

Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku
Odjel za matematiku

Ivana Fajfer

Milutin Milanković; život i djelo

Diplomski rad

Osijek, 2012.

Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku
Odjel za matematiku

Ivana Fajfer

Milutin Milanković; život i djelo

Diplomski rad

Mentor: prof. dr. sc. Vanja Radolić

Osijek, 2012.

Sadržaj

Uvod	4
1 O Milutinu Milankoviću	5
1.1 Obitelj i djetinjstvo	5
1.2 Obrazovanje	6
1.2.1 Obrazovanje u Osijeku	6
1.2.2 Obrazovanje u Beču	7
1.3 Život i rad u Beču i Srbiji	8
2 Znanstveni rad Milutina Milankovića	10
2.1 Prethodnici Milankovića	10
2.2 Milankovićev rad	12
2.2.1 Osunčavanje planeta	13
2.2.2 Izmjena ledenih doba	21
2.2.3 Pomicanje Zemljinih polova	27
3 Potvrda i dokazi Milankovićeve teorije	31
4 Nagrade i priznanja	37
Literatura	38
Sažetak	39
Summary	40
Životopis	41

Uvod

U svom diplomskom radu bavim se životom i djelom Milutina Milankovića, svestranog znanstvenika. Za obradu te teme odlučila sam se iz razloga što je rijetko koji znanstvenik za života bio toliko cijenjen, a njegovo ime povezano s temeljnim otkrićima koja su na neki način odredila buduću civilizaciju, a unatoč tome jedno vrijeme gotovo zaboravljen, a danas nedovoljno poznat.

Svoj rad započela sam biografijom Milutina Milankovića, i nastavila usredotočena na njegova najpoznatija znanstvena proučavanja kojima je podredio cijeli svoj život, nastojeći približiti i objasniti veličinu njegovog rada i truda. Nakon toga, naglasak je na potvrdi i dokazima Milankovićeve teorije, i na samom kraju dodijeljenim svjetskim priznanjima u bliskoj prošlosti.

Što se tiče izvora podataka koje sam koristila u diplomskom radu većina je iz njegovog životnog djela „Kanon osunčavanja Zemlje i njegova primjena na problem ledenog doba”.

1 O Milutinu Milankoviću

1.1 Obitelj i djetinjstvo

Milankovićeva obitelj bila je jedna od najstarijih i najistaknutijih srpskih obitelji koja se naselila na obalama Dunava. Obitelj je Milanković svojim drukčijim pogledima i težnjama bila puna intelektualaca i akademski obrazovanih već u svojoj trećoj generaciji.

Tako je, na primjer, njegov pradjed Todor završio pravo, a posebno su se, u njihovoj lozi, isticali Uroš Milanković (filozof prirode), Andrija Radovanović (glavni inženjer tvornice Škoda), te Milankovićev otac Milan, trgovac i zemljoposjednik.

Njegov otac bio je obrazovan, sposoban i bogat trgovac, vlasnik trgovine s kolonijalnom robom koja je dunavskim brodovima dolazila iz Beča i Pešte. Baveći se poljoprivredom, uspješno je primjenjivao nove metode i strojeve za obrađivanje zemlje.

Otac Milan i majka Jelisaveta, iz ugledne osječke obitelji Muačević, imali su šestero djece, od kojih su starost dočekali samo Milutin, njegova sestra blizanka Milena i mlađi brat Bogdan, poznati romanist i muzikolog.

Milutin Milanković rođen je 28. svibnja 1879. godine u Dalju, u tadašnjoj Austro-Ugarskoj. Njegov otac imao je bogatu knjižnicu, te se predano bavio obrazovanjem malog Milutina, nalazeći uzor i inspiraciju u djelu „Emil” prosvjetitelja Jean Jacques Rousseau. Milanković je, za razliku od svoje braće i sestara, bio slabo i osjetljivo dijete, stoga je već prije pete godine prebolio difteriju i upalu pluća. Njegova osjetljivost i nemogućnost za fizičke aktivnosti utjecala je na njegove interese za prirodu. Milankovićevi roditelji rano su otkrili njegov interes i talent za matematiku.

Otac Milan umro je vrlo mlad, 27. listopada 1886. godine, kada je Milanković imao samo šest godina, tako je brigu o djeci i imanju, uz majku, preuzeo njegov ujak Vasilije Muačević. Milanković nije redovno pohađao osnovnu školu, nego je imao privatne učitelje. Jedna od njih bila je i njegova dadilja Zorka koja ga je naučila o ekvatoru, polovima, geografskim širinama i dužinama, ali i mnogo o grčkoj mitologiji.

Svoje djetinjstvo proveo je uz rijeku Dunav, koja je svojom nezaustavljivošću i veličinom izazivala njegovo divljenje tijekom cijelog života, kao i rodna kuća u Dalju koja je imala veliki utjecaj na oblikovanje njegove osobnosti.¹

¹Spasova, D., *Milutin Milanković: putnik kroz vasionu i vekove*, str. 11.-17.

1.2 Obrazovanje

1.2.1 Obrazovanje u Osijeku

Milanković je 1889. godine upisao realnu gimnaziju u Osijeku, poznatu kao Realka. U to vrijeme upozna je svog rođaka Andriju Radovanovića, poznatog inženjera i inovatora u tvornici topova Škoda. Nakon upoznavanja s rođakom počeo je maštati da i sam postane inovator ili inženjer upravo poput rođaka, ili pak poput Nikole Tesle, koji je baš u to vrijeme posjetio Beograd.

Presudnu ulogu u njegovom životnom pozivu imao je mladi 28-godišnji profesor matematike, doktor filozofije, i kasnije poznati matematičar, Vladimir Varićak, član JAZU² i SANU³. Milanković je maturirao 1896. godine kao najbolji učenik Realke u Osijeku, i kao predstavnik Srba maturanata iz Austro-Ugarske monarhije sudjelovao je na sastanku maturanata Kraljevine Srbije u Beogradu. Taj kratak posjet Beogradu utjecao je na njega tako što se trinaest godina poslije odlučio preseliti u Beograd, gdje se odvijao velik dio njegovog života i znanstvenog rada.⁴



Slika 1: Portret Milutina Milankovića

²Jugoslavenska akademija znanosti i umjetnosti

³Srpska akademija nauka i umjetnosti

⁴Spasova, D., *Milutin Milanković: putnik kroz vasionu i vekove*, str. 18.-19.

1.2.2 Obrazovanje u Beču

Milankovićevi roditelji željeli su da upiše visoku poljoprivrednu školu, jer je to bio najlogičniji odabir s obzirom na njihovo veliko imanje o kojem se trebalo brinuti, no Milutina to nije nimalo zanimalo. On je želio studirati elektrotehniku, a budući da nije bilo takve škole u Beču, odlučio je upisati studij građevinske tehnike, te je postao student profesora Emanuela Čubera, o kojem su mu pričali, i rođak Veselin, i profesor Varićak. Milanković je zajedno sa svojim rođakom Veselinom otišao u Beč, 5. listopada 1896. godine.

Na trećoj godini studija uvidio je kako će svoje studiranje završiti bez velikog truda, pa se zbog toga odlučio posvetiti obrazovanju koje mu škola nije davala. Posebnu pažnju posvetio je monumentalnim građevinama Beča, arhitekturi, obilazeći muzeje i galerije slika.

Na petoj godini studija profesor Johann Brick, najveći stručnjak bečke mehanike, predavao mu je najvažniji kolegij Znanost o gradnji mostova, i upravo će iz njegovih kvalitetnih i zanimljivih predavanja Milanković crpiti inspiraciju za svoj budući znanstveni rad.

