koji su detaljno analizirani i ponovo kompjuterski obrađeni) koji se vezuje za duži vremenski period – obično nekoliko mjeseci ili cijelu godinu;
- Izrada kataloga zemljotresa i karata epicentara za određene periode vremena i određene regije;

- Snimanje, sistematizacija i obrada makroseizmičkih podataka za zemljotrese sa intenzitetom iznad III stepena MCS skale;
- Statistička analiza seizmičke aktivnosti određenog regiona ili određene serije zemljotresa;
- Distribucija i razmjena podataka sa drugim seismološkim institucijama i regionalnim centrima.

Na svim većim branama, saglasno zakonskim normativima (tehničkim propisima) neophodno je obavljanje namenskih osmatranja indukovane seizmičnosti – pomoću seismografa i akcelerografa, koji su obično locirani na nekoliko nivoa brane, u cilju praćenja dinamičkih efekata zemljotresa na konstrukciju brane.

Savremeno seismološko osmatranje obuhvata i **telemetrijski sistem veze** stanica sa centrom u kojem se obavlja prijem i registrovanje podataka, koji može biti radio telemetrijski, telefonski ili satelitski. Proces registrovanja (akvizicije), analize seizmičkih signala i obrade podataka obično je takođe potpuno automatizovan, tako da u takvim uslovima seismolog ima ulogu kontrolora i vrši korekcije i poboljšanja rješenja u procesu identifikacije seizmičkih faza i upravlja dodatnim procesima obrade – kao što su proračuni mehanizma žarišta, Furijeova spektralna analiza seizmičkih signala, upravljanje izradom seismoloških biltena, izradom kataloga zemljotresa, karata epicentara i drugo. Na području Crne Gore danas je aktivna mreža sa 10 stalnih, telemetrijskih seismoloških stanica, sa automatskim digitalnim registrovanjem i obradom podataka.



Slika 118. Primjer digitalno registrovanih seismograma telemetrijskom mrežom stаница Crne Gore za zemljotres od 7.10.2002. god. u 14:22 (u blizini Prijepolja) sa magnitudom 2,8, čija je kompletna numerička obrada prikazana na slici 114.

Primjer digitalno registrovane serije seismograma za zemljotres u blizini Prijepolja (sa magnitudom 2,8) prikazan je na slici 118, a rezultati kompletne numerička i grafičke obrada na slici 114. Izgled jedne tipične savremene seismološkog opservatorijskog registracionog centra prikazan je na slici 119 na primjeru registracionoc centra Seismološkog zavoda Crne Gore u Podgorici, na kojoj je prikazan sistem analognog i digitalnog automatskog registrovanja seizmičke aktivnosti posredstvom mreže sa 10 terenskih seismoloških stаница.



Slika 119. Registracioni sistem mreže telemetrijskih seizmoloških stanica Crne Gore u Seizmološkom zavodu u Podgorici, sa analognim i dvostrukim digitalnim sistemom akvizicije podataka.

7.4. Inženjerska seizmologija

Inženjerska seizmologija obuhvata dio primijenjene seizmologije koji se bavi proučavanjem efekata zemljotresa na građevinskim objektima i tlu i definisanjem efikasnih i pouzdanih metoda izražavanja i kvantifikovanja parametara opšte seizmičnosti ili seizmičnosti na regionalnom nivou. Na lokalnom nivou, inženjerska seizmologija se bavi definisanjem seizmičkih parametara koji odražavaju efekte lokalnog tla u uslovima dejstva budućih snažnih zemljotresa, u cilju numeričkog izražavanja veličine seizmičke opasnosti na određenoj lokaciji. Saznanja iz ove oblasti seizmologije direktno se primjenjuju u **zemljotresnom inženjerstvu** – pri projektovanju i građenju **seizmički otpornih** građevinskih objekata, kao i pri urbanističkom planiranju prostora.

Pored ljudskih žrtava, snažni, razorni i katastrofalni zemljotresi izazivaju značajne, a često i destruktivne površinske efekte, koji se najčešće manifestuju na građevinskim objektima (zgradama, tunelima, saobraćajnicama, branama, pristanišnim dokovima, cjevovodima i dr.) ili u prirodi (u vidu odrona stijena, klizišta u tlu, pukotina, promjenom režima kretanja podzemnih i površinskih voda, promjenom oblika reljefa, pojavom **likvifakcije** /tečenje/ tla i sl.). Učinak zemljotresa na površi terena – na prirodnim i veštačkim objektima i ljudima, izražava se numerički – **intenzitetom** zemljotresa, na osnovu neke od seizmičkih skala.

Imajući u vidu sve navedene moguće štetne manifestacije zemljotresa, savremena seizmologija posvjećuje veliku pažnju izučavanju svih pomenutih efekata, ali i uzroka koji do njih dovode. Jedan od primarnih zadataka kod izučavanja ovih pojava je njihovo **makroseizmičko**⁸ dokumentovanje. Ovi rezultati se zatim izučavaju – primjenom odgovarajućih metodoloških postupaka – u cilju definisanja:

- matematičkog modela makroseizmičkog polja,
- amplifikacionog dejstva lokalnog tla,
- utvrđivanja funkcije povrjetljivosti objekata,
- potencijalnosti pojave likvifakcije tla i dr.



Slika 120. Hotel "Slavija" porušen u razornom zemljotresu od 15. aprila 1979. godine na crnogorskom primorju.

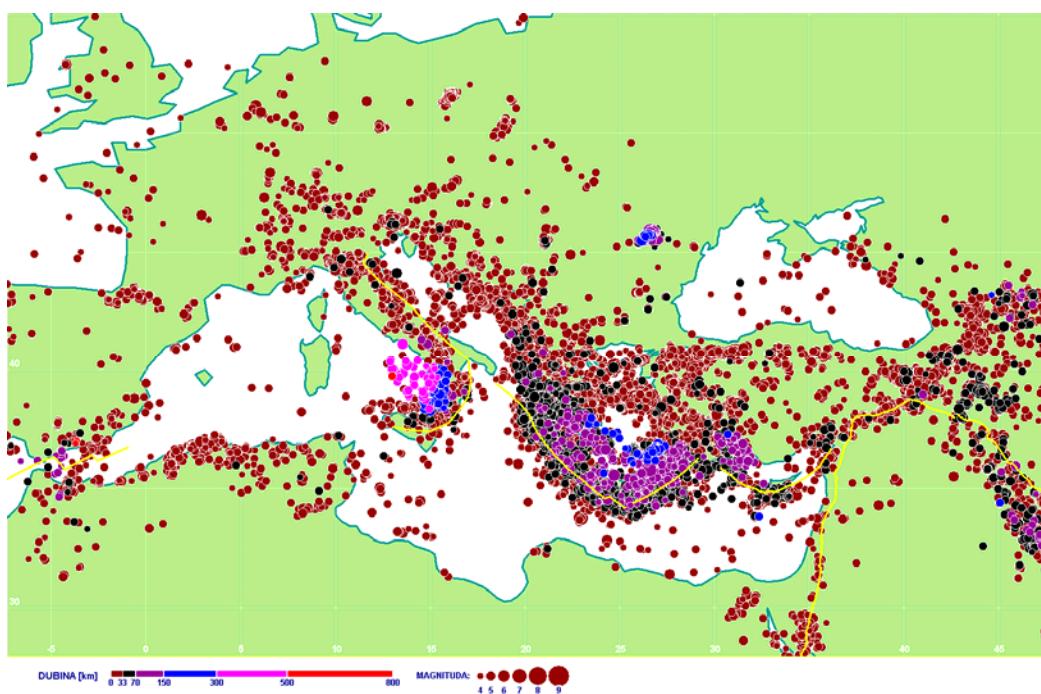
Seizmogenene karakteristike prostora južnih Dinarida i Crne Gore

Koncentracija napona u stijenama litosfere Dinarida ostvaruje se kompleksnim procesom kretanja segmenata litosfere u zoni jadranske mikroploče u smjeru poniranja subdukcione ploče Apenina - ka Tirenskom moru. S druge strane, snažni bočni pritisak stvara debeli sedimentni kompleks Jadrana opirući se horizontalnim deformacijama u regionu Jadrana i istovremeno izazivajući snažne tektonske reakcije u spoljašnjim i unutrašnjim Dinaridima (slika 121).

Kao rezultat ovakvih naprezanja, u stijenama spoljašnjih i unutrašnjih Dinarida, a time i na teritoriji Crne Gore, stvaraju se složeni tektonski procesi, praćeni brojnim slabijim, jačim i

⁸ Makroseizmika je segment seizmologije koji se bavi dokumentovanjem površinskih efekata zemljotresa i utvrđivanjem zakonitosti atenuacije (prigšenja) intenziteta zemljotresa sa epicentralnim rastojanjem.

razornim zemljotresima. Sistemi normalnih i reversnih rasjednih struktura gotovo redovno su orijentisani paralelno Dinaridima. Često se karakterišu regionalnim dimenzijama, sa padnim uglom ka kopnu - od 20 do 50 stepeni u odnosu na horizontalnu ravan.



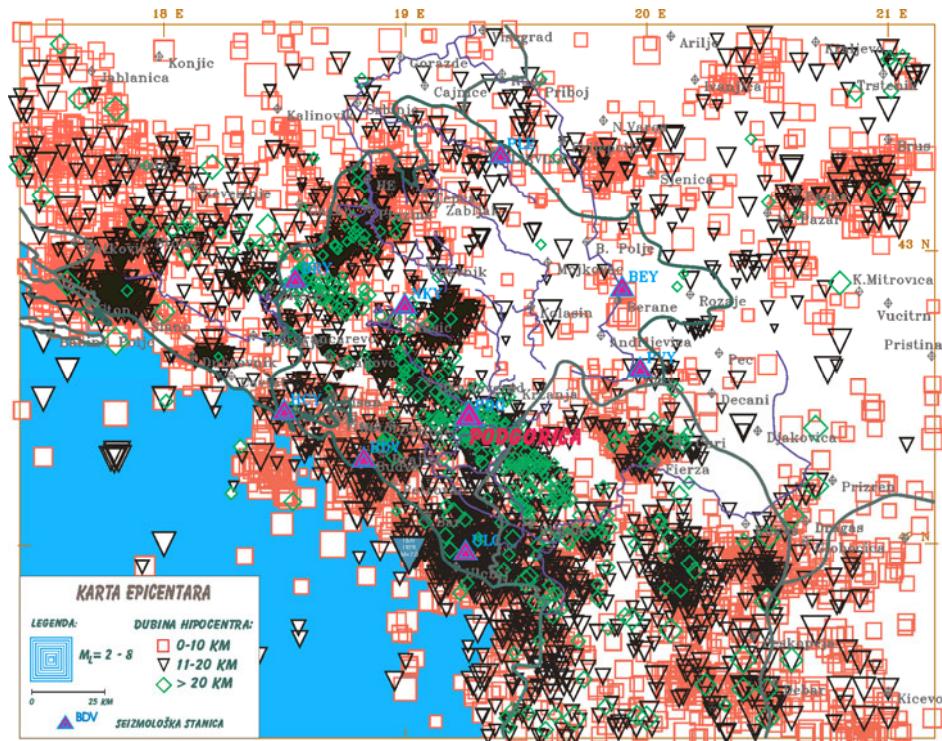
Slika 121. Karta epicentara područja Mediterana, za zemljotrese dogodene u periodu između 1973. i 2004. godine, sa magnitudom iznad 4,0.

Tokom bliže i dalje istorije, Crna Gora je bila više puta pogodena snažnim i katastrofalnim zemljotresima. Tako, na primjer, jugozapad Crne Gore je u brojnim trusnim katastrofama, više puta bio razaran tokom perioda XV-XVII vijek. Godine 1905. krajnji jugoistok bio je zahvaćen velikim razaranjima izazvanim skadarskim zemljotresom (sjeverna Albanija). Posljednji razorni i katastrofalni zemljotres na ovom području dogodio se 15. aprila 1979. godine, sa epicentrom u podmorju Jadrana, na oko 15 km od obale – u regionu gradova Bar - Ulcinj. Ovaj zemljotres je odnio ukupno 136 ljudskih žrtava i načinio ogromnu materijalnu štetu, razarajući brojne, kako stare, tako i nove građevinske objekte, kako individualne, tako i hotelske kapacitete i privredne resurse na cijelom crnogorskom primorju. Zemljotres je primorsku oblast zahvatio sa intenzitetom IX stepeni Merkalićeve (MCS) skale (ili ekvivalentne Evropske makroseizmičke skale), dok je zaleđe primorja bilo pogodeno intenzitetom VIII, a najveći preostali dio Crne Gore – intenzitetom VII stepeni te skale.

Karakter i intenzitet seizmičke aktivnosti na prostoru južnih Dinarida najbolje izražava karta epicentara zemljotresa koji su se dogodili u periodu od XV vijeka do 2004. godine u ovom regionu (122). Na ovoj karti, za period od početka ovog vijeka do 1982. godine, prikazani su samo jači zemljotresi, sa magnitudom iznad 3.5 (Rihterovih jedinica), dok je za interval 1983. – 2004. godina prikazana seizmička aktivnost iznad magnitudo 2 (na osnovu podataka mreže telemetrijskih seismoloških stanica u Crnoj Gori, koja je instalirana krajem 1982. godine).

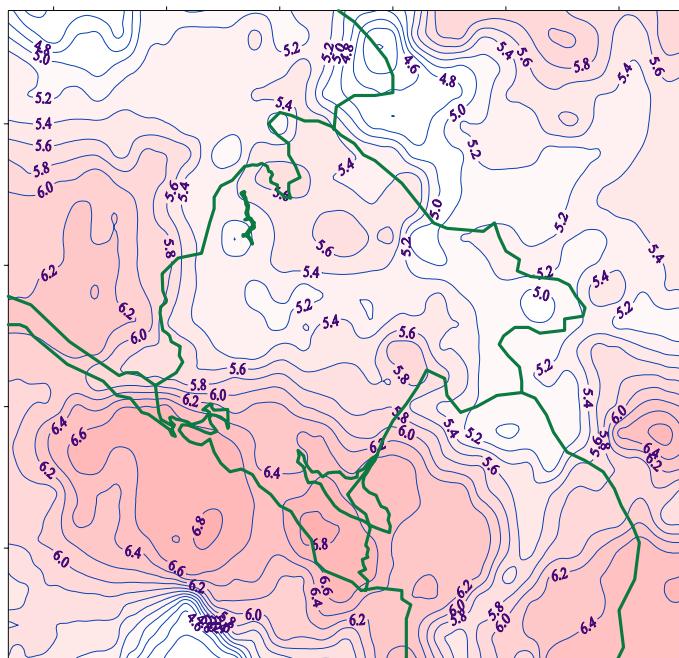
Na ovoj slici je uočljivo da praktično čitav prostor južnih Dinarida je prekriven seizmičkim žarištima. Međutim, ova žarišta se karakterišu vrlo različitim stepenom seizmičkog potencijala. Takođe se može uočiti da je dominantni dio seizmičke aktivnosti lociran u kopnenom dijelu Dinarida, pri čemu se centralni dio jadranske mikroploče u zoni južnog dijela Jadrana manifestuje praktično aseizmično (slika 121). Ova pojava se može tumačiti prisustvom veoma debelog sedimentnog kompleksa u južnojadranskom basenu (gdje sedimenti dostižu debljinu od 22 kilometra), ali i prisustvom krute, relativno debele bazaltne ploče u zoni dubokog dijela

Jadranskog mora, što je utvrđeno interpretacijom anomalnog ponašanja longitudinalnih seizmičkih talasa u ovom dijelu litosfere.



Slika 122. Epicentri zemljotresa na prostoru Crne Gore i okruženja do 2004. godine.

Kao što se može zapaziti na karti epicentara, kao i na karti očekivanih zemljotresa sa maksimalnim magnitudama u narednih 100 godina (slika 123) priobalni dio Crne Gore posjeduje značajno viši seizmogeni potencijal. Zemljotresi sa magnitudom iznad 6,5 se mogu, sa visokom dozom vjerovatnoće od 70%, očekivati i u narednom periodu od 100 godina, praktično na cijelom crnogorskom primorju i neposrednom zaleđu. Seizmogeni potencijal prostora Crne Gore lagano opada ka unutrašnjosti, tako da na krajnjem sjeveru očekivane maksimalne magnitude zemljotresa u narednih 100 godina ne prevazilaze vrijednosti od 5,5 (slika 123).

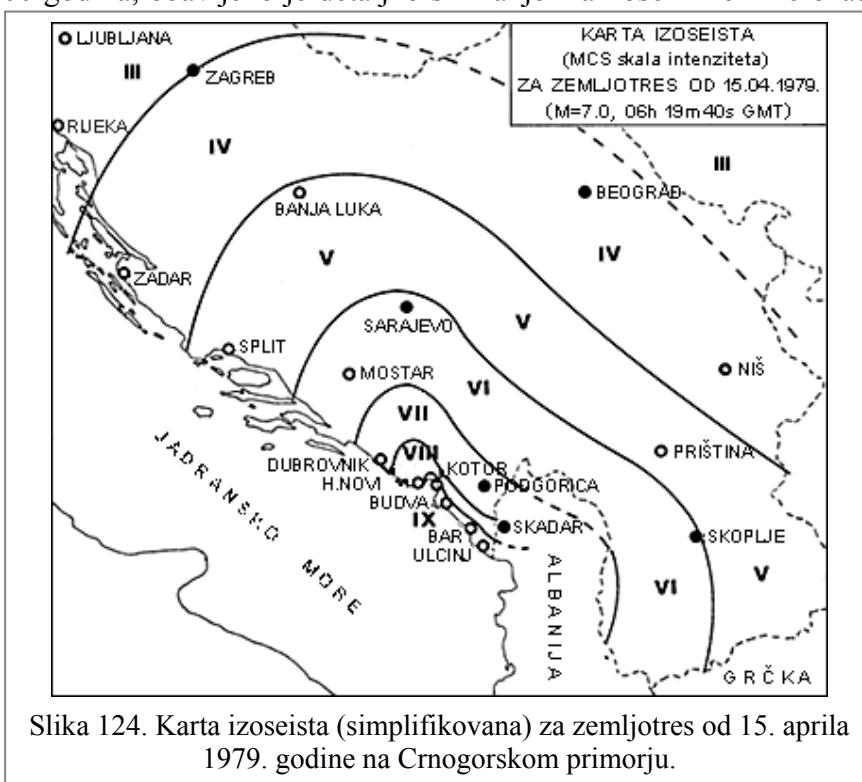


Slika 123. Karta očekivanih zemljotresa sa maksimalnim magnitudama u okviru povratnog perioda od 100 godina, sa vjerovatnoćom realizacije od 70 %.

INTENZITET ZEMLJOTRESA

Za veliki broj snažnih zemljotresa, koji su se dogodili na području centralnog i zapadnog Balkana tokom prethodnih 100 godina, obavljeno je detaljno snimanje makroseizmičkih efekata na građevinskim objektima i tlu. Na bazi ovih rezultata, izvršeno je njihovo kartografsanje, u vidu karata **izoseista**. Izoseiste predstavljaju zone ili površi (a ne linije), koje su u nekom zemljotresu okarakterisane istim stepenom intenziteta (slika 124).

Radi numeričkog izražavanja površinskih efekata, danas je u upotrebi nekoliko seizmičkih skala. Na području prethodne (SFR) Jugoslavije bile su korišćene dvije podudarne skale: **MCS skala** ili Merkali – Kankani – Ziberg (Mercalli-Cancani - Siebeg) i znatno detaljnija **MSK – 64** (Medvedev – Sponhauer - Karnik) ili skala Instituta Fizike Zemlje SSSR, koje su izražene u rasponu od 1 do 12 podeoka. U Evropskoj Uniji, kao i od skora u Srbiji i Crnoj Gori, koristi se tzv. **EMS-98 skala** (Evropska Makroseizmička Skala iz 1998. godine), takođe sa 12 podeoka. U Sjedinjenim Američkim Državama u primjeni je tzv. MM skala (modifikovana Merkalijeva) koja takođe ima 12 podeoka. U Japanu se koristi tzv. japanska skala sa 7 podeoka.



Slika 124. Karta izoseista (simplifikovana) za zemljotres od 15. aprila 1979. godine na Crnogorskem primorju.

