

Prirodno-matematički fakultet Novi Sad

Departman za fiziku
Smer: Astronomija sa Astrofizikom

Seminarski rad

Predmet: Planetologija
Tema: Radiometrijske metode datiranja

Profesor: Slobodan Marković

Student: Meštrić Uroš

maj 2007.



UVOD

Radiometrijsko datiranje – postupak određivanja starosti stena i organskih ostataka na osnovu radioaktivnog raspada pojedinih elemenata – u širokoj je upotrebi već više od pola veka. Do danas je usavršeno preko 40 ovakvih postupaka gde svaki koristi različit radioaktivni element ili različitu metodu merenja njegovog sadržaja. Do danas je takođe postalo sasvim jasno da različite metode daju međusobno saglasne rezultate te koherentnu sliku prema kojoj je planeta Zemlja nastala veoma davno. Dalja potvrda njihove pouzdanosti potiče od potpune saglasnosti rezultata dobijenih ovim metodama sa rezultatima drugih metoda određivanja starosti kao što su godovi drveta ili ledena jezgra

Potrebno je dodati jedno pojašnjenje – mnogi ljudi smatraju da se radioaktivni elementi koriste samo u nuklearnim elektranama ili u atomskim bombama. U stvari, radioaktivnost je svuda oko nas. U svakoj steni, drvetu ili živom biću postoji vrlo mala količina radioaktivnih elemenata koji se neprestano razgrađuju odnosno radioaktivno raspadaju i pretvaraju u druge elemente - izotope. Ovo je prirodan i bezopasan proces koji je sastavni deo fizičkog sveta.

Radiometrijsko datiranje može se uporediti sa procesom koji se odigrava u peščanom časovniku. Kada se peščani časovnik okrene, pesak curi iz gornjeg dela u donji. Atomi radioaktivnih elemenata su poput zrna peska u časovniku – kako se smanjuje broj zrna peska u gornjem delu (ili roditeljskom elementu), tako raste broj zrna u donjem delu (odnosno broj atoma elementa ćerke). Iako je nemoguće predvideti kada će određeno zrno peska pasti iz gornjeg dela u donji deo peščanika, može se sa velikom preciznošću izračunati koliko je vremena potrebno da bi ceo pesak iscureo. Kada se ovo dogodi, peščanik prestaje da meri vreme sve dok se ponovo ne okrene. Slično ovome, kada se svi atomi elementa roditelja pretvore u atome elementa ćerke, stena prestaje da “meri” vreme i proces može početi iznova jedino ako se u njoj nađe nova količina originalnog radioaktivnog elementa.

Neki od tipičnih roditeljskih elemenata i elemenata ćerki, i njihovi periodi poluraspada, navedeni su u tabeli . Kao što se iz tabele vidi, postoje ogromne razlike u dužini perioda poluraspada između pojedinih izotopa. Izotopi sa dugim periodama poluraspada veoma sporo se transformišu u stabilne elemente te su stoga pogodni za datiranje veoma starih stena. Izotopi sa kratkim periodima poluraspada ne mogu se koristiti u ovom slučaju zato što su se svi roditeljski atomi odavno raspali, nešto nalik peščaniku koji je ostavljen da stoji veoma dugo nakon što je sav pesak prešao u donji deo. Izotopi sa kratkim periodima poluraspada su stoga pogodniji za datiranje relativno skorijih događaja, i metode datiranja koje ih koriste (poput metode ugljenik-14) po pravilu su preciznije. Adekvatno poređenje bila bi upotreba štoperice umesto zidnog časovnika da se izmeri vreme u trci na 100 metara. S druge strane, za merenje perioda od nekoliko nedelja ili meseci koristili bismo kalendar a ne ručni sat.

Radioaktivni Izotop (roditeljski element)	Novonastali Izotop (ćerka)	Period Poluraspada (u godinama)
Samarijum-147	Neodimijum-143	106 milijardi
Rubidijum-87	Stroncijum-87	48.8 milijardi
Renijum-187	Osmijum-187	42 milijarde
Lutecijum-176	Hafnijum-176	38 milijardi
Torijum-232	Olovo-208	14 milijardi
Uranijum-238	Olovo-206	4.5 milijarde
Kalijum-40	Argon-40	1.26 milijarde
Uranijum-235	Olovo-207	0.7 milijardi
Berilijum-10	Bor-10	1.52 miliona
Hlor-36	Argon-36	300,000
Ugljenik-14	Azot-14	5715
Uranijum-234	Torijum-230	248,000
Torijum-230	Radijum-226	75,400

Tabel 1: Neki prirodni izotopi i njihovi periodi poluraspada

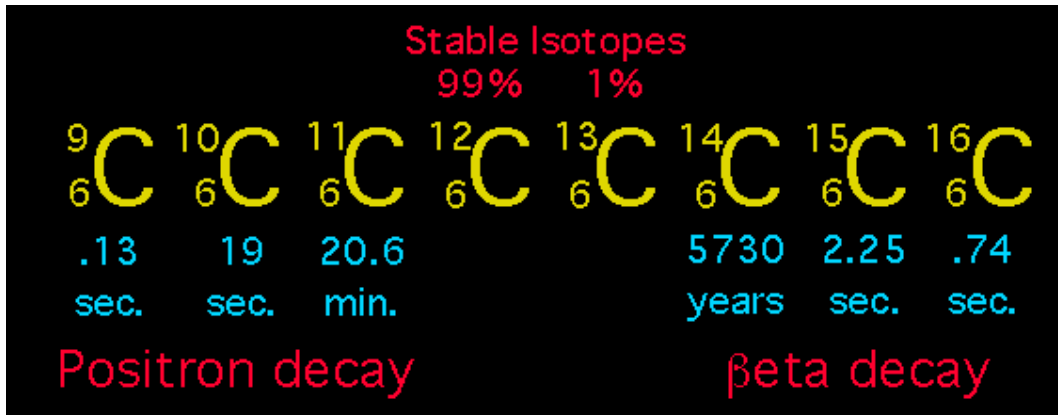
Tehniku radioaktivnog ugljenika – poznatu kao metoda C-14 prvi je razvio Amerikanac hemičar, Wilard F. Libby na Univerzitetu u Čikagu. Libi je za ovaj postupak 1960. godine dobio nobelovu nagradu za hemiju.