Godine 1902. uspješno je završio studij za diplomiranog inženjera građevinske tehnike. Nakon odslužene jednogodišnje vojne obveze u Habsburškoj Monarhiji, 1903. godine vratio se u Beč nastaviti doktorski studij. Doktorsku disertaciju obranio je 1904. godine sa svojih 25 godina, pod nazivom „Teorija linija pritiska” (u originalu „Beitrag zür Theorie der Druckkurven”).

Svoju disertaciju ponudio je prvotno Srpskoj akademiji za objavu, ali dva profesora beogradskog Univerziteta, koja nisu bila dovoljno upućena u problematiku, pronašli su u njoj tzv. grešku. Milanković nije htio osramotiti beogradski Univerzitet, te je svoju disertaciju objavio 1907. godine u njemačkom časopisu *Zeitschrift für Mathematik und Physik*.⁵

⁵Spasova, D., *Milutin Milanković: putnik kroz vasionu i vekove*, str. 20.-24.

1.3 Život i rad u Beču i Srbiji

Nakon dodjele doktorske diplome, 1905. godine Milanković je započeo raditi u poznatoj građevinskoj tvornici Baron Pittel Betonbau-Unternehmung u Beču. Istaknuo se kao konstruktor i inovator, što je bilo vidljivo kroz njegove patente i objavljene članke. Prijavio je šest patenata pomoću kojih su izgrađeni brojni objekti na području tadašnje Austro-Ugarske.

Sudjelovao je u projektima na obali Save na izgradnji beogradskog kanalizacijskog sustava, kao i gradnji brana, mostova i kanala. Važni projekti koje je osmislio bili su: rekonstrukcija Tehničke velike škole u Beču, spremnik za vodu u Osijeku, projekt prvih armiranobetonskih mostova u Srbiji (1912. godine), balistički patent (priznat od strane Kraljevine Jugoslavije).

Milanković 1909. godine napušta uspješan unosni posao u Beču, i na poziv poznatih znanstvenika, Jovana Cvijića, Mihaila Petrovića i Bogdana Gavrilovića, prihvaća mjesto izvanrednog profesora primijenjene matematike na tek osnovanom Univerzitetu u Beogradu gdje je naslijedio Kostu Stojanovića, talentiranog matematičara, koji se odlučio baviti politikom. Za svoj novi posao morao se temeljito pripremati iz tri različita područja. Milankovićevo duboko uvjerenje kako može biti sretan, ostvariti svoj cilj i postati zapaženi znanstvenik utjecalo je na njegovu odluku o povratku u Beograd.

Naime, tom odlukom nije prekinuo prijateljske veze i znanstvenu suradnju s austrijskim znanstvenicima i institucijama izmijenjujući i dalje s njima znanstvene informacije i nove ideje. To je zapravo bio jedan od razloga njegovih čestih posjeta Beču i drugim austrijskim mjestima.

Postao je državljanin Kraljevine Srbije 1910. godine i upisao se u vojne obveznike kao rezervni pripadnik oružanih snaga. Tek što se doselio u Beograd počeli su se događati burni događaji, balkanski ratovi, i kasnije 1914. godine Prvi svjetski rat. Na samom početku Prvog svjetskog rata oženio se Kristinom Topuzović, rođenom u Šapcu.

U to vrijeme, Austro-Ugarska je bila u ratu s Kraljevinom Srbijom i Milanković je, kao njezin državljanin, bio zatvoren u logoru Nežider. Kasnije je prebačen u Budimpeštu, gdje mu je bilo dopušteno raditi u knjižnici Mađarske akademije znanosti.

Svoj interes i rad usmjerio je na proučavanje teorije klimatskih promjena i planetarnih temperatura. Poslije smrti svoje majke, 1915. godine, Milanković je dobio svoje prvo dijete, sina Vasilija. Nakon što je rat završio, 1919. godine Milanković se zajedno sa svojom obitelji vratio iz Budimpešte u Beograd, čime je završilo njegovo petogodišnje izbjivanje iz domovine koja je nakon rata postala znatno veća. Nastavio je svoju profesorsku karijeru i svoj znanstveni rad, i upravo te iste godine promijenio mu se status na Univerzitetu, postao je redovan profesor.

U svom bogatom stvaralačkom životu dao je veliki doprinos i u mnogim drugim područjima izvan ovih ranije navedenih.

Izradio je i predložio reformu gregorijanskog i julijanskog kalendara koja je prihvaćena na Svepravoslavnom kongresu u Carigradu 1923. godine.

Objavio je velik broj značajnih naučnih rasprava u „Glasu” Srpske akademije nauka, ali i u mnogim poznatim časopisima. Za dopisnog člana Srpske akademije nauka primljen je 1920. godine, a za redovnog člana četiri godine kasnije. Više od trideset godina bio je redovan član i time dao veliki doprinos Akademiji i njenom ugledu u svijetu. Triput je izabran za potpredsjednika Srpske akademije nauka i umjetnosti, a jedno vrijeme bio je direktor Astronomskog opservatorija u Beogradu, i dekan Filozofskog fakulteta 1926./1927. akademske godine.

Milanković je objavio preko 150 radova i knjiga, a najznačajnije njegove knjige su: „Kroz vasionu i vekove”, „Kroz carstvo nauka”, „Istorija astronomske nauke od njenih prvih početaka do 1727.”, „Slike iz života velikih naučnika”, autobiografija u tri dijela „Uspomene, doživljaji i saznanja”, i temeljno djelo „Kanon osunčavanja Zemlje i njegova primjena na problem ledenih doba”.

Milutin Milanković umro je 12. prosinca 1958. godine u Beogradu, gdje je prvotno pokopan, a kasnije (1966.) po njegovoj želji prenesen u obiteljsku grobnicu u Dalju.⁶

⁶Spasova, D., *Milutin Milanković: putnik kroz vasionu i vekove*, str. 26.-31.

2 Znanstveni rad Milutina Milankovića

Milutin Milanković pripada među najveće znanstvenike zahvaljujući svom predanom, detaljnom i preciznom radu i proučavanju. Bavio se nebeskom mehanikom, klimatologijom, geofizikom i fizikom. Stogodišnjim radom geologa dokazano je da su se, u doba najmlađeg geološkog doba-kvartara (posljednjih 600 000 godina), odigrale velike klimatske promjene na Zemlji, izmjena ledenih i međuledenih doba. Izmjena ledenih doba ostavila je duboke tragove na Zemlji, a sama otkrića izazvala jedno od najvažnijih pitanja: što je bio uzrok velikim klimatskim promjenama?

2.1 Prethodnici Milankovića

Mnogi značajni istraživači istaknuli su se prije Milutina Milankovića, čije je metode i rezultate koristio i uspoređivao, ili dopunio i usavršio, te provjerio njihovu točnost. Prije svega, spomenimo starogrčkog astronoma Hiparha, koji je oko 120. godine prije nove ere opazio pojavu kako Zemljina os nije usmjerena uvijek u isto mjesto na nebeskom svodu, te se zvijezde nisu nalazile na onom mjestu na nebu na kojem su ih ranije vidjeli Kaldeji. Zaključio je kako do ove promjene dolazi tijekom kretanja točaka presijecanja ekliptike⁷ i nebeskog ekvatora⁸, i čitavu pojavu nazvao je precesija ekvinocija ili ravnodnevice. Budući da je ekliptika nagnuta u odnosu na nebeski ekvator, točke na ekliptici, gdje Sunce u svom kretanju siječe nebeski ekvator, nazivaju se ekvinocijskim točkama ili točkama ravnodnevice. Tijekom precesionog gibanja, druge dvije točke putanje su one kada je Zemljina os usmjerena pod najvećim kutom, i nazivaju se točke solsticija ili točke suncostaja.