U Tabeli 10 prikazani su osnovni elementi EMS-98 (odnosno MCS) skale, u kojoj su pored stepena intenziteta zemljotresa izražena ekvivalentna maksimalna horizontalna ubrzanja tla i opis tipičnih i karakterističnih efekata zemljotresa na ljudima i objektima.

Makroseizmički intenzitet (I), kao funkcija epicentralnog rastojanja (Δ) i magnitude zemljotresa (M), najčešće se izražava u opštem, najjednostavnijem obliku kao:

$$I = a_1 + a_2 \log(\Delta) + a_3 M \quad [\text{EMS-98}]$$

STEPEN	OSNOVNI EFEKTI ZEMLJOTRESA	MAKSIMALNO UBRZANJE (m/s ²)
I	Zemljotres registruju samo seismografi.	< 0,0025
II	Reaguju samo vrlo osjetljive osobe u mirovanju.	0,0025 – 0,0050
III	Zemljotres osjeti više ljudi u unutrašnjosti zgrada.	0,005 – 0,010
IV	U kućama ga osjeti veći deo stanovnika, a na otvorenom samo pojedinci. Posuđe i prozori zvečkaju. Pojedinci se bude iz sna.	0,010 – 0,025
V	Zemljotres osjete mnogi i na otvorenom prostoru. Predmeti koji slobodno vise – zanjišu se. Kod pojedinaca izaziva manju paniku.	0,025 - 0,050
VI	Potresanje osjete sve osobe i bježe iz kuća. Slike padaju sa zidova. Na slabijim zgradama nastaju manja oštećenja.	0,05 – 0,10
VII	Nastaju rušenja i razaranja uz znatne štete na namještaju u stanovima. Oštećenja se javljaju i na kvalitetnijim kućama. Ruše se dimnjaci na kućama, padaju crepovi.	0,10 – 0,25
VIII	Javlja se oštećenje na oko 25% kuća, neke slabije se ruše. U vlažnom tlu i padinama javljaju se manje pukotine.	0,25 – 0,50
IX	Oko 50% zidanih kuća znatno je oštećeno, mnoge se ruše, a većina je neupotrebljiva za dalje stanovanje.	0,50 – 1,00
X	Teška oštećenja nastaju na oko 75% zgrada, a većina njih se ruši. U tlu nastaju pukotine široke do nekoliko cm. Sa padina se odronjavaju stijene, stvaraju se velika klizišta u tlu.	1,00 – 2,50
XI	Ruše se sve zidane zgrade. U tlu nastaju široke pukotine iz kojih prodire voda sa pijeskom i muljem. Javlja se veliko odronjavanje.	2,50 – 5,00
XII	Nijedan vještački objekat ne može opstati. Tlo i reljef mijenjaju izgled, zatrپavaju se jezera, rijeke mijenjaju korita.	5,0 – 10,0

TABELA 10: Skraćeni oblik skale intenziteta EMS98 (i MCS)

Koefficijenti a_1 , a_2 i a_3 u gornjoj relaciji makroseizmičkog polja određuju se numeričkom analizom osmotrenih efekata zemljotresa, odnosno sadržaja karata izoseista. Tako, na primjer, za unutrašnji dio Dinarida dobijena je sljedeća jednačina makroseizmičkog polja:

$$I = 3,28 + 1,424 \cdot M - 3,56 \cdot \log(\Delta) \quad [\text{EMS-98}]$$

Dakle, empirijske formule makroseizmičkog polja omogućuju da se na osnovu magnitude i položaja epicentara dogodenog zemljotresa, predviđi distribucija intenziteta i prouzrokovanih površinskih efekata u uslovima tzv. srednjeg tla.

ZEMLJOTRESI SA NAJVEĆIM BROJEM ŽRTAVA TOKOM PRETHODNIH 100 GODINA

Tabela 11

Datum	Epicentar	Broj žrtava	Magnituda
1905. 04. apr.	Indija, Kangra	19.000	8,6
1906. 17. avg.	Čile, Santiago	20.000	8,6
1908. 28. dec.	Italija, Mesina	70.000-100.000	7,5
1915. 13. jan.	Italija, Avezano	29.980	7,5
1920. 16. dec.	Kina, Gansu	200.000	8,6
1923. 01. sep.	Japan, Kwanto	143.000	8,3

1927. 22. maj	Kina, Xinjiang	200.000	8,3
1932. 25. dec.	Kina, Gansu	70.000	7,6
1934. 15. jan.	Indija, Bihar-Nepal	10.700	8,4
1935. 30. maj	Pakistan, Quetta	30.000-60.000	7,5
1939. 25. jan.	Čile, Chillan	28.000	8,3
1939. 26. dec.	Turska, Erzincan	30.000	8,0
1960. 29. feb.	Maroko, Agadir	10.000-15.000	5,9
1962. 01. sep.	Iran, Qazvin	12.230	7,3
1968. 31. avg.	Iran	12.000-20.000	7,3
1970. 04. jan.	Kina, Yunnan provincija	10.000	7,5
1970. 31. maj.	Peru	66.000	7,8
1976. 04. feb.	Gvatemala	23.000	7,5
1976. 27. jul.	Kina, Tangshan	255.000	8,0
1978. 16. sep.	Iran	15.000	7,8
1988. 07. dec.	Turska-USSR granični region	25.000	7,0
1990. 20. jun	Zapadni Iran	40.000	7,7
1999. 17. avg.	Turska, Izmit	30.000	7,6
2003. 26. dec.	Bam, Iran	43.000	6,5
1963. 26. jul	Makedonija, Skoplje	1.070	6,1
1979. 15. april	Crnogorsko primorje	136	7,0

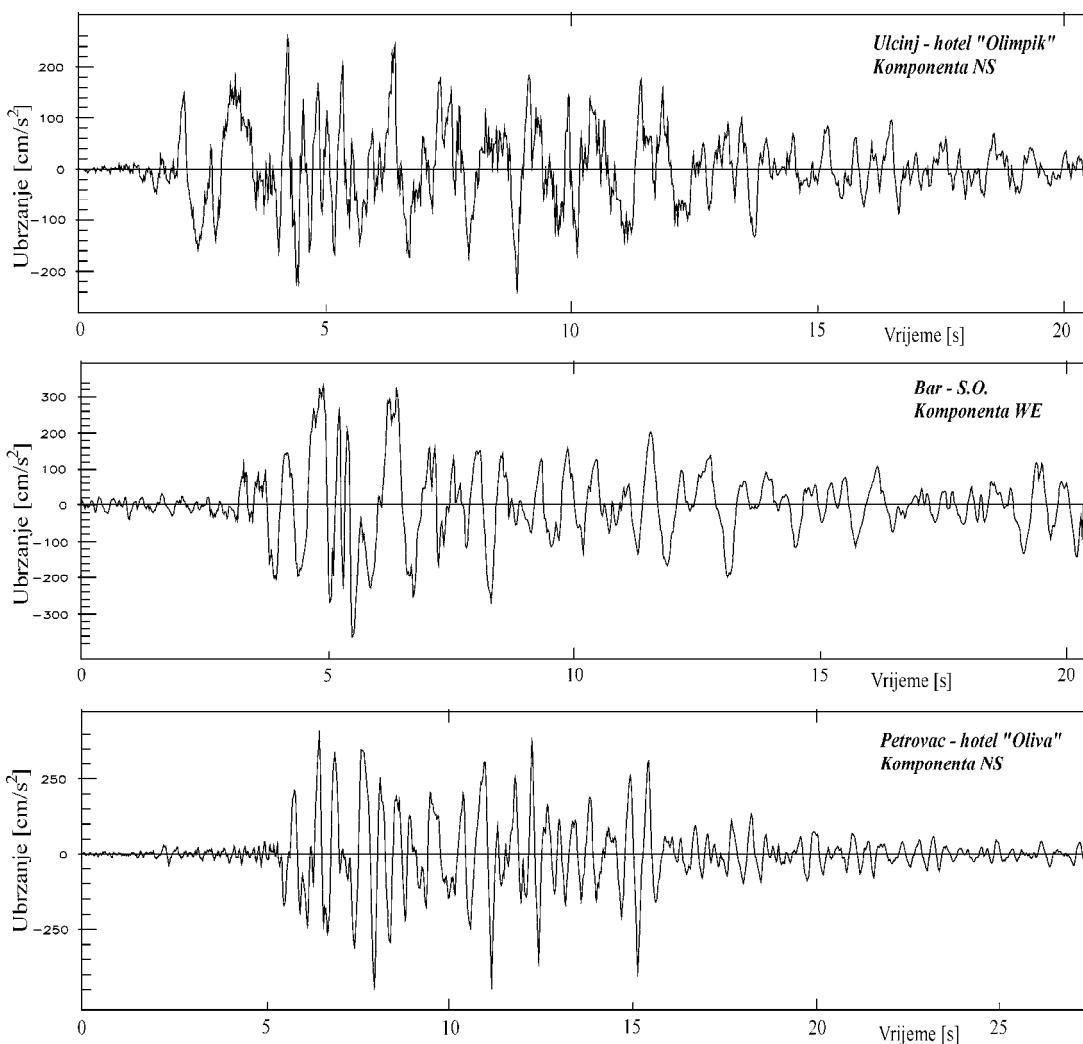
UBRZANJE TLA

Kao što je naglašeno u dijelu o seizmometriji, pomoću akcelerografa se registruju istorije ubrzanja tla, odnosno akcelerogrami. Danas se u radu na terenu nalazi veliki broj trokomponentnih akcelerografa, na kojima se registrovanje ubrzanja tla obavlja u digitalnom obliku na magnetnim medijumima (rjeđe u analognom obliku - na foto-filmu). Na slici 124 su prikazani primjeri tri akcelerograma za zemljotres od 15. 04. 1979. godine ($M_L = 7,0$) na crnogorskom primorju, koji su registrovani u Ulcinju, Baru i Petrovcu.

Zbog potrebe analitičkog izražavanja promjene ubrzanja tla pri dejstvu zemljotresa, u funkciji epicentralnog rastojanja i magnitude zemljotresa, do sada su obavljena brojna istraživanja i definisane brojne empirijske relacije, za određene regije u Svetu. Opšti oblik tih relacija najčešće ima sljedeći izgled:

$$a = \frac{A + B \cdot e^{C \cdot M}}{(\Delta + E \cdot M)^F}$$

pri čemu (**a**) izražava maksimalno horizontalno ubrzanje tla pri dejstvu zemljotresa sa magnitudom M , na epicentralnom rastojanju Δ , dok A , B , C , E i F predstavljaju konstante empirijske relacije, koje se utvrđuju najčešće primjenom metode najmanjih kvadrata na podatke o registrovanim maksimalnim horizontalnim ubrzanjima u regionu.



Slika 125. Akcelerogrami (horizontalne komponente) registrovani na crnogorskom primorju, u zemljotresu od 15. 04. 1979. godine ($M_L = 7,0$) u: Ulcinju, Baru i Petrovcu.

Sistematisacijom i numeričkom obradom svih raspoloživih podataka registracija maksimalnog horizontalnog ubrzanja tla pri dejstvu zemljotresa na području SFR Jugoslavije dobijena je sljedeća empirijska relacija, koja izražava ubrzanje tla (a) u funkciji magnitude (M) zemljotresa i hipocentralnog rastojanja (D):

$$a = \frac{6,70 \cdot \exp(1,05 \cdot M + 1,65/M)}{[D + 35 + 0,17 \exp(0,65M)]^{2,56}}$$

Ubrzanje a u ovoj jednačini izraženo je u djelovima ubrzanja sile Zemljine teže ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$).

OSTALE POJAVE PRI DEJSTVU ZEMLJOTRESA

Snažni zemljotresi najčešće su, pored već opisanih pojava, praćeni i nekim drugim, kao što su: zvučne manifestacije ili **brontidi**, zatim formiranje **cunami talasa**, **likvifikacija**, **kliženje tla**, **odronjavajuće stijena** i dr.

Brotidi predstavljaju zvučnu manifestaciju dijela kratkoperiodičnih longitudinalnih seizmičkih talasa (frekvencije iznad 16 Hz), a javljaju se pri njihovom izbijanju na Zemljinu površ. Brontidi se najčešće zapažaju u obliku podzemne tutnjave i to češće kod jačih zemljotresa, ali se javljaju i kod slabijih – posebno u epicentralnoj zoni.

Cunami talase smo već diskutovali u poglavljju o hidrosferi (4.2).

Likvifakcija tla predstavlja pojavu prelaza tla iz nevezanog stanja (pijesak i mulj) u tečno stanje u uslovima prisustva podzemne vode, što se manifestuje u uslovima snažnog potresanja tla pri dejstvu zemljotresa. Pojava je manifestovana djelimičnim ili potpunim gubitkom svojstva nosivosti tla, a često je praćena izbacivanjem pijeska sa vodom kroz pukotine u tlu. Ova pojava je zapažena, na primjer u crnogorskom zemljotresu od 15. aprila 1979. godine, na obalama skadarskog jezera. Sa aspekta stabilnosti konstrukcija, ova pojava je uvijek vrlo štetna po objekte koji su fundirani u takvom tlu. Na slici 126 je prikazan markantan primjer štetnog efekta likvi-fakcije tla u zemljotresu koji je 1964. godine pogodio grad Niigata u Japanu, pri čemu su konstruktivno očuvani objekti potonuli ili se nagnuli.



Slika 126. Štetan efekat likvifakcije tla u zemljotresu iz 1964. godine kod grada Niigata u Japanu.

Ostale pojave pri dejstvu zemljotresa, kao što su kliženje tla, odronjavanja stijena i dr. prikazali smo u okviru inženjerske geologije i geoloških procesa.

SEIZMIČKO REJONIRANJE

Seizmičko rejoniranje obuhvata koncipiranje i primjenu seismoloških i odgovarajućih geoloških kriterijuma ocjene seizmičke opasnosti na određenom području, kao i niz postupaka rejonizacije tih područja, na zone različitih seizmičkih svojstava. Zavisno od detaljnosti i vrste istraživanja, razlikujemo postupak i metode **seizmičke regionalizacije** i **seizmičke mikrorejonizacije**.

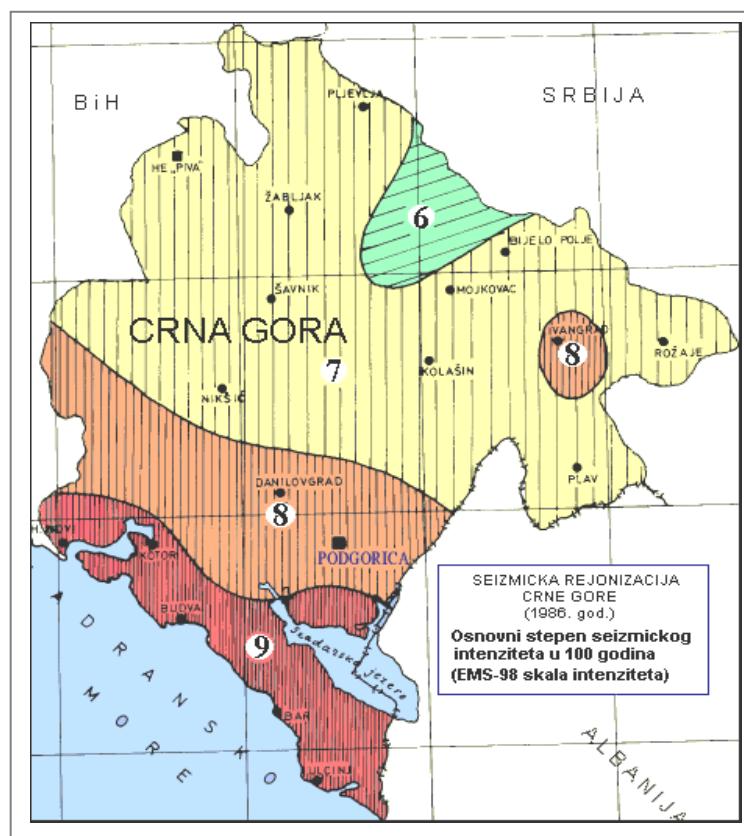
Za izradu kvalitetne seizmičke regionalizacije (ili rejonizacije) određenog područja (na primjer teritorije jedne republike ili većeg regiona) potrebno je izvršiti detaljna prethodna seizmička proučavanja tog regiona. Kao najznačajnija, navedimo sljedeća: izrada kataloga dogodenih zemljotresa u regionu i susjednim seizmički uticajnim zonama za što duži vremenski period (obično se obuhvataju periodi od nekoliko stotina godina unazad), zatim izrada karte epicentara zemljotresa, karte maksimalnih dogodenih makroseizmičkih initenziteta zemljotresa, karte maksimalnih registrovanih ubrzanja tla, karte maksimalnih izoseista zemljotresa, analizu mehanizama žarišta jačih zemljotresa u regionu, izrada seizmotektonske karte, neotektonske karte i dr.

Finalni produkt postupka seizmičke regionalizacije predstavlja **karta seizmičke regionalizacije (ili rejonizacije)** (slika 127).

Često se u praksi postupak izrade seizmičke regionalizacije naziva definisanjem seizmičkih parametara na osnovnoj stijeni, u regionalnom smislu.

Katalog zemljotresa predstavlja sistematizovan, hronološki popis svih zemljotresa iznad određene magnitude, koji su se dogodili u proučavanom regionu, u određenom periodu vremena. Podaci sistematizovani u katalogu zemljotresa koriste se za proučavanje seizmičkog režima regiona, što zapravo predstavlja primjenu statističkih metoda obrade seizmoloških podataka i utvrđivanje numeričkih karakteristika režima generisanja zemljotresa u regionu.

Učestanost pojavljivanja zemljotresa u određenom regionu i veličine njihovih magnituda, zavise od seizmogenih karakteristika žarišnih zona. Zbog toga se proučavanjem zakonitosti pojavljivanja zemljotresa, u seizmičkim regionima, primjenom statističkih metoda analize podataka, mogu posredno izučavati seizmogene karakteristike seizmoaktivnih zona.



Slika 127. Karta seizmičke rejonalizacije teritorije Crne Gore.

Pri statističkoj analizi seizmičkog režima određenog regiona, uvodimo prepostavku o *stacionarnosti procesa pojavljivanja* zemljotresa, odnosno prepostavljamo da je posmatrana prethodna seizmička aktivnost regiona (u analiziranom periodu vremena) reprezentativna i za toliki budući period vremena. Ova prepostavka, dakle, omogućuje vremensku eksploraciju utvrđenog seizmičkog režima regiona u narednom periodu.

Proces pojavljivanja zemljotresa, sa statističkog stanovišta, predstavlja jedan *stohastički proces*, odnosno matematički model datog fizičkog sistema koji se mijenja saglasno zakonima vjerovatnoće. Tako, na primjer, Poasonov (Poisson) statistički proces predstavlja jedan diskretni (prekidan) statistički proces koji izražava položaj pojedinačnog slučajnog događaja (u našem slučaju pojave zemljotresa) u vremenu. Na bazi rezultata osmatranja stvarne seizmičke aktivnosti. Poasonov proces omogućuje statističku prognozu za definisanje seizmičkog režima (karaktera) regiona. Empirijski pristup proučavanju učestanosti pojavljivanja zemljotresa u zavisnosti od magnitudne tog zemljotresa pokazuje da dijagram kumulativne raspodjele magnitudo dogođenih zemljotresa poseduje linearno-logaritamsku zavisnost od veličine magnitudo zemljotresa (Gutenberg-Rihterova relacija), odnosno da se može izraziti u obliku:

$$\log N(M) = a - b \cdot M$$

gdje N predstavlja ukupan broj zemljotresa (kumulativni broj) registrovanih u nekom periodu vremena, sa magnitudom manjom ili jednakom M , dok a i b predstavljaju konstante relacije, a njihove numeričke vrijednosti su uslovljene fizikalnim režimom regiona.