Wilard F. Libby

1. O građi ugljenikovog atoma ^{12}C i njegovih izotopa:

Da bi smo razumeli ovaj proces moramo prvo da objasnimo ponešto o samim atomima ugljenika. Većina ugljenikovitih atoma ima 6 protona (p^+) i 6 neutrona (n). Pošto je težina protona i neutrona slična, atomska masa običnog ugljenikovitog atoma je 12. On se naziva ugljenik 12 čija je oznaka ^{12}C .

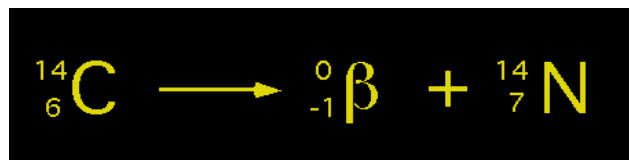


Slika 1: Dijagram ugljenikovitih izotopa i vreme njihovog poluraspada

Na dijagramu je prikazano sedam ugljenikovitih izotopa i sam ugljenik. Samo tri od osam prikazanih ugljenikovitih izotopa se mogu naći u prirodi. Ostali ugljenikovi izotopi se mogu naći samo u laboratoriji. Na levoj strani svakog ugljenikovitog atoma vidimo dva broja, donji je atomski broj i označava broj protona. Atomski broj ugljenikovitog atoma je 6. Gornji broj je maseni broj svakog izotopa. Maseni broj svakog izotopa je zbir svih protona i neutrona u jezgru.

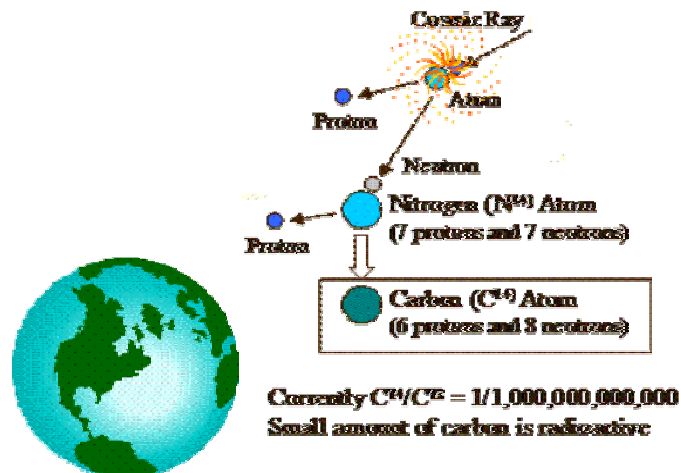
Samo dva izotopa ugljenika su stabilna (^{12}C i ^{13}C). Oni čine 100% ugljenika u našem svetu, mada je ^{12}C očigledno mnogo više zastupljen i to čak 99%. Svi ostali atomi ugljenika su nestabilni i raspadaju se u neke druge elemente. Što je razlika između masenog broja ugljenikovitog izotopa i osnovnog ugljenikovitog atoma veća tako taj izotop postaje sve nestabilniji (brže se raspada). Plavi brojevi na dijagramu nam pokazuju koliki je poluživot određenog ugljenikovitog izotopa. Atomi ^9C , ^{10}C i ^{11}C imaju premalo neutrona, zbog čega se raspadaju, tom prilikom se oslobađaju pozitron što dovodi do pretvaranja protona u neutron. Dok je situacija sa ^{14}C , ^{15}C i ^{16}C obrnuta, oni imaju previše neutrona, tako da se raspadaju, oslobađajući beta (β) česticu pri čemu neutron postaje proton.

Gledajući posebno ugljenik 14 vidimo da je on beta emiter sa vremenom poluraspada od 5730 godina. Kada ^{14}C emituje beta česticu, atom ^{14}C postaje atom azota ^{14}N . Gledajući maseni broj i atomski broj atoma azota vidimo da je izgubio neutron odnosno dobio je proton.



2. Kako nastaje ^{14}C ?

Našu Zemlju iz svemira bombarduju kosmički zraci – reč je nepobitno o protonima. Ovi protoni u gornjim slojevima atmosfere pogađaju atome azota N, kiseonika O i argona Ar, i tako iz dotičnih atomskih jezgara izbacuju neutrone. Slobodne neutrone, s druge strane, hvataju druga atomska jezgra. Gotovo sve ovako nastale neutrone hvataju atomi azota. U tom postupku, atom azota odaje jedan proton, čime atomska težina ostaje ista, samo što se atomski broj smanjuje za jedan. Tako od atoma azota postaje atom ugljenika (C-14). Procenjeno je da svake godine nastaje oko 10kg ugljenika C-14.