Mnogo stoljeća nakon Hiparha, 1754. godine francuski matematičar D'Alembert izračunao je da točke ravnodnevice opišu puni krug za oko 26 000 godina, ali se zbog rotacije putanje nađu na istom mjestu Zemljine putanje oko svake 22 000 godine, a to je upravo precesija ravnodnevice.

Budući da je Newtonov zakon opće gravitacije predstavljao temelj nebeske mehanike, iz njegovog jednostavnog oblika izvodilo se mnogo posljedica. Primjenom i razvijanjem tog zakona stvorene su nebeska mehanika i teorijska astronomija, a najveći doprinos tim područjima dali su brojni matematičari i astronomi. Tako je i Joseph Louis Lagrange, matematičar i astronom, 1781. i 1782. godine prvi izračunao sekularne promjene putanjskih elemenata za tada šest poznatih planeta, zajedno sa Zemljom, koristeći analitičku linearnu teoriju sekularnih poremećaja kretanja velikih planeta.

⁷Ekliptika je srednja ravnina kojom se Zemlja giba oko Sunca.

⁸Nebeski ekvator je zamišljena ravnina, koja je produžetak zamišljenog ekvatora, i koja se prostire u svemir.

Kasnije, 1834. godine, isto je izračunao i Pontécoulant za sedam planeta, a sedam godina kasnije 1840. godine rad švicarskog paleontologa i geologa Louisa Agassiza utjecao je na potragu o povezanosti klimatskih promjena u prošlosti Zemlje s promjenama astronomskih čimbenika Zemljinog gibanja.

Astronomske teorije o ledenim dobima među prvima je proučavao Adhémair. Pisao je o utjecajima promjene putanje na klimu, te 1842. godine precesiju Zemljine osi rotacije predložio uzrokom klimatskih promjena, ali zbog nedovoljno matematičkog iskustva nije točno izračunao te utjecaje.

Kada bi se planete samostalno i pojedinačno okretale oko Sunca, vrijedio bi za njih jednostavan oblik zakona gravitacije, odnosno njegove posljedice izražene u tri Keplerova zakona⁹. No, kako na svaki planet utječu i ostali planeti, dolazi do poremećaja utvrđene putanje, a izračuni tih poremećaja imaju vrlo složenu matematičku strukturu. Francuski astronom i matematičar Urbain Le Verrier objavio je veliko izračunavanje perturbacijskog kretanja velikih planeta, uključujući i Zemlju, znatno točnije od svojih prethodnika.

Kasnije su Stockwell (1873.) i Harzer (1895.) dodali Le Verrierevim proračunima Neptun, ali kako sam Milutin Milanković kaže, rezultati su bili posljedica računskih grešaka, odnosno pogrešnih polaznih uvjeta.

Također, za razumijevanje klimatskih promjena, Croll (1875., 1889.) je kao razlog naveo promjene ekscentričnosti Zemljine putanje. Objavio je nekoliko radova posvećenih tom problemu, međutim nisu imali potpunu matematičku cjelovitost kojom bi se problem nastanka ledenih doba mogao riješiti.

Najvažniji prethodnik Milankovića bio je Ludvig Pilgrim (1904.); uzrocima klimatskih promjena dodao je varijacije nagiba Zemljine osi rotacije tijekom sekularnih promjena putanjske ravnine i upotpunio niz astronomskih parametara koji utječu na klimu. Koristio je Stockwellove integrale, a sekularne promjene parametara odredio je za period od 1 050 000 godina, na svakih 5000 godina i za sve trenutke u kojima je longituda perihela Zemljine putanje u odnosu na pokretnu točku proljetne ravnodnevice bila 90°, odnosno 270°. Milanković je njegov rad smatrao važnim jer je problem pokušao riješiti uz pomoć nebeske mehanike.¹⁰

⁹Johannes Kepler (1571.-1630.), njemački astronom poznat po tri zakona po kojima se planeti okreću oko centralne zvijezde po eliptičnim putanjama.

¹⁰Ocić, Č., ur., *Zbornik radova s Međunarodnog simpozija Stvaralaštvo Milutina Milankovića održanog u Dalju 23. i 24. maja 2008. godine*, str. 76.-78.

2.2 Milankovićev rad

Milanković se problemom klimatskih promjena počeo baviti 1912. godine. Prije toga objavio je nekoliko rasprava iz nebeske mehanike, a 1912. godine objavio je prvi rad iz područja klimatologije, pod naslovom „Prilog teoriji matematičke klime”, izdan u časopisu „Glas” Srpske akademije nauka i umjetnosti. Do početka Prvog svjetskog rata uspio je objaviti šest značajnijih rasprava iz tog područja. Na samom početku, na njegov rad utjecali su brojni problemi i poteškoće, najviše skromna sredstva kojima je raspolagao, ali i upitna točnost izračuna i teorija njegovih prethodnika. Raniji istraživači pristupali su problemu empirijski, nepotpuno i bez dovoljno uvažavanja svih odgovarajućih čimbenika. Milanković je pokušao koristiti rezultate do kojih je došao Pilgrim, ali ubrzo je uvidio problem svih dotadašnjih teorija kretanja planeta-nedovoljno točno poznavanje njihovih masa.

Odlučio se za korištenje Le Verriereve teorije perturbacijskog kretanja planeta, čija je točnost bila dovoljna za geološke svrhe u periodu od milijun godina u prošlost i budućnost, no odlučio je ponovno odrediti vrijednosti masa planeta. U tablici 1. navedene su mase velikih planeta u Sunčevom sustavu koje su koristili Le Verrier i Milanković, te njihove suvremene vrijednosti korištene u NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL).

Tablica 1: Recipročne vrijednosti masa velikih planeta izraženih u jedinicama mase Sunca

Planet	Le Verrier	Milanković	JPL
Merkur	1 909 706	6 000 000	6 023 600
Venera	401 939	408 000	408 523,71
Zemlja + Mjesec	356 354	329 390	328 900,56
Mars	2 680 337	3 093 500	3 098 708
Jupiter	1050	1047	1047,3486
Saturn	3512	3501	3497,898
Uran	17 918	22 869	22 902,98
Neptun	14 400	19 380	19 412,24

Usporedimo li rezultate koje su dobili Milanković i Le Verrier, možemo uočiti odstupanja od suvremenih vrijednosti, ali dovoljno su dobri za određivanje promjene osunčavanja s pouzdanošću, te ih čini upotrebljivima.¹¹

U sljedećim poglavljima iznijet ću najvažnija istraživanja kojima se bavio, kao što su osunčavanje Zemlje, izmjena ledenih doba i pomicanje Zemljinih polova.

¹¹Ocić, Č., ur., *Zbornik radova s Međunarodnog simpozija Stvaralaštvo Milutina Milankovića održanog u Dalju 23. i 24. maja 2008. godine*, str. 81.

2.2.1 Osunčavanje planeta

Primjena nebeske mehanike na kretanje planeta i njihovih satelita razvila se do velike preciznosti, dok se o djelovanju i širenju Sunčevog zračenja u našem planetarnom sustavu do Milankovića znalo vrlo malo i zaostajala je u odnosu na druga srodna područja. Upravo ga je to potaknulo posvetiti se problemu osunčavanja planeta, naročito Zemlje, i to iz perspektive nebeske mehanike. Smatrao je potrebnim ispitati i proučiti opći utjecaj Sunčevog toplinskog zračenja na Mjesec i okolne planete u našem sustavu. Može se reći kako je Milutin Milanković osnivač kozmičke klimatologije, i kao poznavatelj Newtonovih zakona gravitacije, iz kojih se razvila nebeska mehanika, znao je važnost širenja toplinskog zračenja Sunca. Prije iznošenja Milankovićeve teorije klimatskih promjena planeta objasniti ću astronomske pojmove koji su potrebni za razumijevanje osnovnih ideja njegove teorije.