Gornja relacija omogućuje određivanje maksimalne moguće magnitudo zemljotresa u regionu, na

$$\text{osnovu odnosa (za } N=1\text{): } M_{\max} = \frac{a}{b}$$

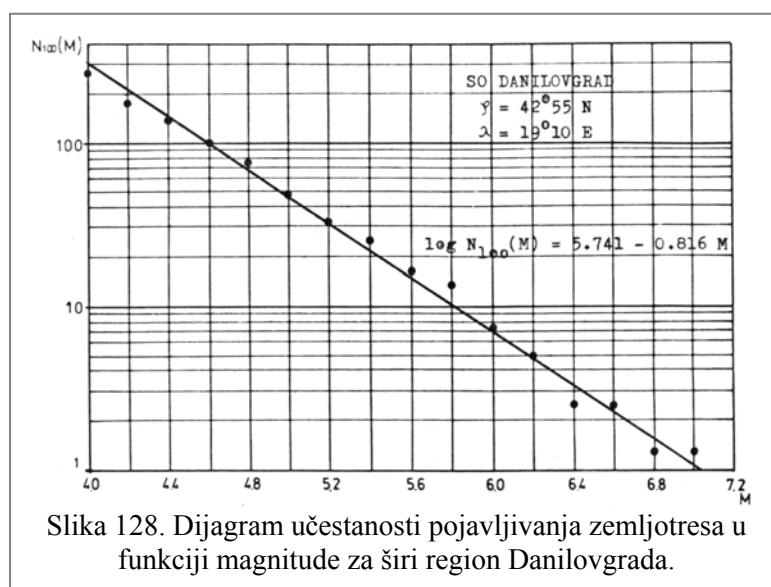
Na slici 128. prikazani je primjer dijagrama zakonitosti pojavljivanja zemljotresa na širem prostoru seizmogene zone Danilovgrada i odgovarajuća relacija ponovljivosti zemljotresa. Pri tome je, kao što je to uobičajeno u praksi, broj registrovanih zemljotresa normiran za period od 100 godina, radi standardizovanog izražavanja.

Povratni period vremena zemljotresa (T) određene magnitudo (M) može se izraziti na osnovu utvrđene funkcije kumulativne distribucije, u obliku: $T = \frac{100}{N_{100}}$

Tako, na primjer, za seizmogene zone u širem regionu Danilovgrada, na osnovu ovog izraza i parametara prikazanih na slici 128, dobijamo jednačinu povratnog perioda vremena zemljotresa magnitude M :

$$\log(T) = 0,816 \cdot M - 3,74 \quad [T(\text{god.})]$$

na osnovu koje možemo odrediti povratni period zemljotresa bilo koje magnitude.



Slika 128. Dijagram učestanosti pojavljivanja zemljotresa u funkciji magnitudo za širi region Danilovgrada.

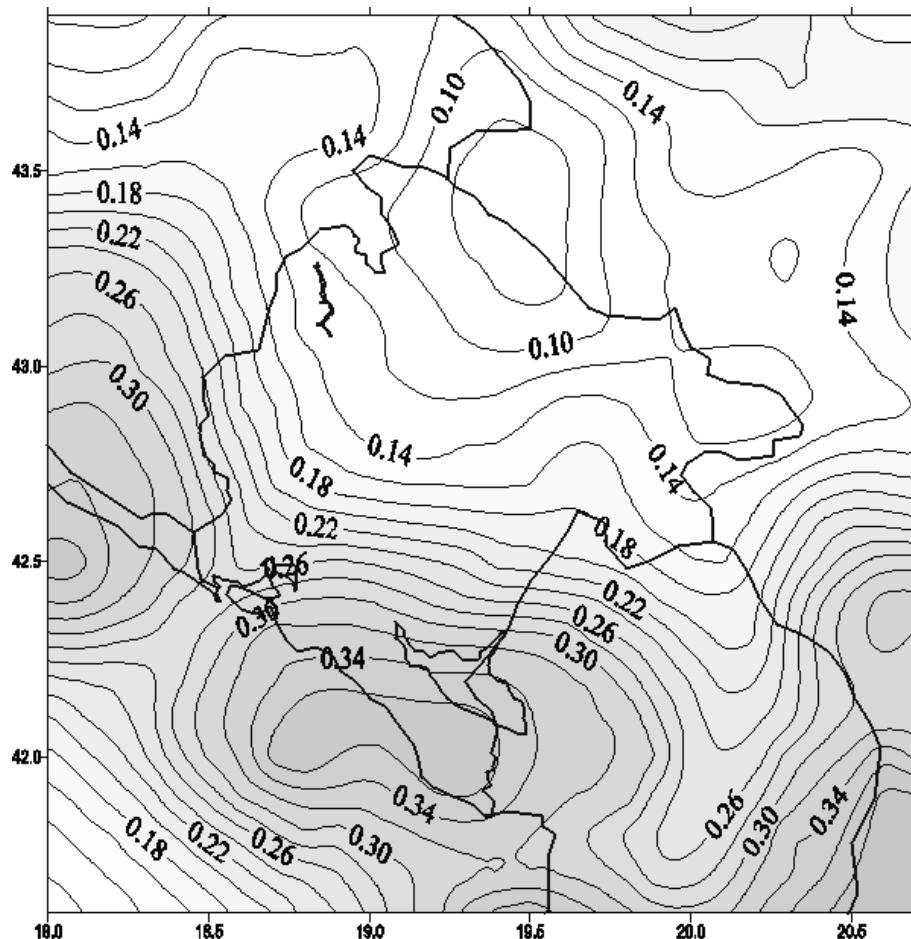
ELEMENTI SEIZMIČKOG HAZARDA

Seizmički hazard, kao dio ukupnog prirodnog hazarda, prema opšte prihvaćenoj definiciji grupe eksperata UNDRO-a (UNDRO 1979.) predstavlja *vjerovatnoću pojavljivanja – u okviru određenog perioda vremena i na određenom mjestu – zemljotresa određenih karakteristika, koji će se na specifičan način manifestovati na nekoj lokaciji*.

Smisao i značenje seizmičkog hazarda možemo preciznije izraziti kao **vjerovatnoću** da će **amplituda** određenog parametra oscilovanja tla pri dejstvu zemljotresa, dostići (ali ne i prevazići) određeni nivo, u okviru određenog **povratnog perioda vremena**. Dakle, seizmički hazard se izražava sa tri međusobno zavisna elementa: **amplitudom kretanja tla** (npr. ubrzanje tla, brzina oscilovanja ili intenzitet zemljotresa) zatim **povratnim periodom vremena** i **vjerovatnoćom realizacije** takvog događaja. Zbog toga je, pri izučavanju seizmičkog hazarda, neophodno prikazati sva tri elementa, ali je moguće eksplicitno izraziti bilo koji od njih u funkciji druga dva. Tako se na primjer, najčešće se izražava maksimalno ubrzanje zemljotresa u okvidu određenog povratnog perioda vremena, sa definisanim nivoom vjerovatnoće realizacije. Parametri seizmičkog hazarda često se uslovno nazivaju i **seizmičkim parametrima na osnovnoj stijeni**. Pod **osnovnom stijenom** podrazumeva se stijena koja ima visoke vrijednosti elastičnih svojstava (odnosno brzine transverzalnih talasa) a definiše se zavisno od opštih geoloških i geofizičkih karakteristika dominantnih stijena u širem regionu (npr. teritorija republike).

Za kvantitativno izražavanje seizmičkog hazarda koristi se veći broj numeričkih metoda sa različitim pristupima i uslovima neophodnim za njihovu realizaciju. Izbor određene metodologije obrade uslovljen je, primarno, karakteristikama ulaznih podataka, koje čine relevantni elementi registrovane i očekivane seizmičnosti proučavanog regiona, a njihova primjena za proračun elemenata seizmičkog hazarda, zasnovana je na korišćenju odgovarajućeg matematičkog modela seizmičnosti regiona, koji sadrži elemente seizmičkog režima za svaku seizmogenu zonu pojedinačno, kao i geometriju (prostorni položaj i dimenzije) zone.

Dakle, kada se raspolaže svim izloženim karakteristikama seizmičnosti regiona i empirijskim relacijama kojima se izražava zavisnost određenog seizmičkog parametra od epicentralnog rastojanja i magnitude zemljotresa, moguće je izvršiti matematičko simuliranje pojave zemljotresa u bilo kojoj tački bilo koje seizmogene zone i sračunati seizmički efekat takvog zemljotresa u bilo kojoj tački regiona. Postupak proračuna parametara seizmičkog hazarda upravo koristi takav metod – pri čemu se obavlja sistematsko simuliranje generisanja zemljotresa u svakom elementu svake seizmogene zone, a u mreži tačaka regiona obavlja se proračun seizmičkog efekta takvih mogućih zemljotresa.



Slika 129. Primjer karte očekivanih maksimalnih horizontalnih ubrzanja tla za povratni period od 475 godina (što je po EUROCOD-u 8 standardni period u Evropskoj Uniji), sa vjerovatnoćom realizacije od 70 % za teritoriju Crne Gore. Ubrzanje je izraženo u djelovima gravitacionog ubrzanja Zemlje (g).

Nakon statističkog grupisanja kumulativnih efekata ovog proračuna, vrši se statistička analiza dobijene kumulativne distribucije primjenom odgovarajućeg statističkog modela. Rezultati ove analize omogućuju statističku prognozu veličine maksimalnih efekata zemljotresa (obično maksimalno ubrzanje tla ili maksimalni intenzitet zemljotresa) u bilo kojoj tački regiona – što zapravo čini elemente seizmičkog hazarda.

Karta seizmičke regionalizacije određenog područja izrađuje se na osnovu sumiranja rezultata istraživanja sadržanih u svim navedenim osnovama, karatama i analizama (slika 127 i 129). Takva karta izražava očekivane maksimalne intenzitete ili horizontalna ubrzanja ***u uslovima tzv. srednjeg tla*** ili ***čvrste stijene***, za određeni povratni period vremena, najčešće od 50, 100, 200 i više godina. Pod ***srednjim tлом*** podrazumijeva se neko fiktivno tlo, koje po svojim geološkim i seizmičkim karakteristikama odgovara prosječnim vrijednostima najzastupljenijeg tla u regionu. Istovremeno, srednje tlo sadrži i parametar dubine podzemne vode, koji se utvrđuje kao

prosječna vrijednost dubine podzemne vode u najzastupljenijem tlu u regionu. Parametri srednjeg tla se određuju kao ponderisane srednje vrijednosti prostorne zastupljenosti tla, parametra brzine prostiranja transverzalnih i longitudinalnih seizmičkih talasa i zapreminske težine, u okviru svih raspoloživih podataka u regionu.

SEIZMIČKA MIKROREJONIZACIJA

Pored regionalnih seizmičkih karakteristika terena, koje smo diskutovali u prethodnom tekstu, za utvrđivanje ukupne seizmičke opasnosti na određenoj lokaciji, neophodno je definisati i numerički izraziti uticaj lokalnih seismogeoloških svojstava tla lokacije pri dejstvu zemljotresa. Naime, poznato je da lokalne promjene u elastičnim svojstvima tla značajno utiču na modifikovanje amplitudno-frekventnog sastava seizmičkih talasa koji su registrovani u uslovima lokalne geotehničke sredine, u odnosu na čvrstu (osnovnu) stijenu ispod mekog tla lokacije. Zbog toga se u inženjersko-seizmološkoj praksi posebna pažnja posvećuje istraživanju seismogeoloških karakteristika lokacije. Na osnovu terenskih mjerjenja brzine prostiranja seizmičkih talasa i rezultata istražnog bušenja i laboratorijskog geomehaničkog ispitivanja, vrši se konstruisanje geodinamičkog modela tla lokacije. Ovaj model se zatim koristi za analizu uticaja lokalne geotehničke sredine na amplitudni i frekventni sastav seizmičkih talasa koje će generisati neki budući zemljotresi, čije karakteristike su već izražene regionalnim parametrima seizmičnosti.

Kao što je naglašeno, u okviru prvog koraka pri istraživanju seizmičkih efekata lokalne geotehničke sredine na nekoj lokaciji, terenskim ispitivanjima neophodno je utvrditi relevantne parametre geodinamičkog modela lokacije, što zapravo obuhvata: **geometriju modela** (položaj granica slojeva u modelu), **brzine transverzalnih seizmičkih talasa** u svakom sloju i **zapreminske težine tla** svih slojeva.

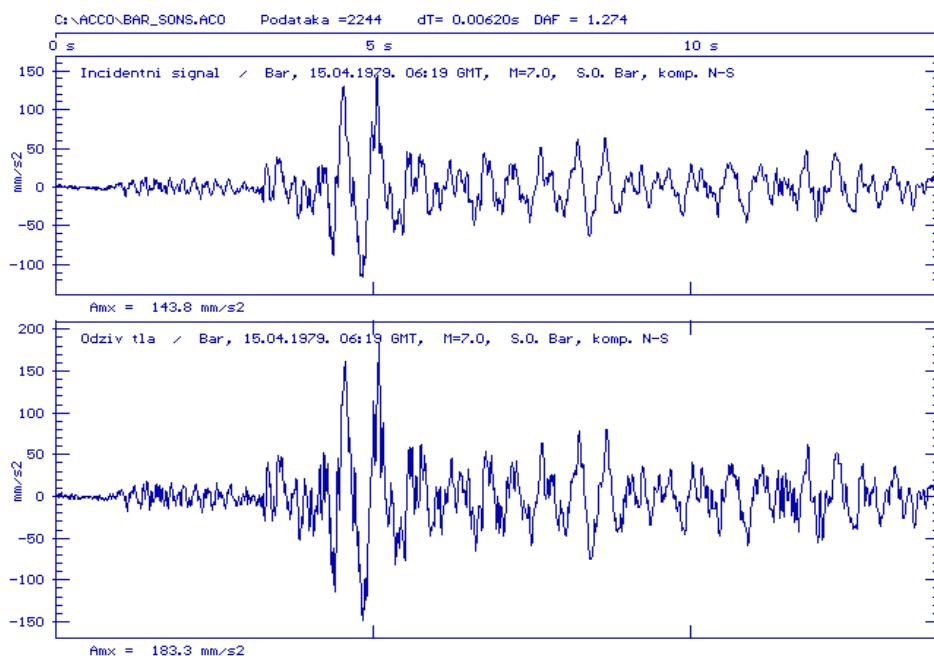
U inženjersko-seizmološkoj praksi, za ove potrebe, isključivo se koriste transverzalni seizmički talasi (horizontalno polarisani – registrovani na horizontalnim instrumentima), zbog činjenice da su oni nosioci najvećeg dijela seizmičke energije zemljotresa. Takođe, zbog predominantnog pravca oscilovanja ovih talasa u horizontalnoj ravni, njihov efekat na građevinske objekte je dominirajući u odnosu na druge vrste seizmičkih talasa.

Matematičkim modelovanjem amplifikacionih efekata u definisanom modelu tla, proračunavaju se sintetički (teorijski) akcelerogrami na nivou fundamenta objekta, odnosno na površi tog modela. Odnos maksimalnog ubrzanja dobijenog na nivou fundamenta objekta i maksimalnog ubrzanja na osnovnoj stijeni lokacije određuje tzv. **dinamički faktor amplifikacije** modela tla. Reprezentativni dinamički faktor amplifikacije utvrđuje se kao srednja vrijednost više ovakvih proračuna (za slučaj više akcelerograma), obično više od 10. Dakle dinamički faktor amplifikacije $G=2$ znači da je maksimalna amplituda akcelerograma na površi terena dvostruko veća od odgovarajuće vrijednosti na nivou osnovne stijene. Uobičajene vrijednosti faktora amplifikacije nalaze se u granicama 1,2 do 1,8, dok su na lokacijama sa debelim depozitima vrlo mekanih tla zasićenih vodom, moguće vrijednosti i iznad 3.

Na slici 130 prikazan je grafički primjer za jednu lokaciju: pobudni akcelerogram na nivou osnovne stijene je prikazan u gornjem, a reakcija geodinamičkog modela na donjem dijelu slike. Kao pobuda, korišćen je akcelerogram crnogorskog zemljotresa od 15. aprila 1979. godine, registrovan u Baru na osnovnoj stijeni.

Iz ovog primjera jasno se vidi opisani efekat amplitudne i frekventne modifikacije akcelerograma na površi terena u odnosu na originalnu seizmičku pobudu na osnovnoj stijeni. Utvrđeni dinamički faktor amplifikacije u ovom primjeru je iznosio 1,274, dakle ubrzanja na nivou fundamenta budućeg objekta (zemljina površ) uvećana su za 27,4 %. Uočljivo je da je

frekventni sastav amplifikovanog akcelerograma bogatiji u odnosu na pobudu, u ovom slučaju u domenu viših frekvencija, zbog karakteristika geodinamičkog modela tla.



Slika 130. Primjer proračuna dinamičkog faktora amplifikacije kroz analizu dinamičke reakcije modela tla lokacije na seizmičku pobudu (akcelerogram crnogorskog zemljotresa od 15. aprila 1979. godine, registrovan u Baru) – gornji dijagram; Donji dijagram predstavlja rezultat numeričke konvolucije pobudnog akcelerograma i parametara geodinamičkog modela tla. Rezultujući dinamički faktor amplifikacije u ovom primjeru iznosi je 1,274.

Na osnovu definisanog dinamičkog faktora amplifikacije za proučavanu lokaciju i utvrđenih parametara seizmičkog hazarda, odnosno seizmičkih parametara na osnovnoj stijeni, za određene povratne periode vremena (što je utvrđeno u okviru seizmičke regionalizacije) moguće je sračunati očekivana maksimalna ubrzanja na nivou fundamenta objekta, odnosno na površi terena – jednostavnim množenjem očekivanih maksimalnih parametara na osnovnoj stijeni sa utvrđenom srednjom vrijednošću dinamičkog faktora amplifikacije modela lokacije.

Primjer proračuna očekivanih maksimalnih ubrzanja tla na nivou temelja objekta

Tabela 12.

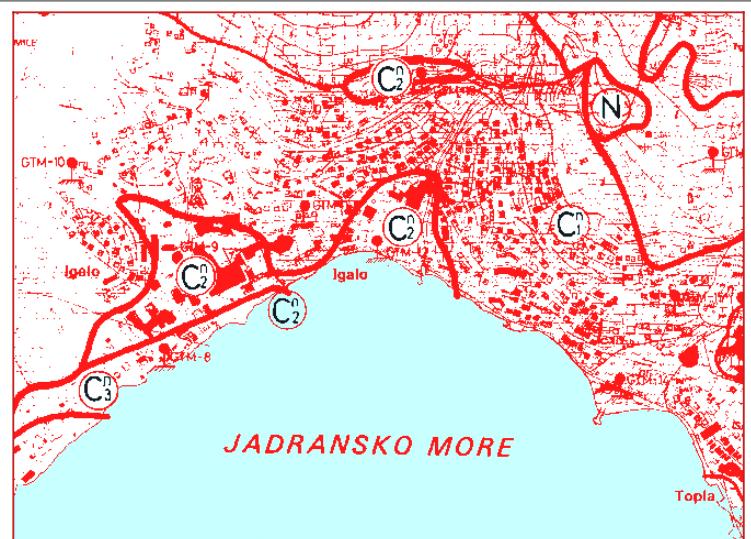
Povratni period (godine)	Maks. ubrzanje na osnovnoj steni (g)	Maks. ubrzanje na zemlj. površi (g)
50	0,082	0,111
100	0,100	0,135
200	0,124	0,167
475	0,176	0,238

Tako, čemo na primjer, za neku lokaciju za koju je sračunata srednja vrijednost faktora amplifikacije $G=1,35$, na osnovu očekivanih maksimalnih ubrzanja na osnovnoj steni, (obično za povratne periode vremena od 50, 100, 200 i 475 godina), lako dobiti očekivane maksimalne seizmičke parametre na toj lokaciji, jednostavnim množenjem ubrzanja na osnovnoj stijeni sa dinamičkim faktorom amplifikacije, kako ke prikazano u tabeli 12.

Kao konačni produkt proračuna u seizmičkoj mikrorejonizaciji utvrđuje se **koeficijent seizmičnosti** koji se definiše kao proizvod upravo definisanih maksimalnih ubrzanja na nivou fundamenta i koeficijenata koji izražavaju parametare same konstrukcije (**reprezentativnog**

spektra reakcije apsolutnog ubrzanja u funkciji sopstvene periode oscilovanja objekta i **ekvivalentnog faktora duktilnosti /krutosti/ objekta**).

Ako su opisana istraživanja vezana za veće područje, koje se ne može obuhvatiti jedinstvenim geodinamičkim modelom, tada je potrebno formirati više reprezentativnih geodinamičkih modela i za svaki nezavisno izvesti opisani postupak određivanja koeficijenta seizmičkog intenziteta. U koliko je u pitanju, na primer, područje jednog grada, tada se na osnovu izvedenih proračuna na nizu karakterističnih lokacija na karti odgovarajuće razmere vrši okonturenje zona sa istim vrednostima koeficijenta seizmičnosti. Na taj način se definišu izolinije istih vrijednosti ovog koeficijenta, čime se zapravo realizuje postupak **seizmičke mikrorejonizacije**, odnosno izdvajanje mikrolokacija sa istim ili približno jednakim vrijednostima koeficijenta seizmičkog intenziteta, čiji rezultat je **karta seizmičke mikrorejonizacije** (slika 131).