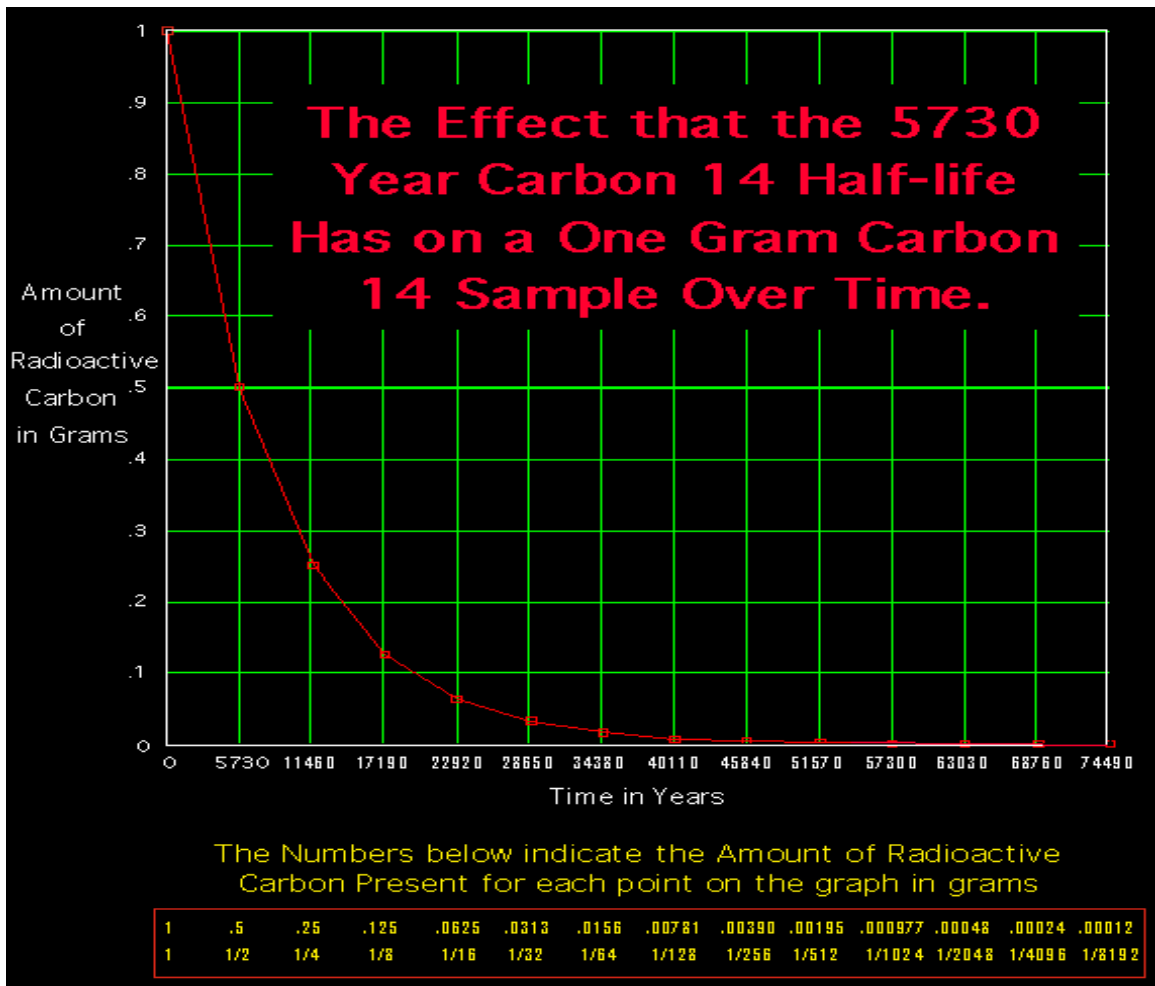
Slika 2: Nastajanje C-14.

Za razliku od C-12 i C-13, C-14 je nestabilan. Jedini razlog zbog koga možemo naći C-14 na Zemlji je njegovo kontinualno stvaranje u atmosferi. Sadržaj azota u atmosferi je konstantan. Pretvaranjem atoma azota u ugljenikove atome dolazi do smanjenja celokupnog broja atoma azota, to smanjivanje možemo porediti sa uklanjanjem vode iz Pacifika sa kašičicom za čaj. Stoga ako uzmemo da količina azota u atmosferi ostaje ista, C-14 će se stvarati konstantnom brzinom. Inače u atmosferi na 10^{12} atoma C-12 dolazi 1 atom -14.

3. Raspadanje ugljenika C-14:

Sad znamo da stabilan atom ugljenika ima 6 protona i 6 neutrona, stabilan atom azota ima 7 protona i 7 neutrona, stabilan atom kiseonika 8 protona i 8 neutrona, ali ugljenik C-14 nije baš tako dobro izbalansiran. Ugljenikov izotop C-14 sastoji se od 6 protona i 8 neutrona, što ga čini nestabilnim, i postaje time teži za 16,7% od atoma ugljenika C-12. Oba ova ugljenika sa kiseonikom formiraju CO₂ (ugljen-dioksid), koji uzimaju, to jest apsorbuju, biljke i živa bića. Pre ili kasnije jedan od neutrona izbija napolje elektron i postaje proton.

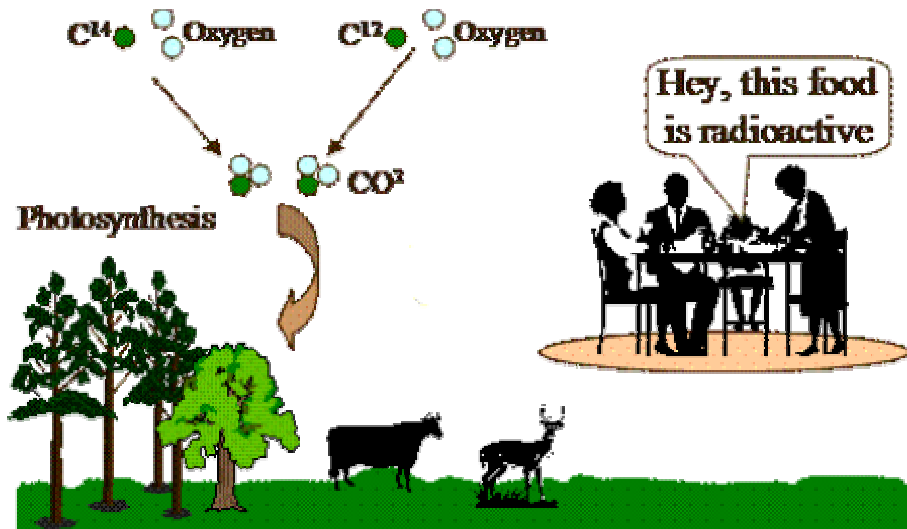
Nemoguće je predvideti kada će pojedinačni atom C-14 emitovati elektron i pretvoriti se u azot, ali je statistika veoma predvidiva. Uzmemo li veliki broj atoma C-14, možemo tvrditi sa visokim stepenom sigurnosti da će se pola od njih raspasti odnosno pretvoriti u azot za 5730 godina. Ovo se naziva poluživot, jer se pola od ukupnog broja C-14 raspadne za to vreme. Polovina preostalih neraspadnutih C-14 atoma se raspadne u narednih 5730 godina (drugi poluraspad).