Prvo ću objasniti pojam Zemljine revolucije. Vrijeme za koje Zemlja na svom eliptičnom kretanju obiđe oko Sunca naziva se period revolucije.

Sunčanom (solarnom) ili tropskom godinom nazivamo vrijeme koje prođe između dva uzastopna prolaska Sunca kroz točku proljetne ravnodnevice na nebu. Tropska godina prosječno traje 365 dana, 5 sati, 48 minuta i 45,5 sekundi, a samo trajanje Zemljinog obilaska oko Sunca s godinama se mijenja. Postoji još i siderička ili zvjezdana godina koja se definira kao vrijeme između dva uzastopna prolaska Sunca kroz istu točku na nebeskom svodu u odnosu na određenu zvijezdu stajaćicu.

Kozmičkom godinom nazivamo vrijeme obilaženja Sunčeva sustava oko centra naše galaktike Mliječni put za što mu treba oko 225 milijuna godina.

Podsjetimo se da je ekliptika veliki krug nebeske sfere koji Sunce prividno opiše oko Zemlje za godinu dana. Ekliptika je nagnuta prema nebeskom ekvatoru za kut od $23,5^\circ$ i s vremenom se neznatno mijenja od $22,1^\circ$ pa do $24,5^\circ$, a siječe nebeski ekvator u dvije točke ravnodnevice, proljetna ravnodnevica i jesenska ravnodnevica. Ravnodnevica ili ekvinocij je pojava kada je Zemljina os okomita na ravninu u kojoj se Zemlja giba oko Sunca, odnosno u trenutku ravnodnevice Sunčeve zrake obasjavaju Zemljin ekvator pod pravim kutom.

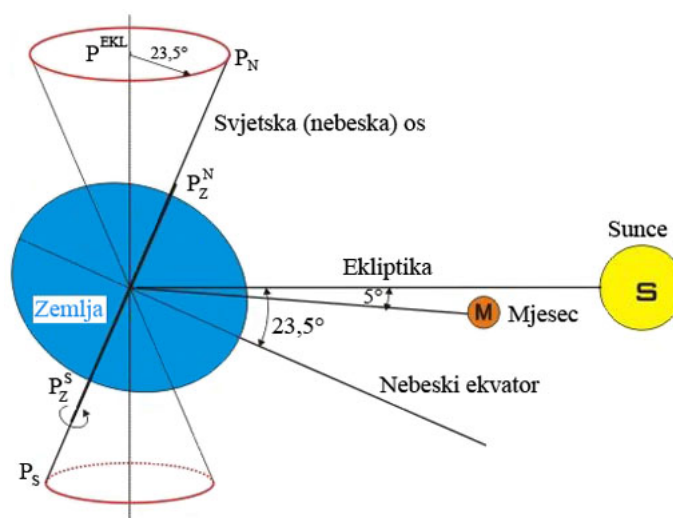
Proljetna ravnodnevica predstavlja imaginarnu točku u kojoj ekliptika presijeca nebeski ekvator. Sunce se nalazi u toj točki svake godine oko 21. ožujka i tada krug osvjetljenosti Zemlje prolazi kroz polove, odnosno Sunčevi zraci padaju okomito na Zemljin ekvator. Tada se Sunce počinje seliti s južne na sjevernu Zemljinu polukuglu. Jesenska ravnodnevica je točka u kojoj Sunce siječe nebeski ekvator i premješta se sa sjeverne Zemljine polukugle na južnu. To se događa oko 22. rujna svake godine, sjeverno od ekvatora tada počinje jesen, a južno proljeće. Osim dvije točke ekvinocija u kretanju Zemlje oko Sunca važne su još dvije točke, točka ljetnog i zimskog solsticija ili suncostaja.

Ljetni solsticij ili suncostaj je vrijeme kada Sunce dostiže svoju najveću kutnu udaljenost u odnosu na ekvator, i to oko 21. lipnja.

Tada Sunčeve zrake padaju okomito na sjevernu obratnicu ($23,45^\circ$ geografske širine); sjeverno od ekvatora počinje ljeto, a južno zima. Zimski solsticij ili suncostaj je vrijeme kada Sunce na svojoj prividnoj putanji dostiže svoju najnižu točku, oko 21. prosinca, što znači da sjeverno od ekvatora počinje zima, a južno od ekvatora ljeto.

Nadalje, protumačit ćemo pojam precesije, a samu pojavu otkrio je ranije spomenuti grčki astronom, geograf i matematičar Hiparh oko 120. g. pr. Kr.

Precesija (od lat. praecesse, što znači preuzeti, prijeći, okretati se) je stalna promjena položaja Zemljine osi rotacije (nebeske ili svjetske osi¹²) i ekliptičke osi u prostoru tijekom vremena, zbog složenih uzajamnih gravitacijskih djelovanja tijela Sunčeva sustava, naročito Sunca i Mjeseca, na spljoštenu Zemlju i orbitalne elemente Zemljine staze.



Slika 2: Precesija

S obzirom na period trajanja gibanja i intenzitet djelovanja postoji:

- dugoperiodično (sekularno) gibanje nebeskih polova– luni-solarna precesija;
- gibanje ekliptičkih polova–planetna precesija;
- kratkoperiodično gibanje nebeskih polova oko njihovog srednjeg položaja–nutacija.

Luni-solarnom precesijom nazivamo gibanje nebeskih polova oko ekliptičkih polova uzrokovano gravitacijskim djelovanjem Mjeseca i Sunca na Zemljinu os rotacije (ophodni period iznosi 25 920 godina). Istodobno se točka proljetne ravnodnevce polako pomiče duž ekliptike u suprotnom smjeru od prividnog godišnjeg gibanja Sunca ($50,39''/\text{god.}$).

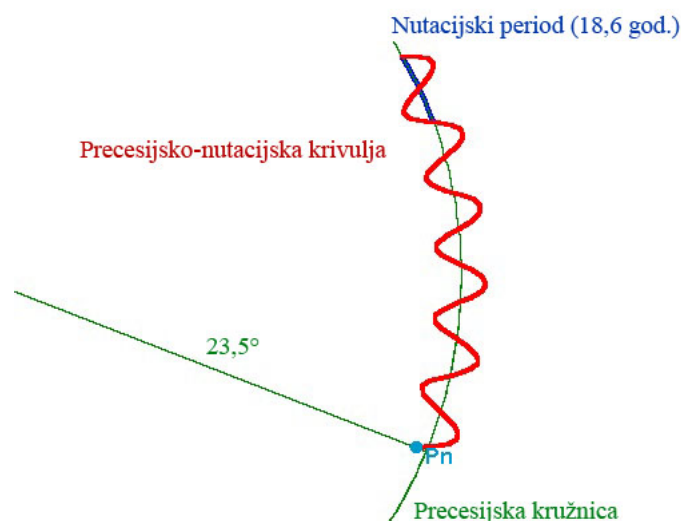
Iz toga slijedi da je uzastopni Sunčev prolazak kroz proljetnu točku nešto kraći od vremena obilaženja Zemlje oko Sunca, pa je zbog precesije siderička godina dulja od tropske za 20 minuta i 26 sekundi.