Slika 131. Segment karte seizmičke mikrorejonizacije područja Igala.

METODA KOREKCIJE OSNOVNOG STEPENA SEIZMIČKOG INTENZITETA

Bazirajući se na brojnim rezultatima empirijskih istraživanja, ruski autor Medvedev je 1965. utvrdio da različite vrste tla značajno utiču na modifikovanje efekata zemljotresa. Pri tome je konstatovao da uticaj tla na priraštaj stepena seizmičkog intenziteta zemljotresa zavisi od **seizmičke impedance tla** (koja se definiše kao proizvod brzine transverzalnih talasa u sloju i zapreminske težine tla $V \cdot \gamma$), ali i od prisustva podzemne vode u tlu, ukoliko je dubina nivoa podzemne vode manja od 15 metara. Dugogodišnji rezultati istraživanja mogu se sažeti u okviru jedne empirijske relacije kojom se utvrđuje ukupna korekcija (ili priraštaj) **osnovnog stepena seizmičkog intenziteta** na sljedeći način:

$$n = 1,67 [\log (V_0 \gamma_0) - \log (V_n \gamma_n)] + e^{-0,04 \cdot h^2} \quad (\text{EMS-98})$$

pri čemu indeks $_0$ označava srednju vrijednost seizmičke impedance za srednje tlo regiona, a indeks $_n$ ponderisanu srednju vrijednost impedance svih izdvojenih slojeva u geodinamičkom modelu (do dubine od 15 m) na lokaciji za koju se računa priraštaj osnovnog stepena seizmičnosti; h označava dubinu nivoa podzemne vode na lokaciji.

Ukupan seizmički intenzitet na lokaciji računa se jednostavnim zbrajanjem osnovnog stepena seizmičkog intenziteta (I_0) definisanog seizmičkom regionalizacijom i korekcije osnovnog stepena (n):

$$I = I_0 + n \quad (\text{EMS-98}).$$

SEIZMIČKI RIZIK

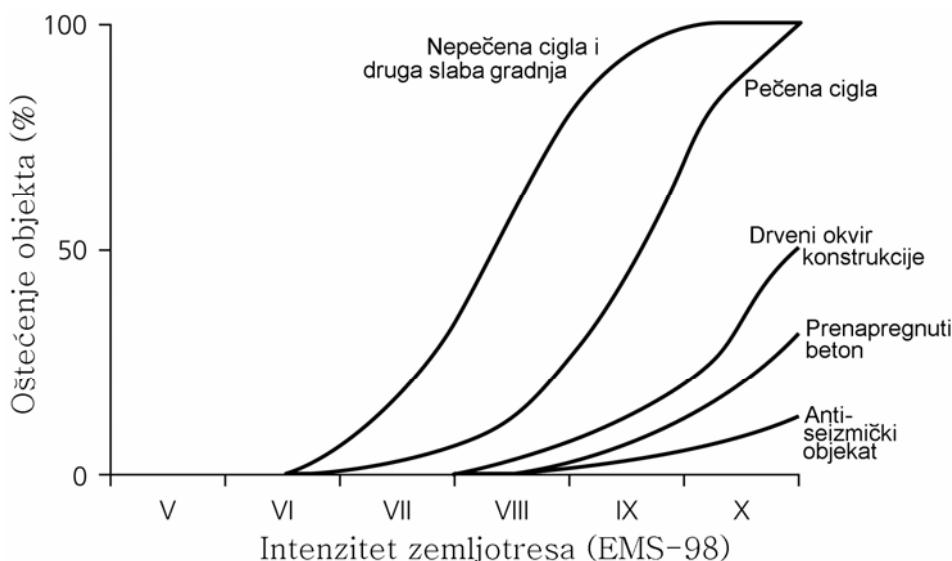
Rizik od prirodnih hazarda uopšte, predstavlja nivo očekivanih gubitaka ili šteta, koji se predviđa kao posljedica realizacije nekog prirodnog hazarda na određenom mjestu i u određenom vremenu. Važni faktori u procjeni i razumijevanju rizika su:

- Procjena nivoa očekivanog hazarda,
- Ocjena svih elemenata ljudske vrijednosti osjetljivih na realizaciju hazarda,
- Ocjena lokacije ili pozicije elemenata vrijednosti u odnosu na hazard: dok hazard postoji i u nenaseljenim područjima isto se ne može reći i za rizik koga obavezno povezujemo sa regionima gdje postoji društvena zajednica sa svojim vrijednostima i
- Procjena povrjetljivosti društvene zajednice i to: fizička, socijalna i ekomska.

U užem smislu, pod pojmom **seizmički rizik** obično se podrazumijeva **nivo mogućih gubitaka** materijalnih dobara u slučaju pojave zemljotresa određenog intenziteta na određenom području. Obično se izražava relativnim brojevima (u odnosu na maksimalno mogući gubitak). Seizmički rizik (**R**) se matematički definiše kao konvolucija⁽⁹⁾ seizmičkog hazarda (**H**) i funkcije **povrjetljivosti** (vulnerabiliteta) objekta (**V**) pri dejstvu zemljoresa:

$$\mathbf{R} = \mathbf{H} * \mathbf{V}$$

Vulnerabilitet objekta predstavlja zavisnost stepena štete na objektu od nivoa očekivanog seizmičkog dejstva.



Slika 132. Šematski dijagram zavisnosti stepena oštećenja objekata (u %) od intenziteta zemljotresa, za različite tipove objekata.

Na slici 132 prikazan je oblik tipičnih funkcija seizmičkog rizika izraženog u zavisnosti od intenziteta zemljotresa za nekoliko karakterističnih tipova objekata, kao i za objekte sa antiseizmičkom zaštitom.

PROJEKTNI SEIZMIČKI PARAMETRI ZA OBJEKTE VISOKOGRADNJE

"**Pravilnikom o tehničkim noramtivima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima**" (Službeni list SFRJ br. 31/81 sa izmjenama objavljenim u Službenom listu br. 49/82, br.29/83, 21/88 i br. 52/90) propisana je procedura utvrđivanja projektnih seizmičkih parametara za izgradnju objekata visokogradnje. Pravilnikom se propisuju seizmički parametri za projektovanje objekata u seizmičkim područjima VII, VIII i IX stepena seizmičnosti po MCS skali. Sastavni dio ovih propisa je karta seizmičkog hazarda teritorije bivše SFRJ za povratni period od 500 godina.

⁽⁹⁾ Konvolucija je matematička operacija koja predstavlja zbir prizvoda dvije funkcije.

Uslovi za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima X stepena utvrđuju se na osnovu posebnih istraživanja, kao što se to zahtijeva i za lokacije **objekata van kategorije**.

Objekti visokogradnje projektuju se tako da **tzv. maksimalni zemljotres**, najvećeg očekivanog intenziteta za povratni period od 200 godina, može prouzrokovati oštećenja nosive konstrukcije, ali da pri tom ne smije doći do rušenja konstrukcije. Pri dejstvu **tzv. projektnog zemljotresa**, očekivanog intenziteta za povratni periodu od 50 godina, konstrukcija smije da pretrpi neznatna oštećenja nekonstruktivnih i konstruktivnih elemenata.

Nivo seizmičke zaštite objekta zavisi od:

1. Kategorije objekta,
2. Regionalnih karakteristika seizmičnosti (nivoa seizmičkog hazarda),
3. Lokalnih uslova tla (seizmičkih efekata u tlu uslijed dinamičke pobude) i
4. Tipa konstrukcije objekta (duktiliteta i prigušenja konstrukcije).

Naime, ukupan seizmički koeficijent **K** proračunava se na osnovu izraza:

$$K = K_o \cdot K_s \cdot K_d \cdot K_p$$

pri čemu su:

K_o – koeficijent kategorije objekta,

K_s – koeficijent seizmičkog intenziteta,

K_d – koeficijent dinamičnosti,

K_p – koeficijent duktiliteta i prigušenja,

Pri tome, minimalna vrijednost ukupnog seizmičkog koeficijenta **K** ne smije biti manja od 0,02.

Kategorije objekata visokogradnje prema Pravilniku

Koeficijent kategorije objekta **K_0** utvrđuje se saglasno sljedećoj tabeli:

Kategorija	Objekat	K_0
Van kategorije	<ul style="list-style-type: none"> ➤ nuklearni reaktori, ➤ skladišta zapaljivih tečnosti i gasova, ➤ skladišta otrovnih materija, ➤ najznačajnije telekomunikacioni objekti, ➤ zgrade sa više od 25 spratova, ➤ svi objekti od čije ispravnosti zavisi funkcionisanje drugih tehničko-tehnoloških sistema, čiji bi prestanak rada prouzrokovao velike materijalne štete. 	-
I kategorija	<ul style="list-style-type: none"> ➤ zgrade sa prostorijama za okupljanje većeg broje ljudi: kino dvorane, pozorišta, ➤ fakulteti, škole, bolnice, zdravstveni objekti, ➤ zgrade vatrogasne službe, ➤ objekti veza koji nisu svrstani u prethodnu kategoriju (PTT; RTV...) ➤ industrijske zgrade sa skupocjenom opremom, ➤ svi energetski objekti sa instalisanom snagom preko 40 MW, ➤ sve zgrade od opšteg nacionalnog, istorijskog, kulturnog značaja. 	1,5
II kategorija	<ul style="list-style-type: none"> ➤ stambene zgrade, hoteli, restorani, ➤ javne zgrade koje nisu svrstane u I kategoriju, ➤ industrijske zgrade koje nisu svrstane u I kategoriju. 	1,0
III kategorija	<ul style="list-style-type: none"> ➤ pomoćne proizvodne zgrade, agrotehnički objekti. 	0,75
IV kategorija	<ul style="list-style-type: none"> ➤ privremen objekti čije rušenje ne može da ugrozi ljudske živote. 	-

Proračun seizmičkih parametara nije obavezan za:

1. objekte II i III kategorije u zoni seizmičkog intenziteta manjeg od VII i
2. objekte IV kategorije nezavisno od zone seizmičnosti.

Objekti I kategorije koji se nalaze van seizmičkih područja (seimičnosti manje od VII MCS stepeni, koji su obuhvaćeni ovim Pravilnikom) moraju se analizirati kao da se nalaze u VII zoni seizmičkog intenziteta sa $K_0=1,0$.

Seizmičnost lokacije

je definisana preko koeficijenta seizmičkog intenziteta K_s na sljedeći način:

Zona seizmičnosti	K_s
VII	0,025
VIII	0,050
IX	0,100

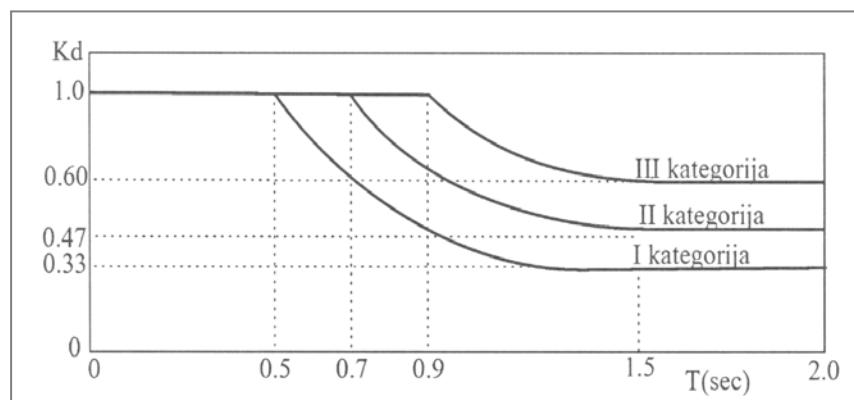
- Kod objekata I kategorije koeficijent seizmičkog intenziteta mora se definisati na osnovu sadržaja karata seizmičke mikroregionizacije teritorije opštine;
- Kod objekata "van kategorije" seizmičnost lokacije se detaljno proučava (analizom seizmičkog hazarda definišu se nivoi "projektnog" i "maksimalnog" zemljotresa).

Lokalni uslovi tla

Na osnovu geotehničkih, inženjersko-geoloških i geofizičkih ispitivanja, tlo na lokaciji objekta razvrstava se u jednu od tri kategorije i na osnovu te klasifikacije (slika 132), kao i dinamičkih karakteristika budućeg objekta, određuje se koeficijent dinamičkog odgovora ili koeficijent dinamičnosti K_d na osnovu sljedeće tabele.

Kategorija tla	KARAKTERISTIČNI PROFIL TLA	Granične vrijednosti K_d
I	➤ stjenovita i polusjenovita tla, dobro zbijena i tvrda tla debljine do 60 m	0,5/T $1,0 \geq K_d \geq 0,33$
II	➤ zbijena i polutvrda tla i dobro zbijena tla debljine veće od 60 m	0,7/T $1,0 \geq K_d \geq 0,47$
III	➤ malo zbijena i meka tla debljine veće od 10 m	0,9/T $1,0 \geq K_d \geq 0,60$

- Ukoliko na lokaciji objekata visokogradnje I i II kategorije uslovi tla nisu dovoljno poznati, tlo se može svrstati u II kategoriju.
- Ukoliko to nije posebno uslovljeno namjenom, objekte visokogradnje ne treba graditi na tlu koje tokom zemljotresa može pokazati dinamičku nestabilnost (pojava likvifa-kcije, velikih slijeganja, kliženja, odroni i sl.).



Slika 133. Grafički oblik koeficijenta dinamičnosti K_d .

- Proračun perioda konstrukcije vrši se metodama dinamičke analize ili empirijskim relacijama zasnovanim na dinamici konstrukcije.
- Ukoliko sopstveni period zgrade nije izračunat, za zgrade sa manje od 5 spratova treba usvojiti maksimalnu vrijednost K_d prema odgovarajućem tlu (slika 133).

Tip konstrukcije

Vrijednost koeficijenta duktiliteta (K_p) definisana je na osnovu karakterističnih duktiliteta i prigušenja prema pojedinim načinima gradnje sadržanim u sljedećoj tabeli:

K_p	TIP KONSTRUKCIJE
1,0	Sve armirano-betonske (AB) konstrukcije (izuzev AB zidova), sve čelične konstrukcije (izuzev sa spregovima) i sve savremene drvene konstrukcije (osim visokih i vitkih konstrukcija sa malim prigušenjem)
1,3	Konstrukcije od armiranih zidova i čelične konstrukcije sa dijagonalama
1,6	Zidane konstrukcije ojačane vertikalnim AB serklažima, vrlo visoke i vitke konstrukcije sa malim prigušenjem (kao što su industrijski dimnjaci, antene, vodotornjevi) i druge konstrukcije sa periodom oscilovanja $T \geq 2$ sekunda.
2,0	Konstrukcije sa fleksibilnim prizemljem ili spratom tj. sa naglom promjenom krutosti, kao i konstrukcije od običnih zidova.

8. GEODEZIJA

Geodezija je nauka koja stvara i primjenjuje naučne metode i koristi tehnička sredstva za snimanje terena, oblika Zemlje, vrši njihovo kartografisanje snimanje njenog gravitacionog polja i geodinamičke fenomene kao što su kretanje polova rotacije, pokretanje kontinentalnih ploča, zemljine plime i to u trodimenzionom prostoru koji je promjenljiv u vremenu. Podatke geodetskih osmatranja koriste praktično sve prirodne i tehničke nauke (geologija, geofizika, okeanografija, meteorologija, građevinarstvo itd.) u cilju razumijevanja i osmatranja fizičkih procesa koje proučavaju.



Slika 134. Crtež u djelu *Geographia* iz 1533. godine autora Petera Apiana ilustruje principe starih astronomskih i geodetskih osmatranja i pozicioniranja.

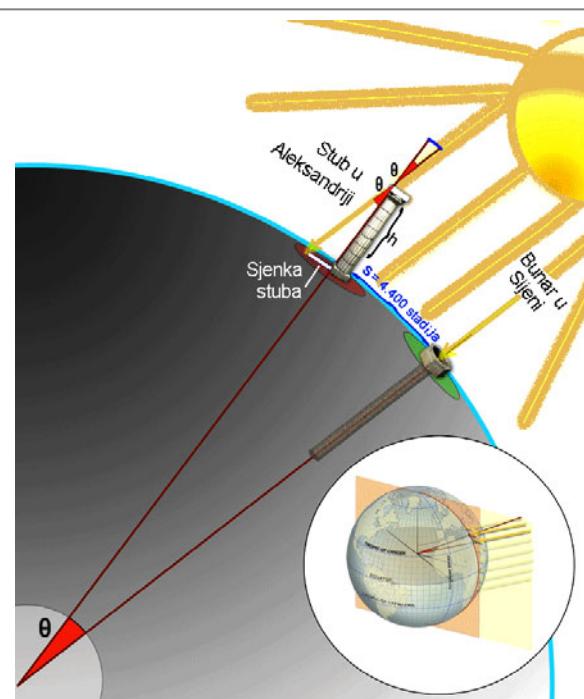
Istorija geodezije seže u daleku prošlost ljudske civilizacije. Prvi pisani tragovi o proučavanju dimenzija i oblika Zemlje, koji se mogu smatrati začetkom geodezije, vezuju se za Aristotela (384. - 322. godine prije Nove ere), najvećeg filozofa drevne Grčke. Još tada, on u svom traktatu "O nebu", tvrdi da je Zemlja okrugla i korektno ističe evidentne dokaze: kružni oblik linije horizonta na okeanima i širokim ravnicama, postepeno pojavljivanje i isčeščavanje objekata iza dalekog horizonta, postepena promjena visine zvijezda pri kretanju po pravcu meridijana (na sjever ili jug), zatim različito vrijeme izlaska Sunca tokom godine, kao i oblik zemljine sjenke pri djelimičnom pomračenju Mjeseca. Aristotel je tvrdio da obim Zemlje iznosi 400 hiljada stadija*, što je bilo gotovo dvostruko više od realne vrijednosti.



Izgled prvog morskog hronometra tipa "Harrison I".

* Stara mjera za dužinu bila je stadij. Još uvijek nije tačno poznata njena vrijednost u metrima, ali se zna da se kreće između 172 i 185 metara.

Grčki filozof Erastoten (276. - 196. prije Nove ere) prvi je izvršio dokumentovani pokušaj određivanja obima Zemlje. On je koristio približan podatak o rastojanju između Aleksandrije i Sijene u Egiptu* (oko 4.400 stadija) i vremenu kretanja pustinjsih karavana između njih. Erastoten je na osnovu mjerjenja dužine sjenke visokog stuba u Aleksandriji (slika 135) u podne, kada se u dubokom bunaru u Sijeni moglo konstatovati potpuno odsustvo sjenke, utvrdio i ugao sjenke stuba od $\Theta = 7^{\circ}12'$ (tačna vrijednost je $7^{\circ}7'$). Iz relacije između količnika punog ugla kruga i mjerenog ugla sjenke Θ – koji je jednak odnosu obima Zemlje i rastojanja Aleksandrije i Sijene, odnosno luka s na slici 135 ($360^{\circ}:\Theta = \text{Obim}:s$) Erastoten je dobio vrijednost za obim Zemlje 22.247 stadija, što približno iznosi 39.270 kilometara (odnosno, zbog nepreciznog saznanja o dužini stadija – između 37.840 i 40.700 km) što je blisko realnom obimu Zemlje (tačna vrijednost iznosi 40.009 km po meridijanu za tzv. Hejfordov elipsoid). Danas, primjenom najsavremenijih tehničkih sredstava, geodezija uspijeva da identificuje sve parametre kompleksnog oblika Zemlje sa tačnošću reda veličine milimetra.