Slika 3: Raspadanje C-14

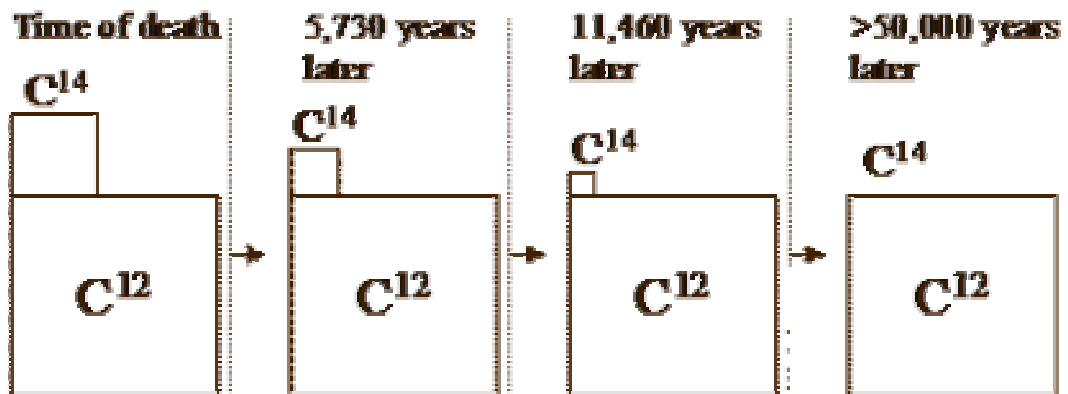
4. C-14 u živim organizmima:

Sve ono što u sebi ima život nalazi se u kružnom toku ugljen-dioksida na našoj Zemlji. To znači da sve dok je neka biljka živa, ona uzima ugljen-dioksid iz vazduha, vode i zemlje, i ugrađuje ga u svoja vlakna pomoću fotosinteze.



Slika 4: Šematski prikaz unošenja C-14 u žive organizme.

Oko 0,6% ugljenika u šećeru koji stvore biljke otpada na C-14. Pošto životinje jedu biljke negde oko 0,6% od celokupnog ugljenika u mesu i kostima otpada na C-14. Kada biljka ili životinja umre više ne mogu da održavaju konstantnu količinu C-14 u organizmu i dolazi polako do opadanja koncentracije C-14.



Reference: *The Answers Book*, 21st printing, pg. 77

Slika 5: Opadanje koncentracije C-14 u odnosu na C-12.

5. Datiranje fosila:

Ubrzo posle smrti živog organizma, organizam prestaje da uzima C-14. Odnos C-12 naspram C-14 (C-14/C-12) u trenutku smrti je isti kao i u bilo kom drugom živom organizmu, ali C-14 se raspada i ne zamjenjuje se novim, dok koncentracija C-12 ostaje konstantna. Gledajući odnos C-14/C-12 u uzorku i upoređujući ga sa odnosom C-14/C-12 u živom organizmu, moguće je odrediti prilično precizno iz kog doba u prošlosti je uzorak.

Formula koja se koristi za izračunavanje (procenjivanje) starosti uzroka pomoću C-14 metode je:

$$t = [\ln (N_f/N_0) / (-0.693)] \times t_{1/2}$$

gde je:

- \ln prirodni logaritam
- N_f/N_0 procenat C-14 u uzorku, poređen sa količinom u živim organizmima
- $t_{1/2}$ period poluraspada C-14 (5730 god)

Dakle ako imamo fosil koji ima 10% C-14 u poređenju sa živim bićima, tada će fosil biti:

$$t = [\ln (0.10) / (-0.693)] \times 5,700 \text{ years}$$

$$t = [(-2.303) / (-0.693)] \times 5,700 \text{ years}$$

$$t = [3.323] \times 5,700 \text{ years}$$

$$t = 18,940 \text{ godina star.}$$

Zbog poluživota od 5730 godina, ova metoda je jedina pouzdana za datiranje objekata do oko 50 – 60 hiljada godina starosti.

Skoro svaki materijal koji sadrži ugljenik je potencijalno pogodan za datovanje. Organske materije sa visokim nivoom ugljenika su naravno pouzdanije. Kada materijal ima malu koncentraciju karbonata, mora se koristiti veća količina za siguran rezultat, dok je za one sa visokom koncentracijom potrebna manja količina

Materijal	Poželjna količina (g)	Minimalna količina
Drveni ugalj	8-12	1
Drvo	10-30	3
Školjka	500-2500	200
Kost (starija od 5000god.)	400-1000	250
Kost (mlađa od 5000god.)	200-500	100
Liveno gvozdje	100-150	30
Kovano gvozdje	1000-2500	500
Čelik	300-500	150
Trest	10-25	3

Tabela 2: Poželjne količine uzoraka za uobičajene arheološke materijale

6. Kalibracija:

Prvobitno se smatralo da je nivo radiokarbona u atmosferi bio konstantan tokom vremena, ali sada je poznato da su promena u magnetnom polju Zemlje i solarna aktivnost uticale na njegov nivo. Tačnost metode ugljenik-14 proverava se utvrđivanjem starosti proizvoljno odabranog goda iz centra stabla, a potom se rezultat uporedi s prostim brojanjem godova počev od spoljašnje ivice. Upravo ovaj postupak je primenjen na nekim od najstarijih stabala na svetu, kao što je "Metuzalem drvo" staro oko 6000 godina.

Rezultati radiokarbonskih analiza uključuju dve različite vrednosti: izračunatu prosečnu godinu, kao i standardno odstupanje. Standardno odstupanje je nivo statističke greške koja oslikava nasumičnu prirodu radioaktivne emisije i drugih faktora koji mogu da utiču na merenje. Ovaj faktor greške je značajan jer pokazuje mlađe godine od stvarnih. Zbog toga, radiokarbonski datumi ne označavaju određenu godinu, već radije raspon vremena u kojem će se najverovatnije naći određena godina. Rezultat od 9000 ± 100 god. Pokazuje da je 67 % verovatnoće da je pravi datum u rasponu od 8900 (9000-100 godina) i 9100 (9000 + 100 godina). Ako udvostručimo faktor greške na 8800 – 9200 god. Šanse rastu do 95% da je pravi datum u ovom rasponu godina. Faktor greške je prema tome neophodno priključiti izračunatoj godini, jer bi bez njega tačnost merenja bila dovedena u pitanje.



Slika 6: Godovi.

Godovi drveta ne daju pouzdanu vremensku referencu dalje od 11,800 godina u prošlost zbog toga što je približno u to vreme na Zemlji nastupila nagla i dramatična promena klimatskih uslova. Tokom perioda ledenih doba, dugovečne vrste stabala nisu rasle u istim područjima Zemlje kao danas. Naučnici su uspeli da s velikom preciznošću rekonstruišu ovaj period promene tako da o klimatskim događajima iz tog vremena imamo znatna saznanja. Teško je, međutim, dati kontinuirani hronološki zapis baziran na metodi godova za ovaj period brzih klimatskih promena. Pre ili kasnije, dendrohronologija će uspeti da pronađe pouzdan godovni zapis kojim će se premostiti sadašnje praznine, dok se metoda C-14 za vremena koja sežu u prošlost dalje od 11,800 godina kalibriše na druge načine.