¹²Nebeska (svjetska) os je zamišljena os koja nebesku sferu probada u sjevernom i južnom nebeskom polu, a na kojoj leži Zemljina os rotacije.

Planetnom precesijom nazivamo zakretanje ekliptičke ravnine u prostoru ($0,11''/\text{god.}$). Zakretanje ekliptike dovodi do promjena položaja ekliptičkih polova na nebeskoj sferi i promjene vrijednosti priklona nebeskog ekvatora prema ekliptici.

Opća precesija je uzajamno djelovanje luni-solarne i planetne precesije, odnosno ukupni pomak ekvatorske i ekliptičke ravnine ($50,29''/\text{god.}$).

Spomenimo i nutaciju, periodično kretanje nebeskih polova, odnosno periodično gibanje svjetske osi oko srednjih položaja, a ophodni period iznosi 18,6 godina.



Slika 3: Nutacija

Kako je Zemljina putanja elipsa, Sunce se nalazi u jednom od njenih žarišta (fokusa). Najbliža točka na putanji od Sunca naziva se perihel, a najudaljenija afel.

Drugi Keplerov zakon kaže radijus-vektor, Sunce-planet, u istim vremenskim intervalima opiše jednake površine, što znači da se planet mnogo brže giba kada se nalazi u blizini perihela nego u područjima bliže najudaljenijoj točki svoje putanje, u blizini afela.

Milanković je uzeo u obzir sve astronomske utjecaje tijekom formiranja svoje potpune i matematički razrađene teorije promjene klime, i to ne samo na Zemlji. Zanimao ga je utjecaj susjednih nebeskih tijela na osunčavanje planeta, najviše Zemlje.

Objavio je 1913. godine u Radu Jugoslavenske akademije znanosti u Zagrebu raspravu „O primjeni matematičke teorije sprovođenja toplote na problem kosmičke fizike”, a 1916. godine u istom časopisu objavio je raspravu „Ispitivanja o klimi Marsa”.¹³ Postupno i temeljito počeo je izgrađivati novu matematičku teoriju koja opisuje klimatske učinke promjena u gibanju Zemlje.

¹³Gledić, V., *Milutin Milanković: Život i delo*, str. 46.-52.

Radi se o matematičkoj teoriji koja povezuje klimatske promjene s promjenama u ekscentričnosti putanje, nagibom osi i precesijom. Te promjene u gibanju i orijentaciji dovode do promjena u iradijaciji¹⁴ Zemlje od djelovanja Sunca. Važnost proučavanja i razmatranja tih promjena, u sjevernom polarnom području, jest zbog toga što tlo na te promjene reagira brže od oceana.

Osim precesije, pojasnit ćemo promjenu oblika putanje ili ekscentričnost. Zemljina putanja je elipsa, a ekscentričnost je mjera odstupanja elipse od kružnice. Oblik Zemljine putanje mijenja se od gotovo kružne (mala ekscentričnost u iznosu 0,005) do blago eliptične (iznos ekscentričnosti 0,058), što znači da je srednja ekscentričnost 0,028, pri čemu je period oko 400 000 godina. Trenutna ekscentričnost iznosi 0,017. Do promjene ekscentričnosti Zemljine putanje dolazi uglavnom zbog gravitacijskog djelovanja velikih planeta, a kada bi Zemlja bila jedini planet koji se giba oko Sunca, ekscentričnost putanje ne bi se mijenjala u vremenu.

Iz perspektive perturbacijske teorije, koja se u nebeskoj mehanici koristi pri računu orbitalne evolucije, velika poluos orbitalne elipse se ne mijenja, adijabatski je nepromijenjiva. Prema III. Keplerovom zakonu orbitalni period je određen velikom poluosi što znači da period revolucije, odnosno duljina sideričke godine ostaje nepromijenjena tijekom evolucije orbite. No, mala poluos se skraćuje s povećanjem ekscentričnosti što pojačava sezonske varijacije, ali se pritom srednje osunčavanje blago mijenja u skladu s II. Keplerovim zakonom. Zbog nelinearnosti Stefan-Boltzmannovog zakona, jednako srednje osunčavanje ne odgovara prosjeku odgovarajućih temperatura. Konkretno za osunčavanje, kojem odgovara temperatura 20°C i asimetrična varijacija $\pm 50^{\circ}$ (iz sezonskih promjena), dobivamo asimetričnu varijaciju odgovarajućih temperatura s prosjekom 16°C , dok dnevnu varijaciju istog osunčavanja (pod pretpostavkom da je toplinski kapacitet 0 J/kgK) dobivamo srednju temperaturu -113°C .

Trenutno, razlika između udaljenosti Zemlje od Sunca u afelu i perihelu je 5,1 milijun kilometara (3,4%) što odgovara varijaciji osunčavanja u iznosu od 6,8%. Pri najvećoj eliptičnosti orbite, osunčavanje u perihelu je oko 23% veća nego u afelu.

Prema tome, kad jesen i zima nastupaju u trenutku kad je Zemlja na bližem dijelu orbite (trenutno slučaj za sjevernu hemisferu), Zemlja se tada giba najvećom brzinom tako da su jesen i zima nešto kraći od proljeća i ljeta, odnosno, ljeto je na sjevernoj hemisferi dulje od zime, a proljeće 2,9 dana dulje od jeseni.

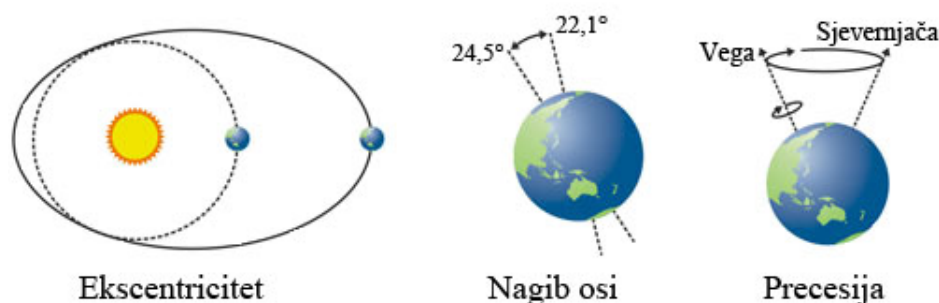
Treća promjena koju je Milanković razmatrao jest kut nagiba osi. Kao što sam ranije spomenula, kut nagiba Zemljine osi u odnosu na orbitalnu ravninu mijenja se između $22,1^{\circ}$ i $24,5^{\circ}$ približno periodično tijekom vremena, s periodom od oko 41 000 godina.

S povećanjem kuta nagiba rastu i amplitude sezonskog ciklusa osunčavanja, odnosno, na obje hemisfere u doba velikih nagiba Zemljine osi ljeti primamo veći tok zračenja sa

¹⁴Totalna iradijacija definira se kao količina dolazne energije zračenja od strane bilo kojeg izvora, i bilo kojih valnih duljina koja u jedinici vremena pada okomito na jedinicu površine. Kada se odnosi na zračenje Sunca zove se solarna iradijacija ili insolacija (osunčavanje).