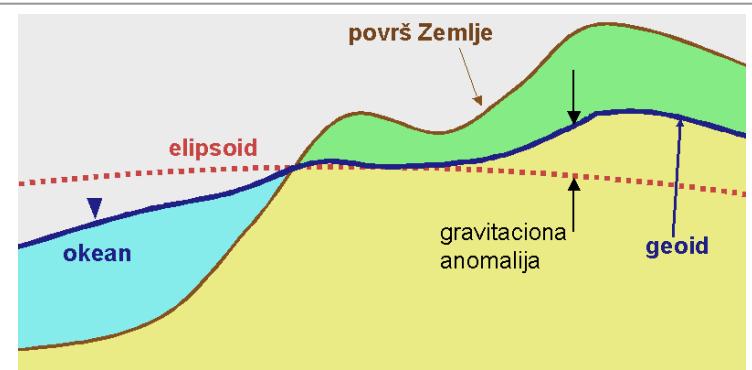


Slika 135. Princip prvog pokušaja Erastotenvog određivanja obima Zemlje.

Kao što smo to već konstatovali u poglavlju 5.1, pravi oblik Zemlje je ekvivalentan fiktivnoj površi koju nazivamo **geoid**, koja je zapravo ekvipotencijalna površ gravitacionog polja, i koja nastaje kao rezultat sveukupnog dejstva gravitacionog polja svih masa Zemlje (slika 136). U geodeziji razlikujemo realnu površ Zemlje kao fizičku površ ili reljef, njenu aproksimaciju rotacionim elipsoidom – kao najbolju aproksimaciju drugog stepena i geoid, kao tzv. **nivosku** ili **ekvipotencijalonu površ**. Nivoska površ koja se poklapa sa površi vode idealnog mirnog mora i okeana, naziva se **nulta nivoska površ**. Verikalna prava spuštena na površ rotacionog elipsoida naziva se **normala**, a na geoid – **vertikala**. Zbog idealnog oblika rotacionog elipsoida, položaj normale može se matematički odrediti u bilo kojoj tački. Međutim, na pravac vertikale uticaj će imati realni raspored masa ispod zemljine površi, tako da se on mora odrediti mjerjenjem.

Proračunom parametara elipsoida (velike i male ose) kao optimalne aproksimacije oblika Zemlje, bavilo se mnogo naučnika tokom istorije. Iz tih razloga danas se u Svetetu koristi više vrsta elipsoida. **Elipsoid Besela** (Bessel) iz 1841. godine koristi se u našoj zemlji, kao i u Austriji, Mađarskoj, Njemačkoj, Grčkoj, Holandiji, Norveškoj, Poljskoj, Švajcarskoj, Češkoj i Slovačkoj. **Hejfordov**

(Hayford) **elipsoid** iz 1910. godine koristi se u Belgiji, Bugarskoj, Finskoj, Italiji i Rumuniji. **Elipsoid Krakovskog** iz 1940. godine je i dalje u primjeni u Ruskoj Federaciji, Ukrajini i



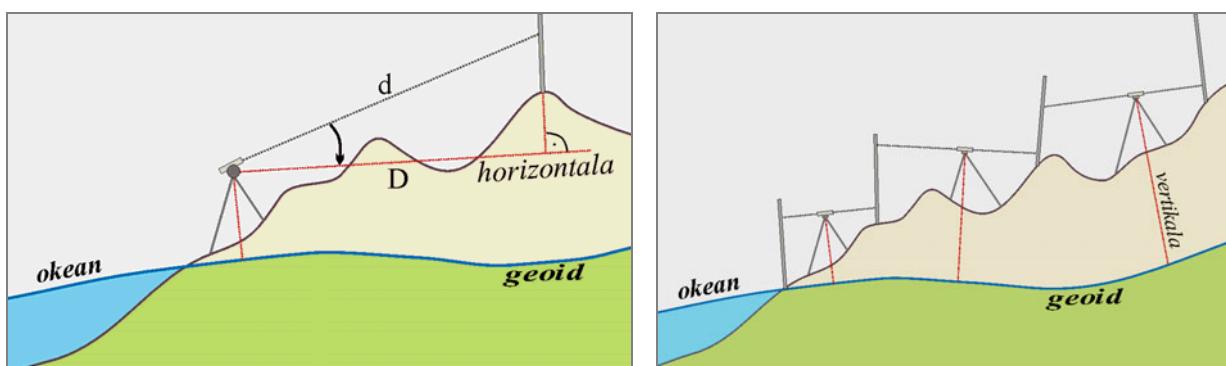
Slika 136. Međusobni odnosi reljefa, geoida i elipsoida.

* za koje je smatrao da se nalaze na istom meridijanu, što je samo približno tačno jer razlika geografskih dužina ta dva mjesta iznosi 3 lučna stepena.

Mađarskoj, dok se u Francuskoj koristi **Klarkov** (Clarke) **elipsoid** iz 1880. godine, a u SAD iz 1866. godine.

Kao što smo pomenuli u poglavlju 5.1, danas se u širokoj primjeni u geodeziji i navigaciji koristi globalni referentni sistem oblika rotacionog elipsoida, WGS84, odnosno Svjetski geodetski sistem, definisan 1984. godine, koji će biti u upotrebi do 2010. godine. Kao što smo već konstatovali u poglavlju 5.1, ovaj rotacioni elipsoid definisan je dimenzijom velike poluose u ekvatorijalnoj ravni, od 6.378.137 metara i spljoštenošću na polovima od 1/298,257233563.

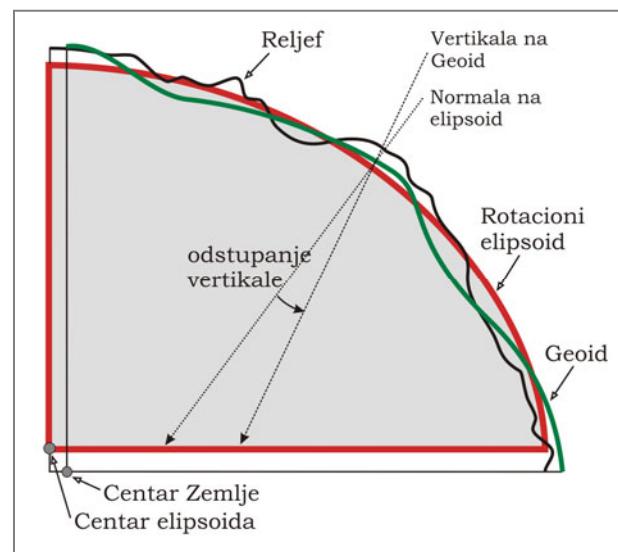
U geodeziji se koriste dva osnovna **geodetska sistema** ili **datuma** izražavanja podataka u prostoru: **horizontalni** i **vertikalni**. U horizontalnom sistemu se prikazuju rezultati snimanja realnih, zakriviljenih površi na Zemlji, dok vertikalni sistem obuhvata visinu tačaka osmatranja. Horizontalni datumi zato sadrže širine i dužine za svaku tačku sistema, koji se vežu za neke početne vrijednosti koordinata u kojima se izražava sistem. Tako, na primjer, geografski koordinatni sistem se vezuje za početni meridijan u Griniču (Engleska) geografskom dužinom, a širinom – za ekvator. U horizontalnom geodetskom sistemu mjere se i prikazuju uglovi i dužine, a u vertikalnom – visine tačaka i površi koje snimamo.



Slika 137. Sistem određivanja visina u odnosu na geoid: metoda trigonometrijskog određivanja visina i dužina teodolitom (lijevo) i metoda nivelanja visinskih razlika (desno).

Na slici 137 prikazani su principi snimanja visina u vertikalnom geodetskom sistemu metodom trigonometrijskog snimanja dužina i uglova (lijevo) i metodom nivelanja (desno). Kod trigonometrijskog mjerjenja, određivanjem kose dužine (d na slici 137) i ugla između te kose dužine i horizontale (ravni paralelne površi geoida u tački u kojoj je postavljena geodetska letva) moguće je odrediti relativnu visinu između mesta opažanja i vizirane tačke na udaljenoj letvi, kao i horizontalno rastojanje te dvije tačke (D). Metodom sukcesivnog nivelanja između sistema tačaka moguće je odrediti razlike u visini između tih tačaka, a njihovim zbrajanjem – ukupnu razliku u visini između početne i završne tačke. Poznavajući absolutnu visinu početne tačke, lako je tada na bazi izmjerene razlike u visini, utvrditi absolutnu visinu svih opažanih tačaka.

Imajući u vidu da se sva opažanja obavljaju vezivanjem za vertikalu na svakoj tački opažanja, a s obzirom da je vertikala u svakoj tački upravna na geoid, to ćemo sva opažanja obavljati relativno – u odnosu na geoid (slika 137). Iz tih razloga, horizontiranje instrumenta na



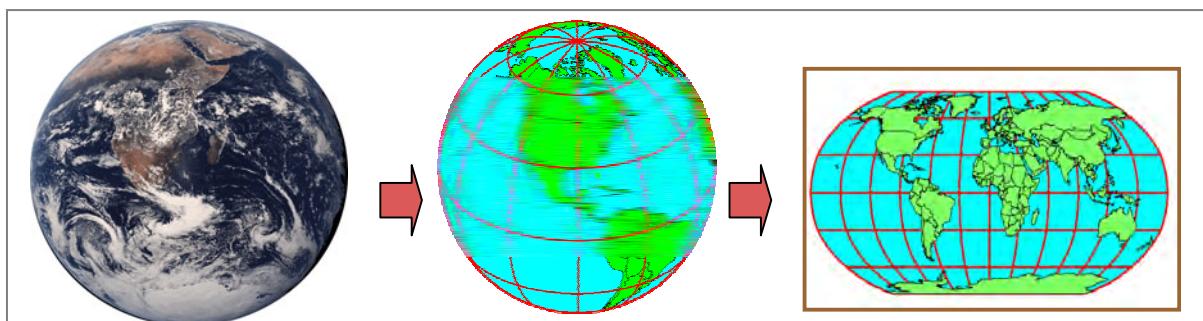
Slika 137a. Odstupanje vertikale od normale na elipsoid.

tački opažanja biće obavljen u odnosu na geoid a ne na fizičku površ Zemlje ili rotacioni elipsoid, s obzirom da će na sistem horizontiranja (ili vertikaljenja), koji se ostvarju korišćenjem libele ili viska, ili primjenom moderni automatskih sistema horizontiranja, uvijek djelovati ukupna gravitaciona sila na mjestu mjerena i ona će određivati te pravce (slika 137a). Iz ovih razloga, na slici 137 su vertikale i horizontale, položaj geodetskih letvi i vizure, prikazani relativno – u odnosu na geoid. Naime, zbog pojave nehomogenog rasporeda masa različitih gustina u zemljinoj plićoj i dubljoj unutrašnjosti, nastaju lokalne i regionalne promjene ubrzanja sile teže (kao što smo to vidjeli u odjeljku o gravitacionom polju Zemlje) koje se kao posljedica javlja undulacija Geoida (njegovo odstupanje od idealnog rotacionog elipsoida) u svakoj tački posmatranja na zemljinoj površi. Iz tih razloga, fizička vertikala će u svakoj tački, za izvjesnu vrijednost odstupati od normale na fiktivni rotacioni elipsoid, kao geometrijsku aproksimaciju zemljiniog oblika kao geoida (slika 137a). Prosječno odstupanje vertikale (od normale) u ravničarskim predjelima iznosi do 10 lučnih sekundi, dok u plansinskim krajevima može dostići i 50 lučnih sekundi. Najveća odstupanja vertikale utvrđena su u Himalajima – čak 100 lučnih sekundi. Dakle, zbog činjenice da su svi geodetski instrumenti vertikaljeni u odnosu na Geoid, navedena odstupanja vertikale pri terenskim mjerjenjima većih razmjera mogu biti opterećena velikim greškama ukoliko se ne vodi računa o njemu. U geodeziji se odstupanja vertikale određuju posebnim mjerjenjima, baziranim na astronomskim opažanjima i proračunima gravitacionog uticaja nehomogenog rasporeda stijenskih masa na osnovu detaljnog digitalnog modela reljefa*.

8.1. Koordinatni sistemi i kartografske projekcije

Koordinatni sistemi u geodeziji predstavljaju skup linija i ravnih kojih služe za jednoznačno određivanje položaja tačke u prostoru. U geodeziji se koriste **pravougli** i **polarni** koordinatni sistemi i to: u ravni, u prostoru, na lopti i na elipsoidu. **Geografski koordinatni** sistem je polarni sistem vezan za elipsoid. Kao što smo naveli, njegov početni meridijan se računa od Griniča (Greenwich) u Engleskoj (multi meridijan), a geografska širina se izražava od ekvatora – do sjevernog i južnog pola, gdje širina iznosi $+90^{\circ}$, odnosno -90° , respektivno. Griničko vrijeme je određeno kao osnova za sistem vremenskih zona.

Zbog potrebe grafičkog prikazivanja snimljenih sadržaja i podataka na zemljinoj površi, kao i zbog vrlo neprikladnog trodimenzionog prikazivanja tih sadržaja, u inženjerskoj praksi je redovno korišćen postupak projektovanja snimljenih podataka na ravan. Da bi se to izvelo, potrebno je sa geoida, odnosno referentnog elipsoida na kojem je snimanje izvedeno, izvršiti transformaciju podataka – i to prvo na loptu a zatim na ravan. Prva transformacija se obavlja primjenom sferne trigonometrije, a druga primjenom ravanske geometrije.



Slika 138. Sistem projektovanja: svođenje realnog oblika Zemlje na loptu, pa zatim na ravan.

* Pod digitalnim modelom reljefa (ili terena) podrazumijeva se topografski numerički model realne zemljine površi koji je digitalizovan u prostornom koordinatnom sistemu (x,y,z) sa odgovarajućom rezolucijom, odnosno korakom digitalizovanja.

Kartografske projekcije su matematički postupci koji omogućuju preslikavanja zakrivljenih površi Zemlje (odnosno sfere ili rotacijskog elipsoida) i drugih nebeskih tijela na ravan. Teorija kartografskih projekcija često se naziva i matematičkom kartografijom. Cilj kartografskih projekcija je stvaranje matematičke osnove za izradu karata i rješavanje teorijskih i praktičnih zadataka u kartografiji, geodeziji, geologiji, geografiji, astronomiji, navigaciji i ostalim srodnim naukama. Postupak kartografsanja se, zbog svoje kompleksnosti, obavlja prvo transformacijom oblika realne Zemlje na loptu, a zatim sa lopte na ravan (slika 138).

Na ravni elipsoida ili sfere, tačke su određene presjekom meridijana i uporednika. Slika mreže meridijana i uporednika u ravni projekcije naziva se **osnovnom kartografskom mrežom**. Zadatak kartografskog preslikavanja je utvrđivanje zavisnosti između koordinata tačaka na zemljinom elipsoidu ili sferi i koordinata njihovih slika u projekciji.

Postoji veliki broj kartografskih projekcija, ali se one mogu podijeliti prema položaju i obliku kartografske projekcione mreže, kao i prema vrsti ostvarenih deformacija.

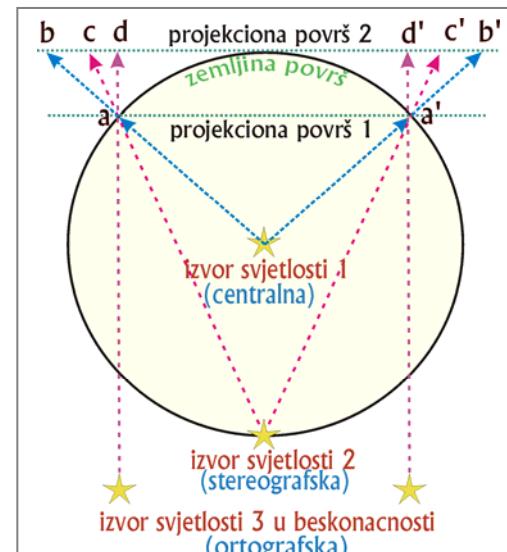
Kartografske projekcije prema položaju projekcione mreže, odnosno ravni u odnosu na projekcionu tačku (slika 139) mogu biti: **centralne, stereografske** ili **ortografske**.

Prema obliku kartografske mreže uobičajena je podjela na: **perspektivne, konusne, cilindrične, azimutalne, pseudokonusne, pseudocilindrične, polikonusne, kružne** i druge, a u odnosu na položaj ravni projektovanja - na **polarne, ekvatorijalne** i **kose** (slika 140).

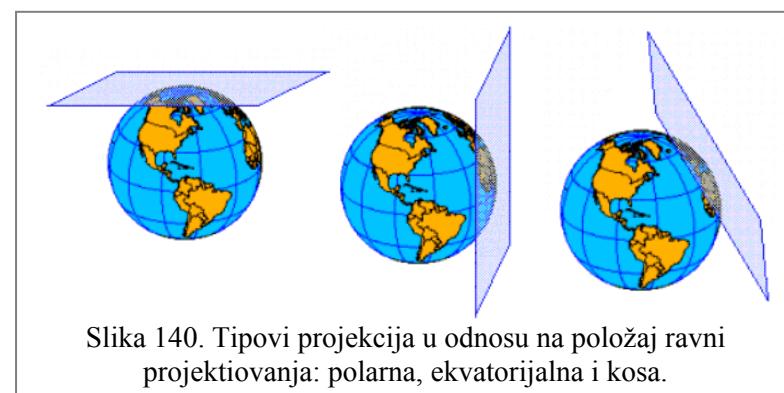
Kartografske projekcije upotrebljavaju se za prikazivanje jednog dijela ili čitave zemljine površi uz što manje deformacije. Što je manje područje koje se prikazuje, to se očekuju manje deformacije. Prema vrstama deformacija kartografske projekcije se dijele na **konformne** (ostvareno očuvanje uglova), **ekvivalentne** (očuvanje površina), **ekvidistantne** (očuvanje rastojanja u određenom pravcu). Primjer ekvidistantne cilindrične projekcije Svijeta prikazan je na slici 141, a azimutalne i konformne u primjeru projekcije prostora Evrope, na slici 142.

Neke od projekcija dobile su imena po svojim autorima. To su na primjer **Merkatorova** (obično uspravna ili poprečna cilindrična konformna), **Lambertova** (azimutalna ekvivalentna, ali i konusna konformna), **Boneova** (pseudokonusna ekvivalentna), **Molvajdova** (pseudocilindrična ekvivalentna) zatim niz pseudocilindričnih projekcija **Ekerta, Kavrajskoga** i drugih.

Posebnu grupu projekcija čine **geodetske** projekcije, a to su projekcije za potrebe državnog premjera i izradu službenih topografskih karata. U tu svrhu najrasprostranjenije su **univerzalna poprečna Merkatorova projekcija** (UTM), **poprečna Merkatorova** ili

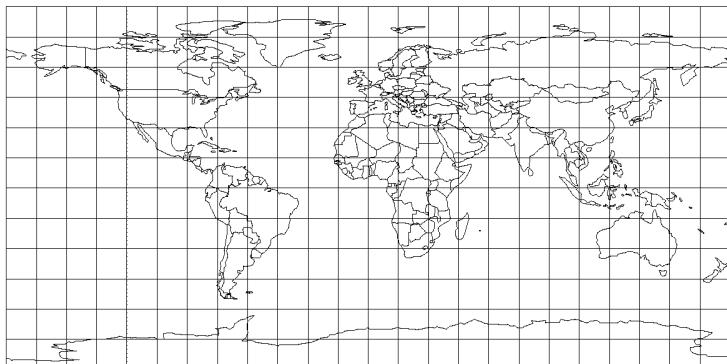


Slika 139. Osnovne vrste projekcija: centralna, stereografska i ortografska.



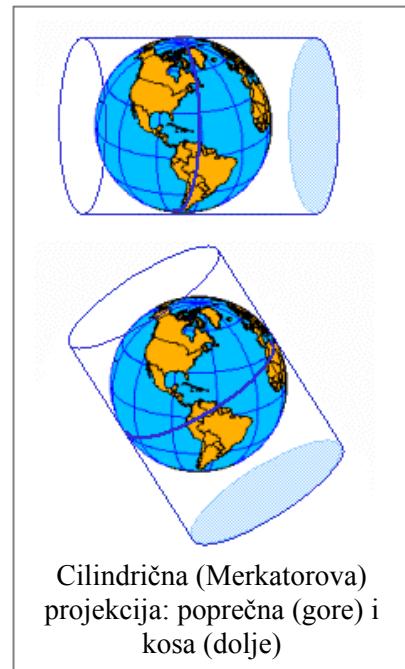
Slika 140. Tipovi projekcija u odnosu na položaj ravnini projektovanja: polarna, ekvatorijalna i kosa.