Kalibracija metode C-14 do unazad skoro 50,000 godina, može se obaviti kroz nekoliko različitih postupaka. Jedan od njih je upotreba slojeva materijala koji se talože na dnu jezera ili morskih zaliva. Na nekim od ovih mesta sedimentacija (taloženje čvrstog materijala) relativno je brza i razlikuje se iz godine u godinu tako da je svaki godišnji sloj karakterističan. Ovi slojevi se mogu prebrojati i pretvoiti u godine na isti način kao i godovi drveta. Ako neki od ovih slojeva sadrže biljne ostatke, oni se koriste za kalibraciju metode C-14.

7. Problemi metode C-14:

Svi postupci određivanja starosti počivaju na hipotezi da se od nastanka Zemlje do danas ništa nije izmenilo u spoljnim uslovima. To u našem slučaju znači:

- da je sadržaj CO₂ od nastanka atmosfere morao uvek biti isti,
- da odnos standardnog ugljenika C-12 prema nestabilnom ugljenikovom izotopu C-14 nikada nije bio drugačiji nego danas,
- da je C-14 od samog početka imao isto vreme poluraspada, dakle, 5.730 godina,
- da je sadržaj azota u vazduhu oduvek bio konstantan,
- da se posle smrti ugljenik više ne može apsorbovati.

Zemlja je, međutim, otvoren sistem - sistem koji je stalno u pokretu. Sve gore navedene pretpostavke naučno se ne mogu dokazati. To se naročito odnosi na ona vremenska razdoblja iz kojih nam nisu preneti nikakvi zapisi. Najstariji pisani dokument nije star ni 4 hiljade godina.

Sad ćemo se pozabaviti činjenicama koje nam pokazuju da su gore navedene tvrdnj pogrešne.

Pretpostavlja se da je nekada na Zemlji bilo više kopnene nego vodene površine. Tada su flora i fauna postojali u izvanredno velikom spektru vrsta. U subtropskim pojasevima naše Zemlje živele su neuporedivo veće životinje i rasle ogromne biljke i drveća. Potreba za CO₂ je u to vreme morala biti ogromna.

Usled potopa došlo je do toga da je voda preuzela suvišni CO₂. Mora danas sadržeti oko 600 biliona tona CO₂, a atmosfera samo 2,1 do 2,5 biliona tona. Ugljenikov izotop C-14 se u proteklim milenijumima nalazio u CO₂ u daleko manjoj razmeri nego danas. Strucnjaci pretpostavljaju da je nekada postojala samo jedna stotina (1/100), a možda i samo jedan hiljaditi deo (1/1.000) današnje produkcije C-14 u atmosferi. Produkcija C-14 i onako je veoma mala – rekli smo samo oko 10 kilograma godišnje.

Već je rečeno da C-14 nastaje bombardovanjem atmosfere kosmičkim zracima. Zaštita od njih je Zemljino magnetsko polje. Ono, međutim, opada sa poluvremenom od 1.400 godina u neprekidnom procesu, što znači, pre 1.400 godina je bilo dvostruko, pre 2.800 godina četverostruko, a pre 4.200 godina osam puta jače nego danas. Dakle, što je jače geomagnetsko polje, to je slabije dejstvo kosmičkih zraka na naš vazdušni omotač, a time, u istoj razmeri opada i produkcija ugljenikovog izotopa C-14.

Još neka pitanja ostaju ovde otvorena: imaju li živi organizmi u trenutku smrti isti odnos atoma C-12 i C-14?

Rekli smo da se kod metode C-14 pretpostavlja da odnos atoma C-12/C-14, ustanovljen za žive organizme, važi do trenutka njihove smrti. Da to, međutim, nije tačno, pokazalo se već u mnogim slučajevima. Tako na primer, školjke živih mekušaca mogu prilikom primene metode C-14 da pokažu starost do 2.300 godina. Ovo očigledno znači da mora da postoji neki oblik razmene ugljenika između ovih organizama i naslaga karbonata sa veoma malim sadržajem C-14 ili bez sadržaja C-14. Ukoliko postoji mogućnost razmene ugljenika, onda je i starost takvih organizama određena pomoću metode C-14, previsoka za meru jednog nepoznatog činioca.

Postoji li posle trenutka smrti još mogućnost primanja ugljenika?

Pretpostavlja se da se sadržaj C-14 datog živog bića, od trenutka prestanka procesa metabolizma nije povećao apsorpcijom ili iz drugih izvora. Valjanost ove pretpostavke ničim nije dokazana. Moglo se posmatrati kako kosti iz svoje okoline uzimaju organske materije sa sadržajem ugljenika, i to u tolikoj meri da počinjemo da verujemo da je prvobitni sadržaj C-14 falsifikovan. Dobijena vrednost time potpuno gubi značaj. Ne može se izvan toga utvrditi da li neki uzorak sadrži tuđi ugljenik.

Ako želimo da neka tehnika ili disciplina u naučnom radu bude od koristi, onda je neophodno da sve njihove granice budu poznate i razumljive. Međutim, granice primenljivosti metode ugljenika C-14 do sada još nisu uočene. Niko neće ozbiljno tvrditi da su svi izneseni podaci oslobođeni grešaka. Mi ne znamo čak ni to, koliko su oni pogrešni - 25%, 50%, ili 75%? A ne znamo ni to koji su podaci pogrešni, u kojoj meri i zašto.

Ipak osnovi metode C-14 primenjuju se na isti način i na drugim izotopima. Kalijum 40 (K-40) je drugi radioaktivni element koji se nalazi u našem telu i njegov poluraspad je 1,3 milijarde godina. Drugi korisni radioizotopi su navedeni u tabeli. 1. Metode pomoću ovih radioizotopa se mogu koristiti za datiranje starosti planeta.

8. Radiometrijske metode datiranja koje se koriste na vulkanskim stenama:

Pozabavimo se sada metodama za određivanje starosti stena i time kako one rade. Napomenimo samo da se kao početni događaj od koga se računa starost stene vulkanskog porekla uzima trenutak njenog hlađenja i prelaska u čvrsto stanje. Atomi elementa-ćerke koji se konstantno stvaraju u procesu radioaktivnog raspada hlađenjem stene “zamrznuti” su na mestu gde su nastali unutar stene. Prvo se odredi broj atoma elementa ćerke u datom uzorku stene kao i broj atoma roditeljskog elementa. Znajući vreme poluraspada za dati par elemenata roditelj-ćerka, može se odrediti vreme koje je proteklo do nastanka takvog odnosa između ta dva broja. Međutim, u praksi proces nije tako jednostavan. Za početak, ne može se naprosto pretpostaviti da u početnom trenutku u steni nije bilo atoma elementa ćerke. Postoje slučajevi kada je ova pretpostavka sasvim opravdana, ali obično je neophodno tačno utvrditi početni broj atoma elementa ćerke kako bi se moglo obaviti precizno određivanje starosti stene. Svaka radiometrijska metoda bavi se ovim problemom na različit način. Zbog toga su neke metode pogodnije od drugih za datiranje određenih vrsta stena, zavisno od njihovog sastava i starosti.