Sunca, a zimi manji. Godišnje srednje osunčavanje povećava se na većim geografskim širinama, a na manjim dolazi do smanjenja. Pretpostavlja se kako hladnija ljeta mogu poboljšati dolazak ledenog doba zbog smanjenja taljenja snijega i leda. Može se reći da je za ledeno doba povoljniji manji nagib osi i to zbog smanjenja srednjeg osunčavanja na većim geografskim širinama i dodatnog smanjenja osunčavanja tijekom ljeta. No, pokazano je da značajne promjene nisu povezane s ekstremima nagiba osi. Nagib Zemljine osi trenutno iznosi $23,44^\circ$, nalazimo se oko sredine ciklusa u opadajućoj fazi, a minimalnu vrijednost Zemlja će dostići za oko 8000 godina.¹⁵

Danas, varijabilnost ekscentriciteta Zemlje, nagib njezine osi rotacije i precesija, predstavljaju tri dominantna ciklusa, poznata pod nazivom Milankovićeви ciklusi. Upravo ova tri ciklusa dovode do promjena u sezonskoj i prostornoj raspodjeli Sunčevog zračenja koje dolazi na Zemljinu površinu.



Slika 4: Milankovićeви ciklusi

Milanković je uveo neke posebne konstante i srednje vrijednosti kako bi mogao složenu problematiku promjene klime uvrstiti u sustav diferencijalnih jednadžbi. Uspio je utvrditi količinu zračenja koja pada na pojedina područja gornjih slojeva atmosferskog omotača upotrebljavajući solarnu konstantu koju su odredili američki astrofizičari 1913. godine. Zbog razlike količine primljenog zračenja na Zemlji na pojedinim geografskim širinama, uvodi pojam kalorične polugodine: ljetne u razdoblju od 21. ožujka do 23. rujna, i zimske od 23. rujna do 21. ožujka. Trajanje polugodine nije uvijek jednako, danas njezina duljina za sjevernu Zemljinu hemisferu iznosi oko 186 dana za ljetnu polugodinu, a za zimsku polugodinu razlika iznosi 7 dana, ali kako se trajanje polugodine mijenja s vremenom, može se ostvariti razlika od čak 32 dana.

Da bi izvršio svoje složene računske zadatke, morao je pojednostaviti računski proces izračunavanja integrala i razviti u približne oblike. Uveo je kaloričnu polugodinu kao razdoblje koje uključuje sve one uzastopne dane u kojima je osunčavanje veće od bilo kojeg dana druge polugodine.

¹⁵Wikipedia, *Milankovićeви ciklusi*, dostupno na: http://hr.wikipedia.org/wiki/Milankovićeви_ciklusi

Odredio je kaloričnu polugodinu u trajanju od 182 dana, 14 sati i 54 minuta, što mu je olakšalo izračunavanje i razvijanje teorije. Osim kalorične polugodine, uveo je pojam kaloričnog ekvatora i pokazao da se taj kalorični ekvator nalazi na udaljenosti od oko 3° sjeverne Zemljine hemisfere.

Razmatrao je i količinu zračenja koja pada na Zemljinu površinu. Atmosfera je relativno tanki plinoviti omotač koji obavija Zemlju i rotira zajedno s njom; veći dio mase nalazi se u donjem sloju debljine tridesetak kilometara, gdje se i odigravaju procesi bitni za vrijeme i klimu. Ona se hladi ili zagrijava najviše razmjenom topline na granici Zemlja-zrak. Kako zagrijavanje Zemljine površine ovisi o kutu upada Sunčevih zraka na nju, odnosno, uz veći kut dopijeva veća količina toplinske energije na jediničnu površinu u jedinici vremena, razdioba toplinske energije na njoj nije jednolika. Upravo zbog toga je područje ekvatora toplije nego sjeverno ili južno od njega, te je to osnovni razlog postojanja različitih klimatskih pojaseva. Veličina i oblik zonalnih klimatskih pojaseva ovisi i o drugim čimbenicima, kao što su razdioba kopna i mora, pružanje planinskih lanaca, te globalna atmosferska cirkulacija.¹⁶

Milanković je znao da ako se udaljavamo od ekvatora tako područja Zemlje primaju sve manju količinu Sunčeve energije, zato se i posvetio izračunavanju osunčavanja za pojedinu paralelu od ekvatora pa do Zemljinih polova (od 0° do 90°).

Nije se mogao pouzdati, niti nadovezati na ranije izračune zbog velikog odstupanja, te je shvatio da je u računima razmatrano samo osunčavanje Zemlje i radijacija s njene površine, a nije uzet u obzir prijenos energije u unutarjni dio Zemljine površine. Smatrao je kako se toplina prenosi do dubine od oko 10 metara, gdje je temperatura već gotovo stalna. Pri tome se koristio općom teorijom prenošenja topline koju je izradio francuski matematičar i fizičar Joseph Fourier (1768.-1830.).

Fourierova jednadžba prostiranja topline Q na udaljenosti x glasi:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

Milanković je jednadžbu funkcionalno prilagodio i pronašao oblik funkcije $Q(x, t)$ koji će zadovoljavati jednadžbu i realne pripadne uvjete i to uz najnužnija zanemarivanja. Nađena funkcija $Q(x, t)$ omogućuje izračunavanje srednje temperature točaka na Zemlji i promjene količine energije koje se događaju na površini tijekom prenošenja topline.

Razmatrao je diferencijalne jednadžbe koje se odnose na planete, i to ne samo Zemlju, i tražio rješenje koje zadovoljava rubne uvjete promatrajući prenošenje topline kroz kozmičko tijelo, osunčavanje i radijaciju.

Egzaktno rješenje moguće je pronaći za tri posebna slučaja, i to za prvi slučaj stalnog osunčavanja, drugi slučaj kada je provodljivost topline kroz tijelo zanemarivo mala, i treći kada osunčavanje oscilira s malim amplitudama oko jedne stalne pozitivne vrijednosti.

U drugom i trećem slučaju potrebno je razvijanje u Fourierov red, a opće rješenje dobiva

¹⁶Gledić, V., *Milutin Milanković: Život i delo*, str. 52.-56.

se metodom sukcesivne aproksimacije polazeći od drugog slučaja kao početnog uvjeta i pri tome se zanemaruje u drugom koraku provodljivost topline.

Da bi se približio objašnjenju ledenih doba, želio je proračune u vezi osunčavanja riješiti preciznije jer je smatrao da su dotad sekularne promjene¹⁷ rasporeda Sunčeve radijacije na površini Zemlje obrađene samo odvojeno i to za ekstremne slučajeve radijacije, dok su periodične promjene, dnevne i godišnje, obrađene mnogo detaljnije. Isto tako želio je doći do izraza za osunčavanje na svakoj paraleli Zemlje, ne samo za nekoliko godina, već da se podaci mogu dobiti i za više stoljeća.

Razdvojio je promatrani problem na astronomski dio, neposredno osunčavanje, i fizički dio, utjecaji atmosfere. Prvo je utvrdio kako diferencijalni količnik količine topline i kratkog vremenskog intervala $\left(\frac{dQ}{dt}\right)$ ovisi o zenitnoj udaljenosti Sunca i udaljenosti promatrane jedinične površine Zemlje od Sunca. Zatim jediničnu površinu smješta na određenu paralelu i uvodi pojam srednje osunčavanje paralele φ s oznakom w , uzimajući u obzir duljinu dnevnog osunčavanja te paralele. Za promjenu osunčavanja u tijekom jednog dana polazi od srednjih vrijednosti udaljenosti do Sunca i deklinacije Sunca, dodajući im male linearne dnevne korekcije. Za godišnji period linearne korekcije nisu bile dovoljne, nego je morao koristiti malu vrijednost ekscentriciteta Zemljine putanje. Morao je izvršiti razvijanje u red uz samo nužna zanemarivanja potrebna za rješenje. Najprije izražava sve promjenjive veličine preko funkcije vremena. Izračunao je količinu topline Q_τ koja u toku jednog dana dođe na jediničnu površinu Zemlje, a za veći broj dana morao je srednje osunčavanje w i vremensku veličinu t izraziti pomoću jedne zajedničke nezavisne promjenjive veličine razvijanjem u red po stupnjevima od $\sin\lambda$, sve do 14. stupnja (jedino za arktičku zonu bilo je potrebno posebno izvođenje za samo prvi stupanj od $\sin\lambda$). To mu je omogućilo da na proizvoljnom dijelu luka Zemljine putanje dobije izraz za srednju količinu topline koja pada na određenu paralelu dok Zemlja prelazi taj dio proizvoljne putanje. Naročito je obratio pažnju na onim dijelovima Zemljine putanje koji odgovaraju svakom godišnjem dobu na sjevernoj i južnoj hemisferi, istaknuvši nejednakosti u trajanju godišnjih doba.