Gaus-Krigerova (Gauß-Krügerova) projekcija, **polikonusna** i **Lambertova konformna konusna projekcija**. U Crnoj Gori je u službenoj upotrebi Gaus-Krigerova (poprečna cilindrična konformna) projekcija rotacionog Beselovog elipsoida.

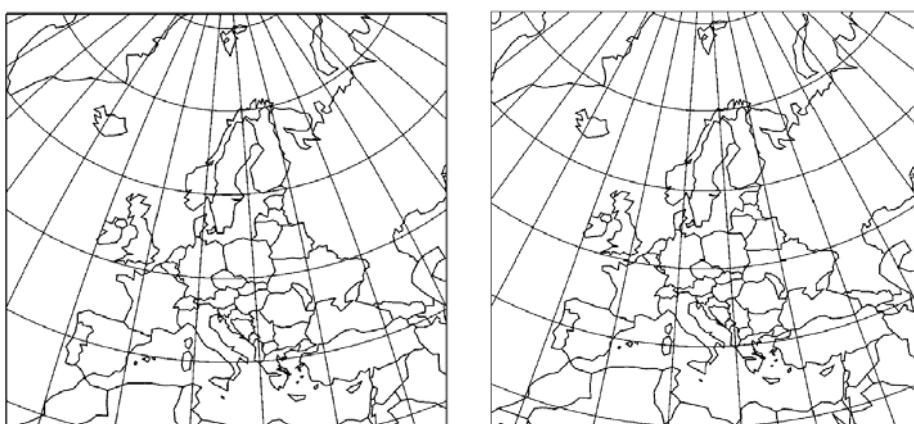


Slika 141. Ekvidistantna cilindrična projekcija Svijeta.

Pri izradi svake karte najprije treba izabrati odgovarajuću projekciju i zatim konstruisati mrežu meridijana i uporednika. U tu svrhu danas postoje kompjuterski programi koji omogućuju automatsko prikazivanje kartografskih mreža za bilo koji dio zemljine sfere ili elipsoida u bilo kojoj projekciji i bilo kojoj **razmjeri**. Takvi programi istovremeno omogućuju crtanje i drugih sadržaja.

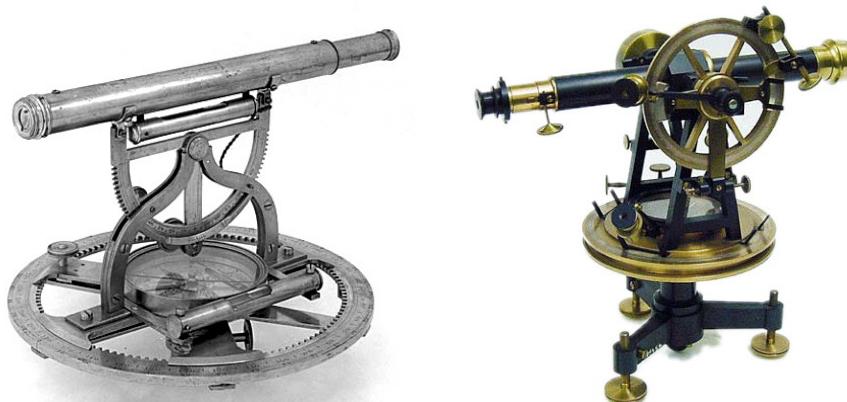


Cilindrična (Merkatorova) projekcija: poprečna (gore) i kosa (dolje)



Slika 142. Azimutalna (lijevo) i konformna (desno) projekcija prostora Evrope.

Pod **razmjerom** karte podrazumijeva se količnik neke dužine prikazane na karti i njene realne vrijednosti u prirodi, a predstavlja neimenovan broj. Tako, na primjer, na karti razmjere 1:25.000, dužina od jednog centimetra ekvivalentna je dužini od 25.000 cm, odnosno 250 metara u prirodi.



Slika 143. Izgled prvih konstrukcija teodolita.

Prva praktična osmatranja u geodeziji obavljana su primjenom vrlo primitivnih mehaničkih instrumenata - sve do početka XIX vijeka, kada započinje izrada prvih optičkih geodetskih i astronomskih instrumenata (slika 143). Danas se u geodeziji koristi više vrsta instrumenata, ali se svi oni mogu svrstati u četiri osnovne grupacije: **teodoliti, niveliri, daljinometri i satelitski geodetski uređaji**. Teodoliti su instrumenti za određivanje uglova i rastojanja. Nivelirima se određuju visinske razlike, dok daljinomjeri služe za direktno optičko digitalno mjerjenje međusobnog rastojanja dvije tačke, danas postižući tačnost od 1 milimetra.



Slika 144. Izgled savremenog elektronskog digitalnog teodolita (lijevo) i totalna stanica tipa "Lajka" TPS1200 (desno) koja omogućuje potpuno automatizovano snimanje zadatih kompleksnih objekata i površi.

Savremene konstrukcije ovih uređaja (slika 144) posjeduju izuzetne performanse: teodolitima se, na primjer, mjeri uglovi sa tačnošću od $1''$ (lučni sekund). Rastojanja se mogu mjeriti elektronskim (danasa i digitalnim) teodolitima na bazi emitovanog i reflektovanog laserskog zraka na viziranoj tački* pri čemu se postiže tačnost od 1-2 mm na rastojanjima od nekoliko stotina metara. Niveliri su geodetski instrumenti kojima se određuje samo visinska razlika između dvije tačke, postižući vrlo visoku tačnost. Daljinomjeri su ručni elektronski instrumenti kojima se na bazi laserskog impulsa mjeri vrijeme reflektovanja od neke tačke na koju pada laserski zrak, pri čemu nije potrebno koristiti nikakve posebne reflektore. Postignuta tačnost mjerjenja rastojanja do oko 200 metara iznosi oko 1,5 mm.

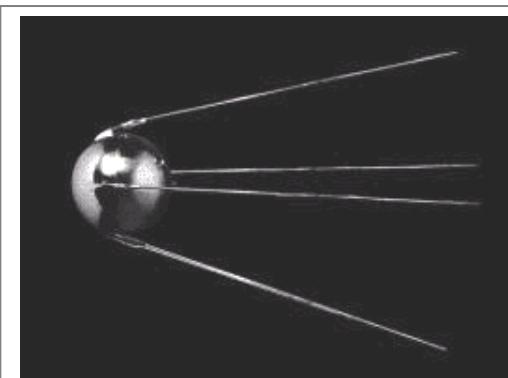
Danas se u savremenim geodetskim snimanjima kompleksnih površi i objekata primjenjuju tzv. totalne stanice ili robotizovane geodetske stanice (slika 145), koje su u potpunosti automatizovane: na bazi programiranog procesa, one obavljaju potpuno autonomnu proceduru snimanja okolnog prostora sistemom laserskog reflektovanja, ili je snimanje automatski navođeno na pokretnu reflektivnu prizmu koja se sistematski premješta po terenu.

* Za reflektovanje zraka obično se koristi reflektujuća prizma koja se postavlja na tzv. geodetskoj znački na viziranoj tački, dok se kod vrlo savremenih teodolita na rastojanjima do par stotina metara i ne mora koristiti prizma, već se reflektovanje obavlja na postojećim fizičkim objektima na koje zrak padne.

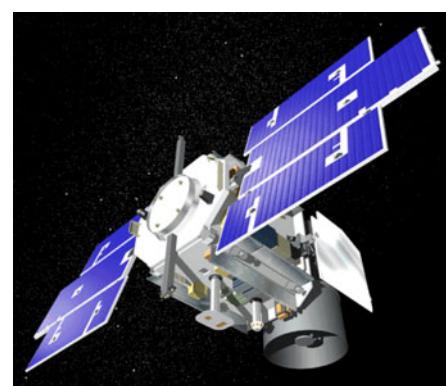
8.2. Geodetska osmatranja primjenom satelitske tehnike

Geodetska osmatranja primjenom satelitske tehnike ili era tzv. **kosmičke geodezije**, započinje lansiranjem vještačkog satelita "Sputnjik 1" (slika 145) tokom tzv. Međunarodne geofizičke godine 1957. kada se stvaraju uslovi za novi pristup istraživanju oblika Zemlje – snimanjem sa satelita ili snimanjem sa Zemlje uz reflektovanje signala sa satelita. Era kosmičke geodezije obuhvata nekoliko faza razvoja savremenog geodetskog opažanja korišćenjem satelitske i terestričke tehnike:

- Prvi period satelitske geodezije pripada tzv. **optičkoj eri**, u kojoj je satelitsko snimanje vršeno u optičkom domenu. U tom periodu intenzivno se razvija nova oblast istraživanja Zemlje, nazvana Daljinska detekcija, koja je bazirana na snimanju i analizi fotografija tla iz satelita (ili aviona).
- Formiranjem **Navigacionog satelistkog sistema** (NNSS) baziranog na snimanju reljefa tla na osnovu doplerovog spektralnog pomaka radio signala u funkciji rastojanja od satelita, započinje novi period osmatranja u satelitskoj geodeziji, nazvan Doplerov period. Sateliti ovog sistema kretali su se po gotovo idealno kružnim putanjama oko Zemlje, na visini od 1.100 kilometara. Velika prednost ovog sistema u odnosu na optičko snimanje bila je okolnost da snimanje nije bilo ometano prisustvom oblaka. NNSS sistem satelita je prestao sa radom tokom 1996. godine.
- Sistem satelita nazvan **SLR** (Satellite Laser Ranging) za satelistko lasersko* mjerjenje rastojanja, kao i sistem **LLR** (Lunar Laser Ranging) lasersko mjerjenje rastojanja Mjeseca, razvijeni su tokom osamdesetih godina prošlog vijeka. Kod ove vrste geodetskog opažanja koristi se snažan laserski signal koji se sa Zemlje usmjerava na određenu tačku opažanja (satelit ili Mjesec), sa koje se taj signal reflektuje i vraća ka prijemniku (slika 146). Mjerjenjem vremena putovanja talasa od momenta emitovanja do prijema njegove refleksije i množenjem ovog dvostrukog vremena sa brzinom svjetlosti, moguće je utvrditi opažano rastojanje sa tačnošću od samo nekoliko milimetara. Ovakva snimanja intenzivno su korišćenja za globalno kartografisanje gravitacionog polja Zemlje i utvrđivanje oblika geoida, s obzirom da je putanja satelita isključivo diktirana karakteristikama gravitacionog polja Zemlje.



Slika 145. Izgled prvog vještačkog satelita "Sputnjik 1" Sovjetske proizvodnje.



Slika 146. Princip SLR satelitskog mjerjenja rastojanja (lijevo) i satelit ICESat za osmatranja količine leda na polovima (desno).

* Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – pojačanje svjetlosti stimulisanom emisijom zračenja) predstavlja uređaj koji vrši amplitudno povaćanje monohromatske svjetlosti (jedne talsne dužine) i njeno usmjereno emitovanje.

SLR sistem obuhvata preko 40 satelita sa specijalnim, tzv. retroreflektorima laserskog impulsa. Tokom gotovo 40 godina njihovog rada, ova mreža satelita bila je značajan izvor preciznih podataka korišćenih u proučavanju oblika Zemlje, okeana i atmosferskih sistema. SLR sistem satelita se koristi i za opažanje kretanja tektonskih ploča, regionalnih plimskih talasa, laganog izdizanja djelova kopna u pripolarnim regionima, koje nastupa kao posljedica zadnje interglacijacije, itd. LLR tehnika laserskog mjerjenja koristi se i za osmatranje sekularnog povećanja rastojanja Mjeseca od Zemlje, što smo već pominjali.

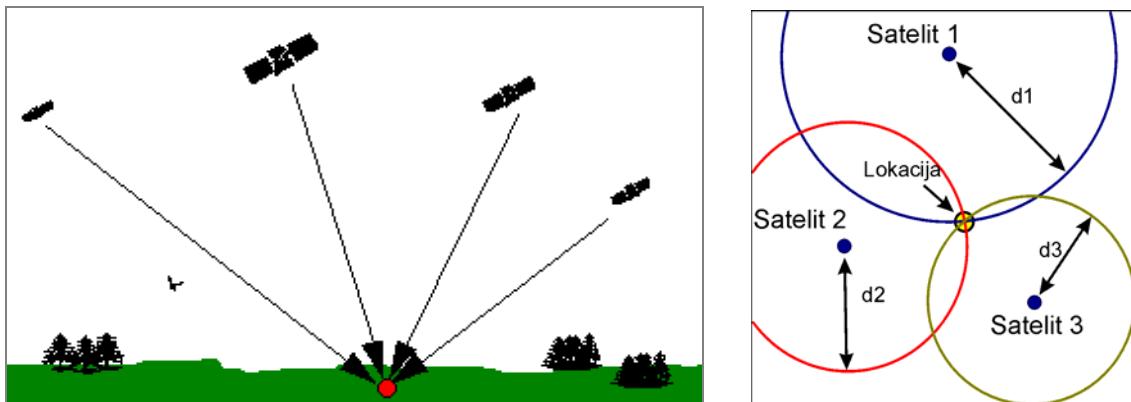
- **VLBI** (Very Long Baseline Interferometry) interferometrija na vrlo dugoj bazi - predstavlja geometrijsku tehniku mjerjenja koja koristi vrlo precizna mjerjenja rastojanja do nekog veoma udaljenog kosmičkog izvora elektromagnetskog talasa, na osnovu fazne razlike registrovane pomoću sistema parova zemaljskih antena. Obično se kao izvor elektromagnetskog talasa koristi veći broj kvazara, koji se snimaju globalnom mrežom većeg broja antena, a registrovanje fazne razlike se obavlja sa tačnošću pikosekunde. Ova tehnika mjerjenja zapravo predstavlja metod interferometrije. S obzirom da su antene fiksirane na Zemlji, ovaj sistem se koristi i za utvrđivanje tzv. Zvjezdanih referentnih sistema za koji se vezuju sva kosmička opažanja. U tu svrhu, Međunarodna astronomski unija je odredila oko 500 kosmičkih objekata – izvora radio-talasa (većinom su to kvazari) kao referentne za Zvjezdani referenti sistem. VLBI osmatranja su finansirana od strane preko 40 organizacija lociranih u 17 zemalja. Inače, ova tehnika se koristi i za osmatranje sporih kretanja tektonskih ploča, regionalne deformacije zemljine kore, varijacije u položaju zemljine ose, dužine dana, kao i za poboljšanje atmosferskih modela.
- Misija **altimetrije** (mjerjenja visina) zasnovana na radarskoj tehnici, značajno je uvećala saznanja o reljefu morske i okeanske površi, okeanskim strujama, plimskim oscilacijama okeana itd. Metod je zasnovan na emitovanju visokofrekventnih radarskih impulsa radiotalasa iz satelita i snimanju reflektovanih signala sa zemljine površi, pri čemu je moguće sa visokom tačnošću odrediti denivelaciju reflektivnih površi. Radarska satelitska snimanja imaju izuzetan intenzitet, s obzirom da su rezultati tih osmatranja našli primjenu u mnogim oblastima nauke, ali i u vojnim potrebama. Postoji veliki broj takvih sistema: GEOS, SEASAT – za osmatranje topografije morske površi, ERS, Envisat, TOPEX, ICESAT – za osmatranje količine leda i oblaka (slika 146, desno), CRYOSAT – za mjerjenje debljine leda na polovima itd.
- **SAR i InSAR** (Satellite Aperture Radar) satelitska osmatranja sistemom radara predstavlja metod savremenog osmatranja deformacija na velikim površima Zemlje. Intenzivno se koristi u mjerenu tektonskih deformacija i istraživanjima pripremne faze velikih zemljotresa.
- **Satelitska gravimetrijska snimanja** realizuju se kroz nekoliko sistema satelita, kao što su CHAMP, GRACE i GOCE koji omogućuju mjerjenje globalnih gravitacionih karakteristika Zemlje sa visokom tačnošću i rezolucijom. Geoid definisan na ovaj način, uključujući i terestričke rezultate gravimetrijskih mjerjenja, omogućuje kvalitetnu bazu za mjerjenje visina na Zemlji, koje se oslanjaju na taj sistem.
- **GNSS** (Global Navigation Satellite System) globalni navigacioni satelitski sistem, omogućuje visoku tačnost u pozicioniranju i navigaciji i primjeni u brojnim privrednim i društvenim oblastima, a posebno u:



Slika 147. Izgled savremene GPS stанице.

saobraćaju, transportu, istraživanju i upravljanju prirodnim resursima, poljoprivredi, terenskim istraži-vanjima, urbanom planiranju i upravljanju, kao i brojnim drugim značajnim domenima života. Tokom prethodnih dvadeset godina, razvijena su dva nezavisna sistema sličnih performansi i načina rada: američki NAVSTAR i ruski GLONASS. Treći poseban sistem, nazvan GALILEO razvija Evropska Unija, ali je on tek u početnoj fazi; Smatra se da će biti u funkciji do kraja 2008. godine.

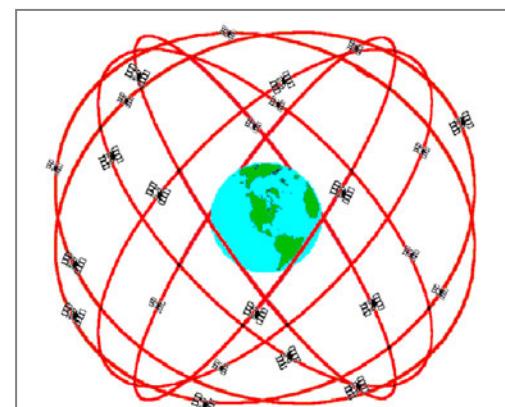
Svi ovi sistemi su bazirani na principu mjerjenja vremena potrebnog radio-talasu da od satelita pređe put do prijemne tačke (na Zemlji ili u vazduhu) i ukurštanju većeg broja takvih mjerjenja u mreži vidljivih satelita. Mjerjenje tog vremena je omogućeno kodiranjem emitovanih signala podatkom o trenutku emitovanja, te se na osnovu informacija o vremenu putovanja tih talasa od grupe satelita do prijemnika (iz razlike u vremenu predaje i prijema) mogu odrediti sve tri prostorne koordinate mjesta prijemnika, jednostavnom geometrijskom metodom presijecanja krugova (odnosno sfera) iz svakog od primljenih satelita (slika 148).



Slika 148. Princip pozicioniranja tačke na terenu na osnovu nekoliko GPS satelita (najmanje 3).

Varijanta GNSS metode koja se koristi za geodetska osmatranja naziva se **GPS** (Global Positioning System) odnosno sistem globalnog pozicioniranja (slika 148). Danas se ovaj sistem smatra nezamenljivim, s obzirom da je svojom operativnošću i preciznošću našao značajne primjene u mnogim naučnim i društvenim oblastima, kao što su navigacija u svim domenima primjene (kola, avioni, brodovi), terenskom pozicioniranju i snimanju, istraživanju atmosfere, geofizičkim i geološkim istraživanjima itd. Pošto GPS sistem satelita posjeduje i posebno kontrolisani sistem tačnog vremena visoke pouzdanosti i rezolucije (tačnost je reda milionitog od sekunde) našao je primjenu i za održavanje vremenske baze u nizu praktičnih domena.

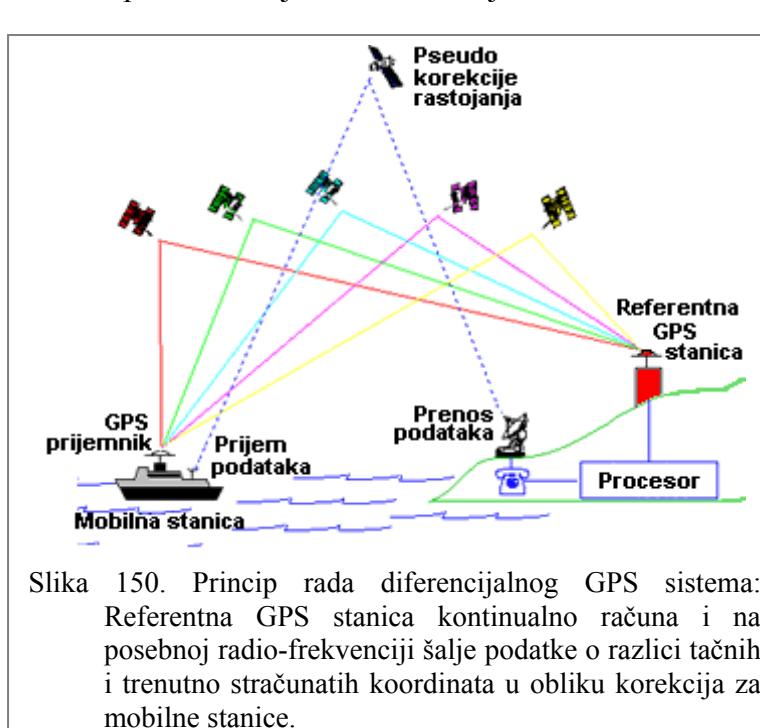
NAVSTAR GPS sistem čini od 24 specijalna satelita koji su postavljena u 6 orbitalnih ravni (slika 149), sa po 4 satelita u svakoj ravni, tako da je u svakom trenutku sa većeg dijela Zemlje vidljivo 6 satelita. prosječna visina orbitalnih ravni ovog sistema je 20.200 kilometara iznad Zemlje. Sistem GLONAS, koji je još u fazi kompletiranja (trenutno ima 20 satelita) koristi tri orbitalne ravni na prosječnoj visini od 19.140 kilometara iznad Zemlje.