Metoda kalijum-argon:

Kalijum se može naći u Zemljinoj kori u velikim količinama. Jedan od njegovih izotopa, kalijum-40, radioaktivan je i raspada se u dva različita elementa ćerke, kalcijum-40 i argon-40. Ovo ne predstavlja problem, jer je odnos broja novonastalih atoma ova dva elementa dobro poznat i uvek konstantan – od svih novonastalih atoma 11,2% biće atomi argona-40, a preostalih 88,8% biće kalcijum-40. U nekim situacijama starost stena se određuje pomoću kalijum-kalcijum metoda, ali ovo nije čest slučaj jer se početni sadržaj kalcijuma teško određuje.

Argon je, sa druge strane, gas. Kada se stena još nalazi u stanju tečne lave, svi gasovi teže da “pobegnu” na isti način kao što mehurići vazduha uvek izlaze na površinu vode. Kada lava očvrstne, argon koji nastaje od tog trenutka više ne može da izađe napolje. Na ovaj način kalijum-argonski “časovnik” počinje svoj rad onog trenutka kada data stena pređe u čvrsto stanje. U najprostijem slučaju sve što geolozi treba da urade za određivanje starosti uzorka stene jeste merenje odnosa kalijuma-40 i argona-40. Starost stene se potom može izračunati pomoću sledeće jednačine:

$$t = h \times \left[\frac{\ln \left(1 - \frac{(\text{argon} - 40)}{(0.112 \times (\text{kalijum} - 40))} \right)}{\ln(2)} \right]$$

gde je:

- t vreme u godinama
- h vreme pluraspada
- \ln prirodni logaritam

U praksi se dešava da mala količina argona ostane zarobljena u steni tokom procesa otvrdnjavanja i ovaj argon je obično u obliku sitnih mehurića vazduha. Jedan procenat vazduha koji udišemo je argon. Svaka količina argona prisutna u steni u vidu mehurića vazduha, mora se uzeti u obzir prilikom određivanja starosti stene ako je dovoljno velika u poređenju sa radiogenkim argonom (tj. argonom nastalim procesima radioaktivnog raspada). Ovo će, po pravilu, biti slučaj ako starost stene nije velika (te nije bilo vremena da se generiše veća količina radiogenkog argona) ili ako je originalan sadržaj kalijuma bio relativno nizak.

Za praktičnu upotrebu metode kalijum-argon neophodan je način za određivanje količine argona koji se nalazi u mehurićima vazduha zarobljenim u steni. Ovo se izvodi prilično lako jer i sam argon ima nekoliko izotopa od kojih je u prirodi najviše argona-36. Odnos dva izotopa, argona-40 i argona-36, u vazduhu je poznat i iznosi 295 (na svaki atom argona-40 dolazi 295 atoma argona-36), pa se starost stena lako određuje prostim merenjem ukupne količine argona i oduzimanjem količine argona-36.

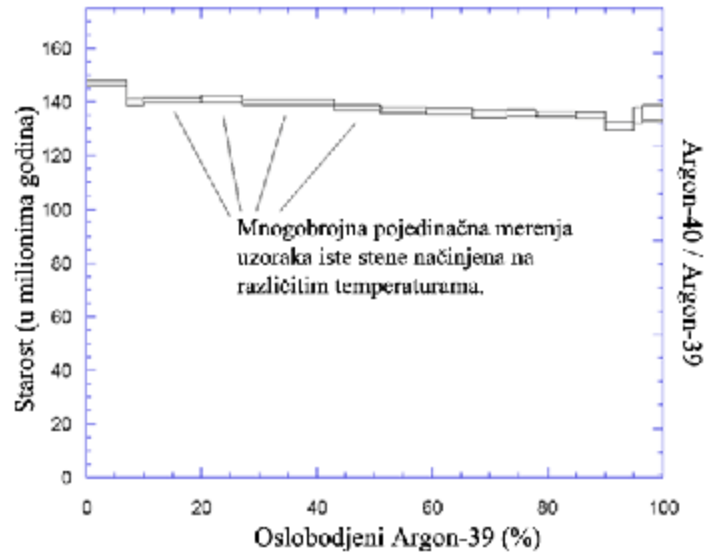
Starost stena najbolje se određuje upotrebom nekoliko različitih metoda za datiranje istog uzorka. Iako je metoda kalijum-argon veoma jednostavna za upotrebu, mali je broj slučajeva kada njegovi rezultati nisu saglasni sa onim dobijenim putem drugih metoda. Ovo se obično dešava kada mehurići gasa zarobljeni u steni ne potiču od atmosferskog vazduha već dolaze iz duboke unutrašnjosti Zemlje. Ovako prisutan argon naziva se "siročće" jer ne potiče ni od raspadajućeg kalijuma ni od atmosferskog vazduha. U malom broju slučajeva kada se u steni zatekne "siročće" argon, obično se dobija starost veća od stvarne. Međutim, šezdesetih godina XX veka naučnici su pronašli rešenje ovog problema, odnosno usavršenu argon-argon tehniku datiranja o kojoj će biti reči u sledećem odeljku.

Metoda argon-argon:

Pri korišćenju ove metode koriste se potpuno isti elementi kao u metodi kalijum-argon, ali je način izračunavanja starosti stene drugačiji. Umesto da nađe odnos ukupno prisutnog kalijuma i argona koji ne potiče iz mehurića vazduha, metoda argon-argon u stanju je da precizno utvrdi koliko je ukupnog argona nastalo radioaktivnim raspadom kalijuma.