Nakon toga, Milankoviću je ostalo ispitati utjecaje atmosfere kako bi dobio cjelovitu sliku o kretanju temperature na Zemlji, odnosno ispitati odnos između osunčavanja i temperature Zemlje i njene atmosfere. Dolazi do općenito matematičkog oblika problema određivanja temperature na površini planeta, odnosno u atmosferi na visini x od površine planeta. Prema tome, dolazi do diferencijalne jednadžbe drugog reda za Sunčevo zračenje koje prodire u atmosferu na visini x , i to u odnosu osunčavanja i temperature u slučaju stacionarnog stanja osunčavanja i u slučaju promjenjivog osunčavanja.¹⁸

Svoja istraživanja nastavlja u dva rada isključivo za Mars zbog interesa o mogućnosti postojanja života na Marsu.

¹⁷Sekularnim promjenama nazivaju se promjene koje su se pojavile nakon početka instrumentalnih mjerenja (19. stoljeće), dok se one u zadnjih nekoliko desetljeća mogu smatrati suvremenim.

¹⁸Anđelić, T.P., ur., *Život i delo Milutina Milankovića 1879.-1979.*, str. 134.-139.

Teorijskim putem pokazao je okrutne klimatske uvjete koji onemogućuju postojanje vode u tekućem stanju, i prvi je znanstvenik koji je stvorio astronomsku klimatologiju i dao joj matematičke i teorijske temelje. Među prvim proračunima za Mars bili su dokazi kako je nemoguće da temperatura na površini bude veća nego što je Milanković dobio u proračunima. Prema njegovoj klimatologiji srednja godišnja temperatura na Marsovom ekvatoru iznosi -47°C . Srednja temperatura na ekvatoru Marsa iznosi 3°C , na dijelu od 30° temperatura iznosi oko srednje vrijednosti od -42°C , a na polovima sve do -52°C . Svi navedeni iznosi su srednje vrijednosti i mijenjaju se u velikim granicama. Marsova os rotacije u odnosu na normalu njegove putanje nagnuta je 25° , a godina je skoro dvaput dulja od Zemljine i iznosi 687 dana. Milanković je matematički pokazivao i tvrdio da je Marsova atmosfera nepovoljna za opstanak i razvoj života.

Uz proučavanje Marsa razmatrao je uvjete na Merkuru, Veneri i Mjesecu. Za Merkur je smatrao da se okrene oko Sunca isto kao i oko svoje osi za 88 dana. Izračunao je da površinska temperatura na strani okrenutoj prema Suncu iznosi između 300°C i 450°C , a na strani gdje je noć snizi se skoro do apsolutne nule. Danas izmjerene temperaturne razlike na Merkuru se mijenjaju od -180°C do 430°C . U vrijeme Milankovića o Veneri se nije mnogo znalo. Izračunao je srednju temperaturu u donjem atmosferskom sloju Venere koja iznosi oko 60°C , ali te vrijednosti variraju od 25°C do 97°C . Velika količina ugljik-dioksida stvara efekt staklenika, a temperatura na površini dostiže i do 500°C .

Što se tiče Mjeseca, Milanković je pokazao da je na Mjesecu najtoplije otprilike jedan dan nakon prolaska Sunca kroz zenit (podne) i temperatura tla iznosi $100,5^{\circ}\text{C}$, a najhladnije je neposredno prije pojave Sunca na horizontu i temperatura iznosi $53,8^{\circ}\text{C}$.¹⁹

¹⁹Gledić, V., *Milutin Milanković: Život i delo*, str. 58.-62.

2.2.2 Izmjena ledenih doba

Matematičko i teorijsko istraživanje klime na Zemlji nastavio je proučavanjem nastanka ledenih doba i njihove duljine trajanja. Njegov rad o astronomskim objašnjenjima o ledenim dobima, posebno krivulja osunčavanja za proteklih 130 000 godina, zainteresirala je klimatologa Wladimira Köppena i geofizičara Alfreda Wegenera. Köppen je primjetio kako je Milankovićeva teorija korisna za paleoklimatska istraživanja.

Milanković je 22. rujna 1922. godine primio pismo Wladimira Köppena koji ga je pozvao na suradnju u pisanju stručnog i znanstvenog djela „Klimati Zemljine prošlosti”. Dodijeljen mu je zadatak numerički i grafički prikazati tok osunčavanja visokih sjevernih geografskih širina tijekom posljednjih 600 000 godina. Predano je pristupio radu i 100 dana izvodio izračune za promjene primljene količine Sunčeve topline.²⁰

Köppen je zaključio kako je za stvaranje glečera presudno smanjivanje topline ljetne polugodine, odnosno niske ljetne temperature, oko čega su također složili i najpoznatiji istraživači ledenog doba A. Penck i E. Brückner. Milanković je pronašao matematički put kojim je predstavio sekularne promjene osunčavanja Zemlje. Pomoću jednadžbi za količine osunčavanja

$$Q_s = W_s^0 + \Delta W_s \Delta \varepsilon \mp me \quad (2.2)$$

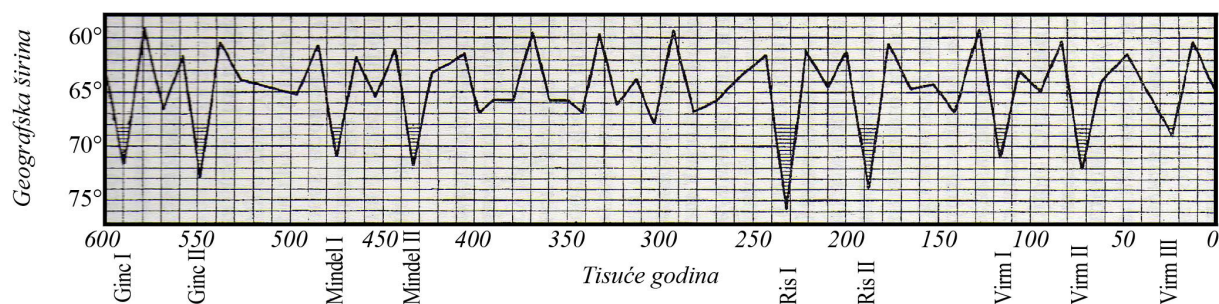
$$Q_w = W_w^0 + \Delta W_w \Delta \varepsilon \pm me \quad (2.3)$$

koje pripadaju kaloričnoj ljetnoj, odnosno zimskoj polugodini, pri čemu gornji predznak vrijedi za longitudu perihela $\Pi_\gamma=90^\circ$, a donji za $\Pi_\gamma=270^\circ$, izračunao je pojedinačna odstupanja toka osunčavanja na uočenoj geografskoj širini, i mogao je pratiti varijacije osunčavanja u prošlosti. Posebnu pažnju poklonio je izračunavanjima klimatskih promjena tijekom vremenskog intervala prošlosti na sjevernim geografskim širinama od 55° , 60° i 65° . Svoje dobivene računске podatke prikazao je grafički i uočio kako se krivulja osunčavanja mijenja na neobičan način. Dobio je tri zupčaste linije, nazvane krivulje osunčavanja, a jedna od njih predočena je dijagramom na slici 5.