Slika 149. Šema položaja NAVSTAR GPS sistema satelita oko Zemlje

Naglasimo da su sva GNSS mjerjenja su vezena za Svjetski geodetski sistem WGS84.

Tačnost pozicioniranja ostvarena u jednostrukom GPS opažanju na nekoj tački zavisi od mnogo trenutnih faktora, kao što su međusoban položaj satelita i tačke pomatranja, stanje jonsfere, toposfere, nivoa radio smetnji u zoni mjerena, hoda časovnika, greške zbog nepoznatnih efemera* satelita, itd. Takva uobičajena tačnost je oko ± 30 metara. Međutim, višestrukim ponavljanjem mjerena na istoj tački može se ostvariti znatno bolja tačnost. Radi eliminacije nekih pobrojanih izvora grešaka u GPS pozicioniranju, danas se intenzivno koristi tehnika tzv. diferencijalnog globalnog pozicioniranja (ili DGPS), koja omogućuje automatsko unošenje tzv. diferencijalne korekcije u



Slika 150. Princip rada diferencijalnog GPS sistema: Referentna GPS stanica kontinualno računa i na posebnoj radio-frekvenciji šalje podatke o razlici tačnih i trenutno stračunatih koordinata u obliku korekcija za mobilne stanice.

mjerjenje. Ova metoda zahtijeva korišćenje posebnog GPS prijemnika, tzv. ***bazne stanice***, na kojoj se kontinualno vrši definisanje relativnog (trenutnog) položaja bazne stanice, u koji su uključene sve trenutne greške tih mjerena. Pošto je fizički (geodetski) položaj bazne stanice poznat na osnovu preciznih geodetskih mjerena prilikom njenog postavljanja, korekcije za sve tri prostorne koordinate se lako mogu sračunati kao razlika parova vrijednosti stvarnih koordinata bazne stanice i trenutno utvrđenih na osnovu GPS pozicioniranja. Te korekcije se na posebnom radio-kanalu emituju do mobilnih (terenskih) stanica, koje u automatskom režimu vrše njihov prijem i popravku mjereni podataka na svojoj lokaciji. Na taj način tačnost pozicioniranja se višestruko poboljšava i za jedno osmatranje svodi na nivo od $\pm 1 - 5$ metara. Višestrukim ponavljanjem mjerena uz primjenu DGPS metode, tačnost koordinata se može podići na nivo od oko 1.5 centimetar.

Danas se intenzivno koristi GPS tehnika mobilnog pozicioniranja sa ručnim verzijama GPS uređaja (slika 151), koji postaju praktično nezamjenljivi instrumenti za brzo i tačno terensko pozicioniranje, sa primjenom u gotovo svakoj sferi privrednog i društvenog života.

Pomenimo još, kada je riječ o vještačkim satelitima, da postoje i: astronomski sateliti (za osmatranje kosmičkih objekata, kao što je na primjer "Hab" satelit, koji smo pominjali), zatim komunikacioni sateliti za pomoć u telekomunikaciji, koristeći radio i mikrotalasne opsjege, na geostacionarnim (stalno iznad jedne tačke na Zemlji) putanjama, zatim sateliti za osmatranje Zemlje – za meteorološka proučavanja, kartografisanja, ekološki monitoring, različite vrste optičkog i druge vrste snimanja zemljine površi; navigacioni sateliti služe za pozicioniranje, kao što smo malo prije govorili,



Slika 151. Razni tipovi ručnih GPS prijemnika.

* Efemericama se nazivaju precizni podaci (u tabelarnom obliku) o položaju satelita i nebeskih tijela za određeni period vremena.

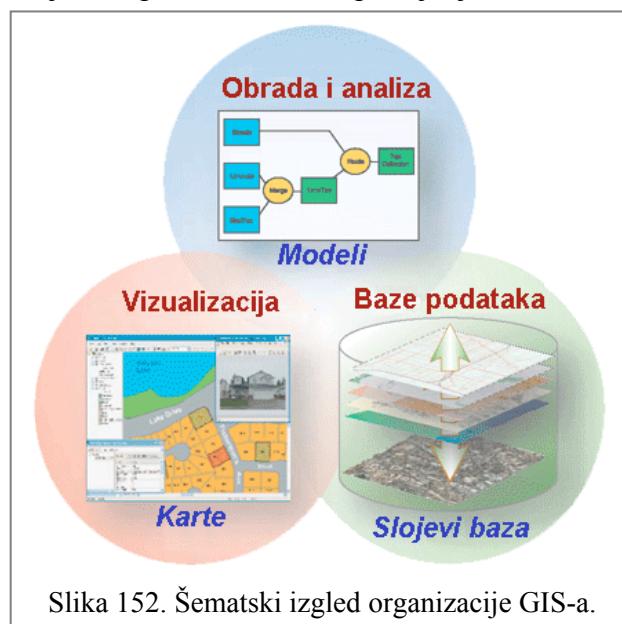
vojni sateliti za osmatranja za vojne potrebe itd. jedna od značajnih karakteristika satelita je visina orbite na kojoj se kreće oko Zemlje. Naime, razlikuju se sljedeće kategorije orbita: niske orbite koje zauzimaju visine između 200 i 1.200 kilometara iznad Zemljine površi, srednje visine su u dijapazonu 1.200 i 35.790 km, dok visoke orbite obuhvataju zonu iznad 35.790 km. Geostacionarne putanje satelita su najčešće na visini od 35.790 km, koje smo već pominjali u poglavljju o atmosferi i Meteorologiji.

9. OSTALI DOMENI GEONAUKA

Kao što smo u uvodnom dijelu ovog udžbenika naveli, oblasti geonaučnih disciplina su veoma brojne i razuđene, te ih u ovom kratkom kursu nije moguće u cijelosti nabrojati i adekvatno opisati. Iz tih razloga, ovdje ćemo vrlo kratko opisati najvažnije karakteristike samo još tri najznačajnije oblasti geonauka: geografski informacioni sistem, geostatistiku i ekologiju.

9.1. Geografski informacioni sistem

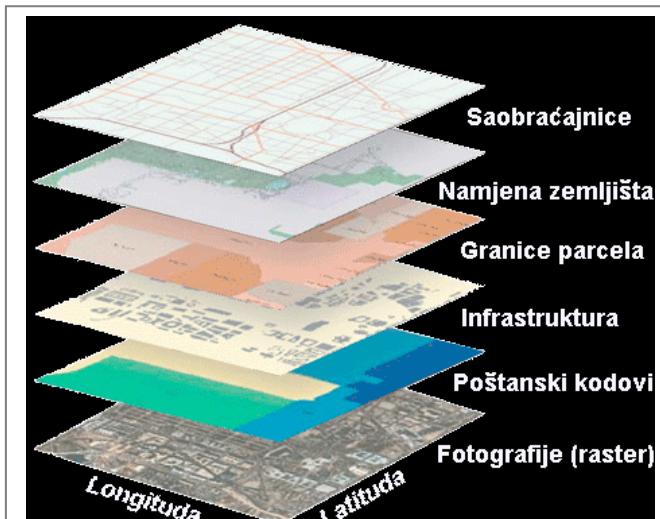
Geografski Informacioni Sistem (GIS) predstavlja kompleksan sistem upravljanja, zasnovan na funkcionalnom spoju specijalnog softvera*, hardvera* i kompleksne baze informacija. Podaci na kojim je GIS baziran najčešće su pozicionirani u prostorno-vremenskom koordinatnom sistemu, pošto izržavaju stanje snimljenih fizičkih procesa i karakteristika u funkciji prostornih koordinata i podatka o vremenu na koje se odnose. U ovom slučaju pojam "geografski" korišćen je u najširem smislu – dakle GIS može obuhvatati bilo koju od oblasti prirodnih i geonauka i disciplina ili drugih naučnih oblasti. GIS se može opisati i kao automatizovani sistem metoda, funkcija i baza, prostorno distribuiranih podataka, koji obezbeđuje efikasan način analize, kompiliranja, odlaganja i vizualizacije tih podataka.



Slika 152. Šematski izgled organizacije GIS-a.

GIS je, kao nova tehnologija u posljednjih dvadesetak godina, imao izuzetno veliki uticaj na razvoj metoda istraživanja u raznim domenima geonauka, društvenih i drugih disciplina i komunikacija. Danas tehnologiju GIS-a koristi izuzetno veliki broj institucija i pojedinaca – počev od državnih institucija, univerziteta, instituta i preduzeća, za potrebe raznih vrsta istraživanja.

GIS zahtijeva definisanje ulaznih podataka koji mogu biti u obliku brojčanih vrijednosti i atributa, zatim karata, vazdušnih i satelitskih snimaka i brojnih drugih vrsta podataka. GIS mora posjedovati siguran način pohranjivanja podataka, njihovog intelligentnog pretraživanja, kao i interaktivnog integrisanja, transformisanja, analiziranja,



Slika 153. Primjer organizacije slojeva baza podataka u GIS-u.

* Software (engl.) - kompjuterski program.

* Hardware (engl.) - uređaj visoke elektronske tehnologije, u konkretnom slučaju - računarska oprema.

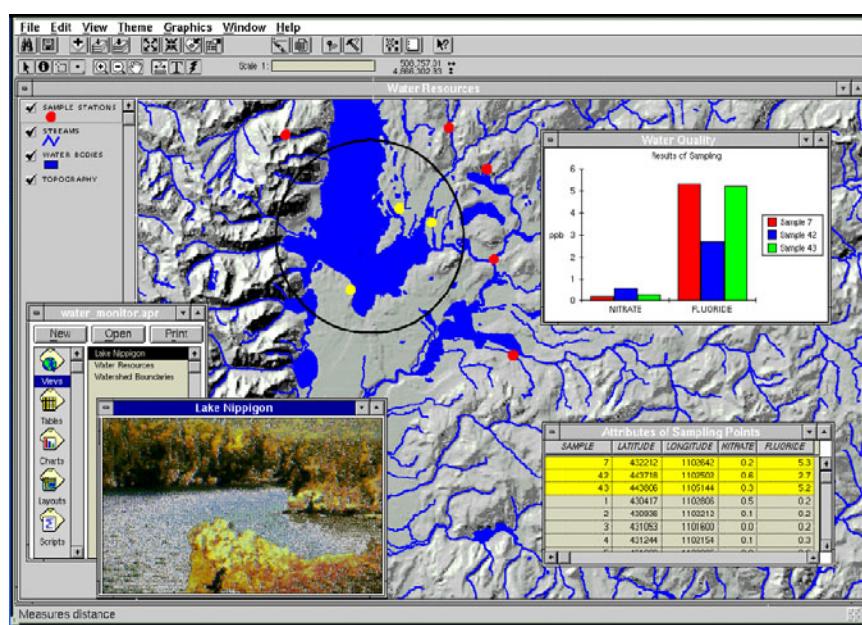
modelovanja i prikazivanja rezultata takvih operacija (slika 149). Prikazivanje se može izvršiti putem generisanja karata, izvještaja, tabela, planova, rezultata modelovanja u raznim oblicima na displeju računara, u štampanom, plotiranom ili digitalnom obliku na magnetskom mediju.

U GIS-u su podaci u bazama organizovani u obliku serija tematskih slojeva i tabela (slika 154). Pošto su svi podaci u geografskom informacionom sistemu najčešće referencirani u prostoru (i vremenu), sa određenim položajem u realnom svijetu, to se ovi podaci iz različitih grupacija (slojeva) mogu međusobno preklapati, interagovati. Na primjer, u nekom GIS-u homogena kolekcija geografskih objekata može biti organizovana u obliku slojeva kao što su parcele, bunari, građevinski objekti, avionske i satelitske fotografije, digitalni elevacioni modeli terena itd. Izgled jednog prikazan je na slici 155.

GIS se intenzivno koristi u geologiji, biologiji, šumarstvu, agrikulturi, saobraćaju, okeanografiji, planiranju prostora, građevinarstvu, antropologiji, arheologiji, lingvistici, ekonomiji, političkim naukama i mnogim drugim oblastima.

	Attributes of States	Map												
	State_name	Code	Sub_code	Code_alpha	Pop2001	Pop2002	Pop2003	Pop2004	Area_miles	Altitude	Latitude	Longitude		
Federated_States_of_Micronesia	Washington	53	Pacific	Wash	4566671	4563261	73	1872431	417147	454254	48901	44843	Z	
Frager	West Virginia	30	Mountain	WV	729665	7002172	30	501645	404126	402326	414111	38801	Avg	
Frager	Wisconsin	32	Midwest	Wisc	122729	1246201	30	49571	53050	53070	120386	5139	5558	
Frager	North Dakota	38	W_N_Cent	ND	688800	684782	30	490878	3182	302539	604142	35241	25917	
Frager	South Dakota	45	W_N_Cent	SD	686004	736549	9	498034	347658	359506	404142	3259	50575	
Frager	Wyoming	55	W_N_Cent	WY	457053	404252	5	60035	227005	228051	472961	3605	3475	
Frager	Alaska	56	Alaska	AK	407384	501539	37	187216	18250	18250	454254	454254	454254	
Frager	Florida	58	SE_Cent	FL	100343	121013	30	490878	50050	50209	300301	300301	13780	
Frager	Michigan	59	Midwest	MI	587789	59495	20	210600	277442	287266	505588	1951	1636	
Frager	Vermont	60	NE_East	VT	457053	457053	52	164759	241813	222815	413038	9441	43903	
Frager	Minnesota	67	W_N_Cent	MN	457053	457053	52	164759	241813	222815	413038	9441	43903	
Frager	Oregon	41	Pacific	OR	264321	324542	28	1103315	138073	148545	636287	48173	38486	
Frager	New Hampshire	30	NE_East	NH	110325	110325	120	411106	541000	500500	1097423	7139	5126	
Frager	Connecticut	31	NE_East	CT	27225	255850	43	187216	18250	18250	454254	454254	454254	
Frager	Massachusetts	29	NE_East	MA	601645	616388	26	247115	208745	212700	454254	454254	454254	
Frager	Nebraska	31	W_N_Cent	NE	157385	166813	28	622633	763439	803548	1490558	3740	12410	
Frager	New York	35	Mid-Atl	NY	175904	187295	30	563829	563829	563829	1338765	293955	62651	6
Frager	Pennsylvania	42	Mid-Atl	PA	188143	205902	52	1459966	1459966	1397378	1505201	1093795	14733	1
Frager	Connecticut	43	NE_East	CT	327115	327115	66	136401	136381	1664143	327115	327115	327115	
Frager	Rhode Island	44	NE_East	RI	36074	36074	36	187216	18250	18250	454254	454254	454254	
Frager	Montana	27	Mid-Atl	MT	773819	801528	27	21741	21741	22944	318045	165625	14930	Z
Frager	Idaho	38	EN_Cen	ID	254412	287484	120	200552	286220	202870	70070	43228	17470	
Frager	North Dakota	30	Mid_West	ND	127333	165283	11	486281	611880	589593	101258	79771	19677	
Frager	Utah	43	Mountain	UT	172895	203457	20	537273	537273	86719	161945	17075	24263	
Frager	Alabama	45	SE_Cent	AL	139130	120106	149579	4821294	4921294	2954537	2238601	24146	28	
Frager	Arkansas	41	Mid-Atl	AR	314704	314704	100	490878	490878	490878	490878	490878	490878	
Frager	Illinois	46	Midwest	IL	1448002	1686193	20	323204	555221	526360	1490558	21747	21666	
Frager	District of Columbia	11	SE_Atl	DC	603600	505622	3187	248594	282370	320320	729887	338904	1490558	
Frager	Delaware	10	SE_Atl	DE	66618	731218	304	247937	329368	342100	529568	112640	2019	
Frager	West Virginia	54	SE_Atl	WV	173477	180833	74	686957	686957	93141	172523	9625	24595	
Frager	Marlboro	24	SE_Atl	MD	471465	510639	49	174896	23867	245934	359384	119899	12972	1
Frager	Mississippi	22	Mid-Atl	MS	300000	300000	20	490878	490878	490878	490878	490878	490878	
Frager	Kentucky	21	SE_Sou	KY	365025	350065	3	137972	137972	1300000	231132	282307	5709	
Frager	Kansas	23	W_N_Cen	KS	247754	250333	30	348276	121945	126232	221389	11073	21265	
Frager	Virginia	55	SE_Atl	VA	617958	678895	155	229130	234081	151388	179173	152188	152182	1
Frager	Hispanic	60	W_N_Cen	HI	511073	538757	73	196176	204381	265729	582688	540308	13635	
Frager	Arizona	13	Mountain	AZ	965229	495866	32	169643	170507	180545	763036	211004	20257	
Frager	Colorado	40	W_S_Cen	CO	214955	316022	45	170615	170615	161465	235575	233000	25420	
Frager	North Carolina	37	SE_Atl	NC	663837	741239	130	251732	324240	414147	300491	145632	8015	

Slika 154. Izgled segmenta jedne baze podataka GIS-a, prikazane u tabelarnom obliku.



Slika 155. Izgled procesa analize i upravljanja vodnim resursima u jednom GIS-u.

U GIS-u se koriste grafičke podloge koje mogu biti *rasterske* ili *vektorske*. U rasterskoj grafici, podaci o grafičkom sadržaju su organizovani u tačkastom obliku – preko dvodimenzijskih matrica (kolona i redova) čiji elementi predstavljaju različite boje koje reprezentuju određeni sadržaj preko odgovarajuće legende (slika 156). Vektorska grafika izražava sadržaj preko geometrijskih oblika – tačaka, linija i poligona (slika 156). Koristeći ovaj način izražavnja

grafičkog sadržaja, mogu se prikazivati putevi, objekti, parcele i drugi specifični sadržaji GIS-a. Grafičke podloge i dokumenti u rasterskom obliku obično su snimljeni tehnikom elektronskog skeniranja na računaru ili digitalnog fotografisanja – metodom tačka po tačka, dok se vektorska grafika obično definiše digitalizacijom sadržaja grafičkih i drugih priloga metodom diskretizacije na elektronskom digitalizatoru, koji omogućuje automatsko konvertovanje analognih u digitalne sadržaje.

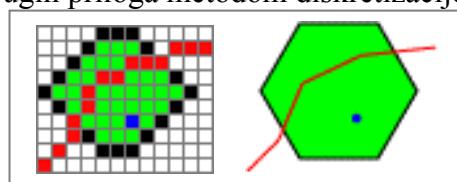
Kao izvori podataka za pripremu prostorno referenciranih baza podataka za GIS, korsite se na primjer, sljedeće metode, tehnike i oblasti:

- Daljinska detekcija, koja obuhvata aero i satelitske snimke tla sa softesticiranim metodama i funkcijama analize, procesinga i prikazivanja sadržaja tih slika (poglavlje 5.6);
- Geodezija, kartografija i GPS, kao izvori niza podataka visoke preciznosti o sadržjima na tlu, reljefu, obliku Zemje i slično (poglavlje 8);
- Matematičke i statističke metode za analizu i obradu podataka i informacija;
- Kompjuterske metode i tehnike za unošenje informacija, njihovu obradu i prikazivanje;
- Agrikultura i korišćenje zemljišta, što obuhvata inventar i monitoring uslova uzgajanja poljoprivrednih kultura, godišnju proizvodnju, hidrološke, meteorološke i druge relevantne podatke;
- Šumarstvo, koje pored sadržaja i tipa šumskih površi, obuhvata prebivališta životinjskog svijeta, vodnih resursa itd.;
- Arheološke informacije specifiziraju prostore koji su zaštićene namjene s obzirom da sadrže arheološke lokalitete;
- Geologija predstavlja jedan od najobimnijih izvora raznovrsnih informacija o tlu, snimljenim geološkim procesima, rudnim pojavama i resursima (poglavlje 6), itd.
- Urbanizam i građevinarstvo, kao izvori podataka o planiranju i korišćenju prostora,
- Infrastrukturni urbani elementi, koji su opisani podacima o položaju naselja, puteva, parkova, demografiji itd.