U ovoj metodi uzorak stene postavlja se unutar nuklearnog reaktora gde ostaje nekoliko sati. Jezgro reaktora emituje veliki broj neutrona koji izazivaju radioaktivni raspad kalijuma-40 u argon-39. Argon-39 se ne nalazi kao slobodan u prirodi jer ima kratko vreme poluraspada od samo 269 godina (ovaj period ne utiče na tačnost metode argon-argon ako se merenje obavi u roku od približno pet godina nakon bombardovanja uzorka neutronima). Nakon postupka u reaktoru, uzorak stene postavlja se u peć gde se zagreva i oslobađa argon-40 i argon-39 koji se koriste za dalju analizu.

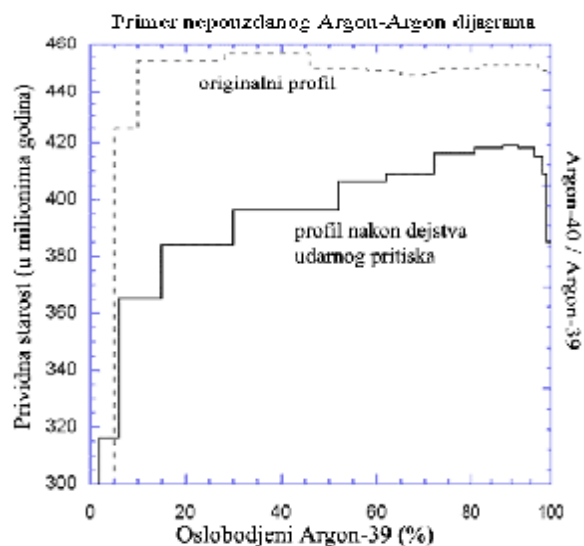
Ideja je sledeća – ako se temperatura uzorka podiže u jednakim intervalima i ako oba izotopa, argon-40 i argon-39, potiču isključivo od radioaktivnog raspada, njihov odnos u oslobođenom gasu biće konstantan bez obzira na rast temperature. Ako je pak u uzorku prisutan argon-40 koji ne potiče iz raspada kalijuma-40 (zarobljen u mehurićima vazduha ili "siročće") odnos dva izotopa neće biti konstantan i menjaće se sa porastom temperature. Ako se ovo ustanovi, uzorak se odbacuje i ne koristi se za određivanje starosti stene.



Slika 7: Dijagram dobijen metodom argon-argon.

Slika pokazuje primer “dobrog” argon-argon uzorka. činjenica da je linija na dijagramu skoro horizontalna govori da praktično sav argon u uzorku potiče iz radioaktivnog raspada kalijuma, te da se ovaj uzorak može koristiti za pouzdano datiranje.

Postoje slučajevi u praksi kada metoda argon-argon ne može tačno da odredi starost stene, čak i ako se u njoj nalazi dovoljna količina kalijuma za analizu i ako je sama stena dovoljno stara. Ovo se obično dešava ako je stena u nekom trenutku svog postojanja, a nakon početnog očvršćavanja, prošla ponovo kroz process zagrevanja (obično preko 1000 °C) i hlađenja. Ukoliko se ovo dogodilo, sadržaj argona u steni biće poremećen i linija na dijagramu neće biti ravna niti horizontalna. Primer ovakvog dijagrama može se videti na Slici 8.



Slika 8: Argon-argon dijagrama iz koga je nemoguće odrediti starost stene.

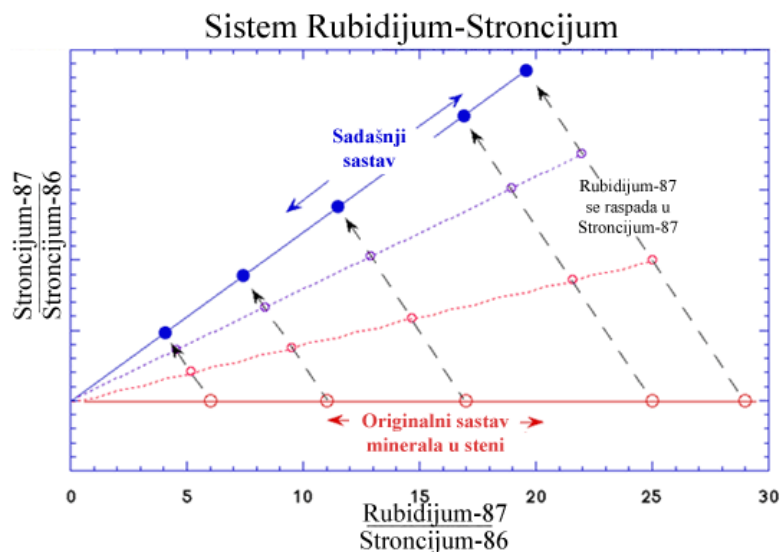
Važna činjenica vezana za metodu argon-argon je sledeća: Umesto da pokaže pogrešan rezultat, ova metoda će ukazati u kojim slučajevima je određivanje starosti nemoguće usled kontaminacije uzorka i takvi uzorci će biti odbačeni. Mnoge druge

metode datiranja imaju ugrađene kontrolne mehanizme kojima se potvrđuje ili odbacuje pretpostavka o kontaminaciji uzorka.

Metoda rubidijum-stroncijum:

U metodi rubidijum-stroncijum rubidijum-87 se radioaktivno raspada sa vremenom poluraspada od 48,8 milijardi godina i transformiše u stroncijum-87. Sam stroncijum ima nekoliko izotopa koji su stabilni i ne raspadaju se dalje. Odnos stroncijuma-87 i nekog od njegovih stabilnih izotopa, recimo stroncijuma-86, raste tokom vremena kako se sve više i više rubidijuma-87 pretvara u stroncijum-87.

Međutim, u trenutku kada se stena formirala iz tečne lave svi njeni delovi imaju isti odnos stroncijum-87/stroncijum-86 jer su u tečnoj lavi ovi izotopi bili dobro izmešani.



Na Slici 4 je dijagram kakav se koristi u određivanju starosti stena metodom rubidijum-stroncijum. Na njegovoj vertikalnoj osi vidi se odnos stroncijum-87/stroncijum-86, a na horizontalnoj osi je odnos rubidijum-87/stroncijum-86. U početku, svi minerali koji čine jednu stenu leže na horizontalnoj crvenoj liniji jer svi imaju isti odnos stroncijum-87/stroncijum-86, ali sa različitim odnosima rubidijum-87/stroncijum-86. Kako vreme prolazi i stena stari, svi uzorci se pomeraju naviše, ali nejednakom brzinom. Odnos stroncijum-87/stroncijum-86 raste, ali različito u različitim mineralima jer se, zbog različitog sadržaja rubidijuma, u nekima od njih stvara više stroncijuma-87, a u nekima manje. Ovaj porast obeležen je na dijagramu isprekidanim linijama sa strelicama čije su dužine proporcionalne odnosu stroncijum-87/stroncijum-86. Stoga će puna linija koja povezuje sve tačke od početnog horizontalnog položaja postajati sve strmija kako stena stari.

Iako se metoda rubidijum-stroncijum smatra veoma pouzdanom, u veoma retkim slučajevima može doći do pogrešnog očitavanja. Jedan od mogućih uzroka pojave greške jeste datiranje stene koja sadrži pojedine minerale starije od osnovnog sastava. Ovo se obično događa kada magma dok teče u unutrašnjosti Zemlje pokupi i rastopi minerale stena kroz koje protiče. U najvećem broju ovakvih slučajeva dobar geolog može golim okom uočiti razliku između ovih tzv. "ksenolita" i ostatka stene

sačinjenog od mladih minerala. Ukoliko se slučajno ovakvi uzorci podvrgnu datiranju, neće se dobiti prava linija na dijagramu i to će biti dobar indikator o počinjenoj greški.

Uran-olovo i srodne metode:

Najstarije do sada locirane stene na Zemlji pronađene su u zapadnom Grenlandu. Upravo zbog ove velike starosti, njihovom proučavanju je posvećena velika pažnja. Donja tabela pokazuje rezultate dobijene iz dvanaest studija i uz upotrebu pet različitih metoda.

Metoda	Utvrđena starost
Uran-olovo	3.60±0.06
Olovo-olovo	3.56±0.10
Olovo-olovo	3.74±0.12
Olovo-olovo	3.62±0.13
Rubidijum-stroncijum	3.64±0.06
Rubidijum-stroncijum	3.62±0.14
Rubidijum-stroncijum	3.67±0.09
Rubidijum-stroncijum	3.66±0.10
Rubidijum-stroncijum	3.61±0.22
Rubidijum-stroncijum	3.56±0.14
Lutecijum-hafnijum	3.55±0.22
Samarijum-neodimijum	3.56±0.20

Tabela 3: Rezultati dobijeni različitim metodama

Kao što se vidi svi brojevi dati su uz vrednost moguće greške. Ova greška obuhvata gornju i donju granicu moguće stvarne vrednosti, a verovatnoća da se stvarna starost nalazi unutar ovih granica iznosi 95%. Brojevi sa manjim opsegom greške su tačniji od onih sa većim. Važno je primetiti sledeće – svi brojevi dati u gornjem primeru preklapaju se u opsegu 3,62-3,65 milijardi godina starosti stene.

Metoda uran-olovo je najstarija poznata metoda datiranja stena. Prvi put je upotrebljena pre gotovo jednog veka – 1907. godine. Ovaj postupak je znatno složeniji od prethodno opisanih jer obuhvata nekoliko međusobno kombinovanih metoda datiranja. Uran se u prirodi uglavnom sastoji od dva izotopa: urana-235 i urana-238. Ovi izotopi se raspadaju s različitim vremenima poluraspada te proizvode olovo-207 i olovo-206. Još jedan izotop olova, olovo-208, dobija se raspadom torijuma-232. Olovo-204 je jedini stabilan izotop ovog elementa.

Sistem uran-olovo poseduje jednu zanimljivu komplikaciju – nijedan od pomenutih izotopa olova ne potiče direktno od urana ili torijuma. Svi se dobijaju raspadanjem roditeljskog elementa preko serije posrednih izotopa koji imaju relativno kratko vreme poluraspada. Atomska masa svakog narednog izotopa manja je od njegovog prethodnika a proces se završava stvaranjem stabilnog olova.

Pošto su vremena poluraspada ovih posrednih izotopa kratka u poređenju sa vremenom poluraspada U-238, U-235 ili torijuma-232, oni, u opštem slučaju, ne utiču na postupak određivanja starosti stene ovom metodom. Ovo znači da se mogu dobiti

tri nezavisne procene starosti uzorka merenjem sadržaja izotopa olova i njihovih roditeljskih elemenata.

Metoda uran-olovo, u svom osnovnom obliku i koristeći U-238, U-235 i torijum-232, pokazala se manje pouzdanom od mnogih drugih postupaka datiranja. Osnovni uzrok ovome je činjenica da se uran i olovo relativno teško zadržavaju u mineralima u kojima su prvobitno bili. Ipak, pošto metoda uran-olovo koristi tri nezavisna merna postupka, lako se utvrđuje da li je u geološkoj prošlosti uzorka došlo do narušavanja sadržaja pomenutih izotopa.

Koristeći nešto složeniji matematički postupak nego u drugim metodama, različite kombinacije izotopa olova i roditeljskih elemenata mogu se predstaviti tako da se minimalizuje moguća greška usled gubitka olova. Jedan od ovih postupaka je tzv. olovo-olovo metoda kojom se može odrediti starost uzorka samo na osnovu izotopa olova. Neke od ostalih metoda čak omogućavaju da se utvrdi u kom trenutku u prošlosti je došlo do metamorfozne promene što je od posebnog interesa za geologe.

9. Ne baš svetla budućnost:

Korišćenje različitih radioizotopa omogućava nam da vršimo datiranje kako bioloških tako i geoloških uzoraka sa visokim stepenom tačnosti. Inače metode datiranja radioizotopima možda neće raditi baš dobro u budućnosti. Sve što je prestalo da živi pre 1940. godine, kad su atomske bombe, nuklearni reaktori i nuklearne vazdušne probe počele da menjaju stvari, biće teže odrediti datiranje.

Sadržaj:

UVOD	2
1. O građi ugljenikovog atoma ^{12}C i njegovih izotopa	5
2. Kako nastaje ^{14}C ?	6
3. Raspadanje ugljenika C-14	7
4. C-14 u živim organizmima	8
5. Datiranje fosila	9
6. Kalibracija	10
7. Problemi metode C-14	11
8. Radiometrijske metode datiranja koje se koriste na vulkanskim stenama	13
ü <i>Metoda kalijum-argon</i>	13
ü <i>Metoda argon-argon</i>	14
ü <i>Metoda rubidijum-stroncijum</i>	16
ü <i>Uran-olovo i srodne metode</i>	17
9. Ne baš svetla budućnost	19