Danas postoji razvijen veliki broj kompjuterskih softverskih alata za pripremu i primjenu GIS-a. Široko rasprostranjen program takve namjene je, na primjer, **ArcGIS** koji integriše tri posebna modularna segmenta programa i to: za stvaranje karata i manipulaciju sa njima (arcMap), zatim za organizaciju, obradu i pregled baza podataka (ArcCatalog) i za konverziju podataka u različite formate (konfiguraciju baza - ArcToolBox);

Da bi GIS ispunio svoju namjenu, njegove baze moraju posjedovati tačne, relevantne i aktualne podatke o sadržajima koje opisuju. Iz tih razloga, baze podataka je neophodno kontinualno dopunjavati novim, aktualnim sadržajima, saglasno dogođenim promjenama u realnoj sredini. Treba naglasiti da značajnu komponentu kvalitetnog i funkcionalnog GIS-a čini stručno, visokokvalifikovano osoblje, koje obavlja sve vitalne funkcije GIS-a: unos i kontrolu podataka, njihovo integriranje, modelovanje, obradu i utvrđivanje relevantnih zaključaka za kvalitetne prognoze i pouzdano upravljanje sistemima.

Geografski informacioni sistemi se u praksi organizuju i pripremaju po raznim tematskim oblastima naučnih disciplina. Tako, na primjer, za jednu, prostorno šиру oblast, kao što je teritorija Crne Gore, moguće je organizovati GIS u oblasti geologije. Takav Geološki Informatcioni Sistem bi integrisao sva relevantna saznanja o geologiji Crne Gore. Iako na prvi pogled, takav GIS izgleda jednostavan, ipak njegova priprema i potencijalni sadržaji su izuzetno kompleksni. Takav informacioni sistem bi morao da sadrži i integrise veliki broj informacionih slojeva ili baza podataka, od kojih pomenimo samo neke:



Slika 156. Rasterski i vektorski način prikazivanja istog sadržaja: tačka, linija i poligon.

- digitalne topografske osnove cijele teritorije, digitalizovane u razmjeri optimalnoj za kvalitetno i efikasno izražavanje sadržaja svih sadržaja GIS-a,
- detaljno digitalizovan sadržaj regionalne geološke karte cijelog tog područja,
- digitalnu pedološku kartu sa karakteristikama tla (sa tipim tla, njegovom teksturom, kiselošću, erozionim potencijalom itd.),
- morfološku kartu terena (kartu koja izražava nagibe terena),
- kartu površinskog biljnog pokrivača (sa podacima o dominatnim vrstama, dimenzijom i gustinom pokrivača),
- kartu hidroloških površi svih slivnih područja (rijeke, potoci, jezera, brane, vodozahvati i sl.),
- kartu hidrogeoloških karakteristika (sa svim informacijama o izvorištima, režimima kretanja podzemnih voda, dubinom nivoa podzemnih voda),
- kartu tektonskih i neotektonskih karakteristika (digitalizovana mreža rasjeda i drugih geoloških formi, izdiferencirane aktivne tektonske rasjede, zone izdizanja i spuštanja terena),
- seismološke podloge (karta epicentara zemljotresa, katalog dogođenih zemljotresa, karta seizmičkog hazarda, karte seizmičke mikrorejonizacije urbanih zona itd.),
- detaljni katalog bušotina na cijeloj teritoriji, sa svim relevantnim podacima (prostorni položaj bušotine, dubina bušenja, detaljan geološki opis jezgra bušotine),
- katalog rudnih pojava (aktivni starih rudnika, sa detaljnim karakteristikama, kao i rudnih pojava koje su geološki utvrđene ali nijesu eksplorisane) i mnoge druge.

9.2. Geostatistika

Geostatistika predstavlja relativno mladu naučnu oblast vezanu za nauke o Zemlji i matematiku. Ova oblast obuhvata primjenu statističkih metoda u proučavanju prostorno promjenljivih fenomena osmotrenih u geonaučnim disciplinama. Geostatistika se može definisati i kao statistika primijenjena na geologiju, ili uopštenije – na nauke o Zemlji. Iako je geostatistika prvi put bila primijenjena u istraživanju rudnih rezervi u rudarstvu, njen brzi razvoj i široka primjena je evidentna u mnogim naučnim oblastima.

Pored metoda statistike, matematike i teorije vjerovatnoće, geostatistika je bazirana na nekoliko ključnih koncepata i principa:

Model slučajne funkcije: pod slučajnom promjenljivom podrazumijevamo neku promje-nljivu koja može imati bilo koju, slučajnu vrijednost (na primjer kao rezultat bacanja novčića). Grupa takvih zavisnih slučajnih promjenljivih vrijednosti predstavlja slučajnu funkciju.

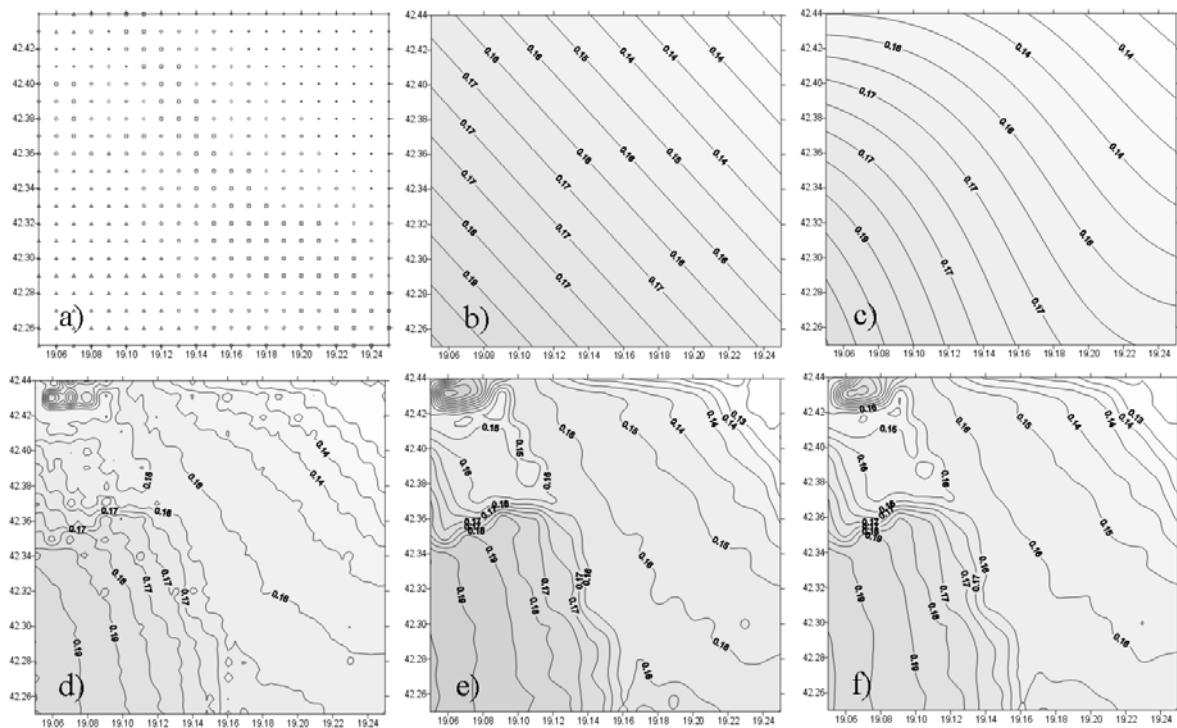
Stacionarnost: je princip koji na bazi usvajanja uslova nepromjenljivosti procesa između dvije sukcesivne (susjedne) vrijednosti nekog procesa ili polja, omogućuje interpolovanje u tom domenu.

Deklasterovanje: je metod razlučivanja klastera (grozdova) podataka u nekoj velikoj grupaciji podataka, po nekom zadatom principu.

Variogrami: su funkcionalni metodi korišćeni za karakterizaciju (ocjenu) kontinuiteta posmatrane promjenljive u prostoru.

Krigovanje: je metoda optimizacije (utvrđivanja optimalne vrijednosti ili oblika neke funkcije ili procesa) kod koje se primjenjuje linearни metod interpolacije u prostoru, pri čemu se težina podatka definiše obrnuto proporcionalno rastojanju tačke na koju se podatak odnosi. Na slici 157 prikazan je primjer primjene više metoda interpolovanja i aproksimacije na istu grupu podataka (na dijelu slike 157a). Rezultat primjene metode krigovanja prikazan je na dijelu slike 157f.

Simulacija: za numeričku simulaciju prirodnih fenomena razvijen je veliki broj metoda modelovanja, odnosno algoritama simulacije. Gausova simulacija je jedna od naj-jednostavnijih i najviše korišćenih metoda modelovanja u praksi.



Slika 157. Primjer primjene nekoliko metoda 2D interpolacije i aproksimacije na jednom polju podataka čiji raspored je prikazan na dijelu (a): b) linearna interpolacija pomoću površi prvog reda, c) površ četvrtog reda, d) Šepardova interpolacija, e) interpolacija sa težinom obrnuto proporcionalno kvadratu rastojanja i f) metoda krigovanja.

9.3. Ekologija

Riječ i prefiks “eko” nijesu novi u upotrebi. Naime, na grčkom “oikos” označava dom, ili mjesto gdje se živi. Prema tome, ekologija definiše naučnu oblast koja izučava interakciju prirode i živog svijeta u cjelini, kao i opšti raspored živućih organizama. Različiti organizmi tog živog svijeta imaju različitu ulogu u **ekosistemu** – kao dijelu životne sredine ili prirodnoj sredini u cjelosti. Raznolikost živilih organizama i njihove uloge u ekosistemu naziva se **biodiverzitet**. Narastanje biodiverziteta povećava stabilnost ekosistema.

Ekološka proučavanja se mogu obavljati na više nivoa: novo populacije (individualni ili nekoliko vrsta), zatim na novou biocenoze (zajednice vrsta), nivou ekosistema i nivou biosfere. Inače, Ekologija je vrlo široka naučna disciplina, koja obuhvata:

- ekofiziologiju (proučava uticaj biotičke i abiotičke okoline na fiziologiju pojedinca i prilagođivanje pojedinca okolini),
- ekologiju ponašanja (proučavanje ekoloških i razvojnih osnova ponašanja životinja i uloge njihovog ponašanja u adaptiraju života u “ekološkim nišama”),
- ekologiju populacije (kretanje populacije unutar vrsta i interakciju tih populacija sa faktorima okoline),
- sinekologiju (interakcija između vrsta unutar jedne ekološke zajednice),
- ekologiju ekosistema (tok energije i materije kroz ekosistem),
- globalnu ekologiju (proučavanje ekoloških problema na globalnom nivou, definisanu makroekološka pitanja),
- ekologiju životinja, biljaka, insekata itd.

Donošenjem Deklaracije Skupštine Republike Crne Gore 20. septembra 1991. godine i kasnije ustavnim odrednicama Crne Gore kao ekološke države, ova republika se principijelno i deklarativno opredijelila da prema prirodi uspostavlja poseban, državni odnos. U Deklaraciji, Skupština je pozivala “na mudrost sve ljude da spriječe ekološku katastrofu koja nam prijeti”. Iako je od dana donošenja ove Deklaracije prošlo već 14 godina, još uvijek nema vidljivih promjena u državnom odnosu prema očuvanju životne sredine. Ovo pitanje je posebno bilo potencirano krajem 2004. godine, kada je zahtijevano potapanja dijela kanjona rijeke Tare (koja je uvrštena u svjetsko nasljeđe UNESCO-a i nalazi se u Nacionalnom parku Durmitora), a za potrebe izgradnje hidroelektrane “Buk Bijela” na teritoriji Bosne i Hercegovne.

Posljednjih godina u Svijetu narasta svijest o potrebi zaštite i očuvanja životne sredine. Međutim, istovremeno se na mnogim mjestima na Zemlji intenzivira uništavanje šumskoog pokrivača i hemijskog zagađenja. Tipičan primjer su SAD, u kojima svijest pojedinaca i društva, o potrebi zaštite čovjekove okoline intenzivno narasta, što se ogleda u njihovoj aktivnosti na reciklaži svakodnevnog otpada, kao i zahtjevima više od 70 % ispitanika da se povećaju poreske takse u cilju bolje zaštite prirode. Međutim, industrija te zemlje (posebno vojna) ostvaruje više od 50 % ukupnog zagađenja u Svijetu, što ne sprječava SAD da sistematski izbjegava svoje obaveze u svjetskom pokretu smanjenja globalnog zagađenja.



Ostrva u Boko-kotorskem zalivu

Intenzivnim sagorijevanjem fosilnih goriva, dakle oslobođanjem ogromne količine ugljen-dioksida tokom posljednjih stotinak godina i emitovanjem gasova koji stvaraju efekat staklene bašte (o čemu smo pričali u poglavlju o atmosferi), veoma ubrzanim uništavanjem šuma, posebno u oblasti južne Amerike i oblasti tzv. kišnih šuma, stvaraju se uslovi za globalno povećanje temperaturu, globalno zagađenje atmosfere i globalno zagađenje pitke vode. Dalji efekat ovakvih procesa je nepredvidiv, ali u svakom slučaju veoma nepovoljan po cijelokupan živi svijet na planeti Zemlji.

Ujedinjene Nacije podstiču razvoj ideje o ***održivom razvoju društva*** u cjelini, kao rezultatu optimizacije tri razvojne komponente društva: korišćenje prirodne sredine s jedne i ekonomskog i socijalnog razvoja, s druge strane. Dakle, održivi razvoj bi magao da se definiše kao zadovoljenje potreba sadašnjice na održivom nivou koji ne ugrožava mogućnost ostvarivanja potreba budućih generacija.

10. KORISNA LITERATURA

- Anderson D. 1989. *Theory of the Earth*. Scientific publ., Boston
- Butler R. 1998. *Paleomagnetsim: Magnetic Domain to Geologic Terranes*. Dep. of Geosciences Univ. of Arizona.
- DMA Technical Report, 1984. *Geodesy for the Layman*. Defence Mapping Agency, Washington.
- Fowler C.M.R. 1990. *The Solid Earth: An Introduction to Global Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Heiskanen W., Moritz H. 1967. *Fizička geodezija*. Prevod: D. Blagojević, Građevinski fakultet Beograd.
- Kontić S. 1995. *Geodezija*. VII izdanje, Nauka, Beograd.
- Lowrie W. 1997. *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge University Press.
- Medvedev S. V. 1965. *Inženjerska seizmologija*. Prevod: M. Maksimović, Građevinska knjiga, Beograd.
- Nelson S. 2003. *Introduction to Physical Geology*. Tulane University.
- Olsen R. C. 2003. *Introduction to the Space Envirement*, PH 2514. Naval Postgraduate School.
- Radulović M. 2004. *Osnovi geologije*. Građevinski fakultet Univerziteta u Podgorici.
- Skinner B., Porter. S. 1999. *The Dynamic Earth: An Introduction to Physical Geology*. John Wiley&Sons, Inc.
- Smith J. 1996. *Introduction to Geodesy: the History and Concepts of Modern Geodesy*. John Wiley&Sons, Inc.
- Shearer P. 1999. *Introduction to Seismology*. Cambridge Univeristy Press.
- Stacey F. 1987. *Physics of the Earth*. Third Edition, Brookfield Press, Brisbane, Australia.
- Starčević M. 1991. *Gravimetrijske metode istraživanja*. Nauka, Beograd.
- Stefanović D. 1978. *Geomagnetske metode istraživanja*. Geofizički Institut, Beograd.
- The Defense Maping Agency, 1983. *Geodesy for the Layman*. DMA Technical report DMA TR 80-003, St. Louis AFS.
- Vušović N. 2004. *Istorijski pregled i koncepti savremene geodezije i rudarskih merenja*. Monografija, tom 1 i 2. Tehnički fakultet u Boru.

11. KORISNI INTERNET LINKOVI

www.hubble.nasa.gov ili www.hubblesite.org Snimci kosmičkih objekata Hablovim teleskopom.

<http://www.soest.hawaii.edu/coasts/lecture/gg170/resources.html> Elementi fizičke geologije.

<http://www.geology.wisc.edu/courses/g594/Lectures/index.html> Tekstovi i slike vezani za geologiju.

<http://geozavod.co.me/> Prezentacija J.U Repibičkog zavoda za geološka istraživanja Crne Gore.

<http://www.seismo.co.me> Internet prezentacija Seizmološkog zavoda Crne Gore.

<http://www.seismo.gov.rs> Prezentacija Republičkog seismološkog zavoda Srbije.

<http://www.emsc-csem.org/#2> Vrlo svježi podaci o aktualnoj seizmičnosti Mediterana i Svijeta.

<http://gldss7.cr.usgs.gov/neis/current/europe.html> Internet prezentacija geološke službe SAD (USGS) sa najsvježijim podacima o svjetskoj seizmičnosti.

<http://greenwood.cr.usgs.gov/pub/open-file-reports/ofr-99-0132/> Razmicanje okeanskog dna i globalna tektonika (USGS).

<http://denali.gsfc.nasa.gov/dtam/> Digitalni tektonski model Svijeta (NASA).

<http://www.meteo.co.me> Internet prezentacija Hidrometeorološkog zavoda Crne Gore.

http://homepages.wmich.edu/~cutrim/fall04_225.htm Uvod u meteorologiju i klimatologiju.

<http://www.geo-online.org> Geofizika.

<http://www.wikipedia.org> Popularna Internet enciklopedija pojmove.

SADRŽAJ

PREDGOVOR	1
1. UVOD	2
2. ELEMENTI KOSMOLOGIJE	3
2.1. Nastanak Kosmosa	7
3. SUNČEV SISTEM	10
4. PLANETA ZEMLJA	16
4.1. Atmosfera i Meteorologija	19
4.1.1. Kretanje vazdušnih masa	22
4.1.2. Formiranje oblaka	23
4.1.3. Vremenska prognoza	26
4.2. Hidrosfera i Hidrologija	29
4.2.1. Plima okeana	33
4.3. Zemljina unutrašnjost	36
4.4. Rotacija Zemlje	42
4.4.1. Klimatski ciklusi	46
5. GEOFIZIKA	50
5.1. Gravitaciono polje Zemlje	50
5.1.1. Gravimetrija	53
5.2. Magnetsko polje Zemlje	60
5.2.1. Magnetometrija	66
5.2.2. Elektromagnetske metode u geofizici	68
5.3. Toplotno polje Zemlje (geotermija)	69
5.4. Geoelektrično polje	72
5.4.1. Geoelektrične metode u geofizici	74
5.5. Elastična svojstva stijena i seizmičke metode	75
5.6. Daljinska detekcija	82
6. GEOLOGIJA	82
6.1. Vrste stijena	84
6.1.1. Magmatske stijene	84
6.1.2. Sedimentne stijene	85

6.1.3. Metamorfne stijene	87
6.2. Geološko datiranje vremena	89
6.2.1. Apsolutno radiometrijsko datiranje	89
6.2.2. Relativno datiranje u geologiji	92
6.2.2.1. Geološka podjela istorije Zemlje	93
6.3. Tektonika, orogeneza i reljef	95
6.4. Geološka svojstva stijena i geološki procesi	97
6.4.1. Pedologija	100
6.5. Hidrogeologija	101
7. SEIZMOLOGIJA	105
7.1. Nastanak zemljotresa	106
7.2. Seizmometrija	119
7.3. Analiza i obrada seizmoloških podataka	122
7.4. Inženjerska seizmologija	133
8. GEODEZIJA	152
8.1. Koordinatni sistemi i kartografske projekcije	154
8.2. Geodetska osmatranja primjenom satelitske tehnike	158
9. OSTALI DOMENI GEONAUKA	165
9.1. Geografski informacioni sistem	165
9.2. Geostatistika	167
9.3. Ekologija	168
10. KORISNA LITERATURA	170
11. KORISNI INTERNET LINKOVI	171
S A D R Ž A J	172