Na slici 5. dana je zupčasta linija koja se odnosi na geografsku širinu od 65° , dok linije za geografske širine od 55° i 60° nisu predočene na dijagramu jer su vrlo sličnog toka kao i promatrane krivulje. Zupčasta krivulja osunčavanja na slici 5. dobivena je rezultatima sekularnih promjena elemenata prema Stockwellu i Pilgrimu. Na krivulji uočavamo devet jakih smanjenja ljetnog osunčavanja koja su se dogodila 589, 548, 475, 434, 231, 187, 116, 72 i 22 tisuća godina prije tadašnjeg vremena istraživanja, i iscrtane dijelove zubaca koji prelaze 68° . Tih devet prodora hladnoće javljaju se u četiri grupe, i to prvu grupu čine po dva zupca, a četvrtu tri zupca.

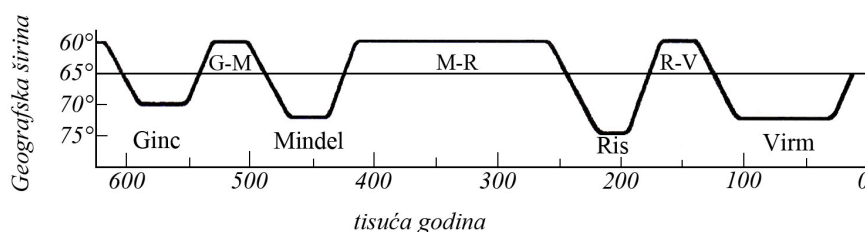
²⁰Wikipedia, *Milutin Milanković*, dostupno na: http://en.wikipedia.org/wiki/Milutin_Milanković

U tim grupama uočena su četiri ledena doba, baš kao što su A. Penck i E. Brückner na osnovu šljunčanih teresa utvrdili također četiri ledena doba u području Alpa koja su nazvali ginc, mindel, ris i virm.



Slika 5: Amplitude sekularne promjene ljetnog osunčavanja

Ako dijagram na slici 5. prikažemo dijagramom na slici 6. lakše uočavamo četiri alpska ledena doba i tri međuledena. Postigli su da se iz toka sekularnog osunčavanja kvalitativno i kvantitativno donose zaključci.²¹



Slika 6: Alpska ledena doba

Geolog J. Knauer utvrdio je podjelu ledenih doba ginc, mindel i ris na dva, a virm na tri dijela kao što se može vidjeti i kod Milankovića prikazanim na slici 5. Mnogi su tvrdili kako Milankovićeva teorija ima grešaka i ne može objasniti istovremene glacijacije na obje Zemljine polutke. Veliki događaji kvartarnog razdoblja ledenih doba događali su se na sjevernoj Zemljinoj polutki sve do geografske širine od 45°. U vremenskom intervalu od posljednjih 600 tisuća godina, smanjenje ljetnog osunčavanja, računat po jedinici njene površine, sedam puta je prešao iznos od 1000 kaloričnih jedinica, jedanput iznos od 700 kaloričnih jedinica, koje su bile najznačajnije promjene ljetnih osunčavanja u tom vremenskom intervalu.

²¹Milanković, M., *Kanon osunčavanja Zemlje i njegova primena na problem ledenih doba (2. dio)*, str. 245.-250.

Najveća odstupanja, odnosno maksimumi tih promjena, izraženi u tisućama godina prije 1800. godine, odgovarala su vremenima navedenim u tablici 2.

Tablica 2

Maksimumi promjena izraženim u tisućama godina								
590,3	550	475,6	435	230	187,5	115	71,9	25

Pomicanje srednje solarne granice vječnog snijega naniže dostiglo je u tim vremenima sljedeće iznose, iskazane u metrima u tablici 3.

Tablica 3

Srednje granice vječnog snijega izražene u metrima [m]								
950	700	1070	1140	1540	1190	1320	1100	1010

Smanjenje ljetnog osunčavanja koji su se pri tom događali, izazvali su sljedeća izmjerena smanjivanja srednje temperature ljetne polugodine navedena u tablici 4.

Tablica 4

Smanjivanja srednje temperature u Celzijevim stupnjevima [°C]								
6,3	4,7	7,1	7,6	10,3	7,9	8,8	7,3	6,7

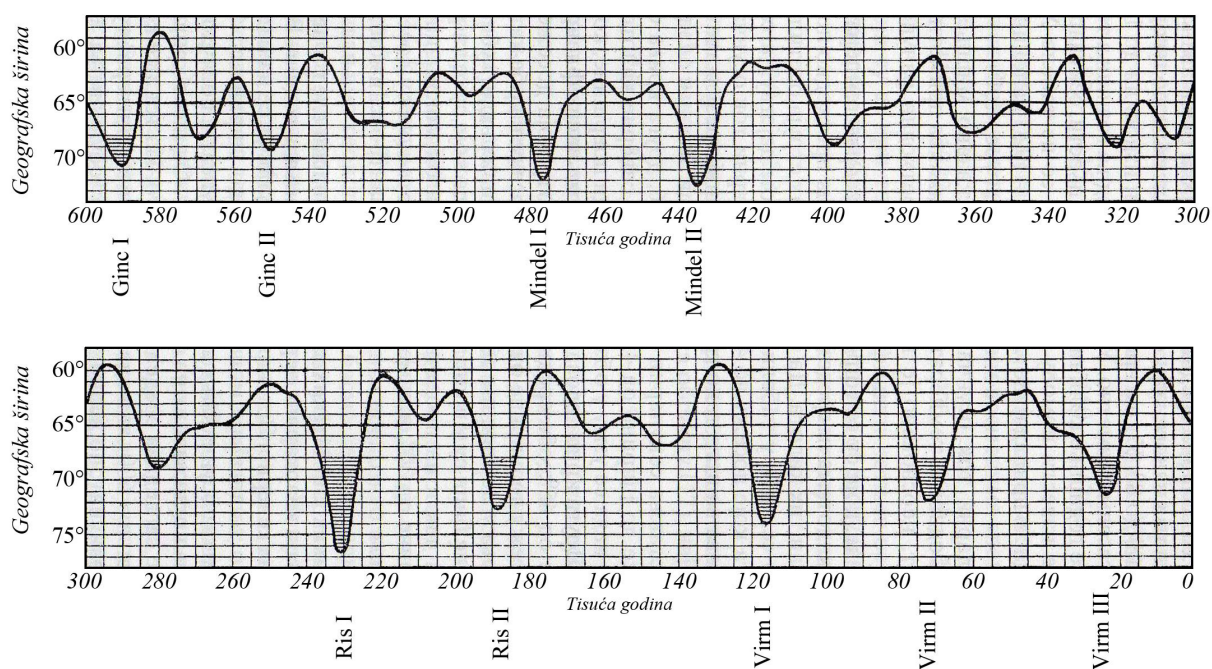
Srednje godišnje temperature bile su isto tako niže, i to po iznosu navedenim u tablici 5.

Tablica 5

Srednje godišnje temperature u Celzijevim stupnjevima [°C]								
2,2	1,5	2,5	3,1	4,0	2,8	3,3	2,8	3,0

Upravo ovo pokazuje kako su ta doba bila vrlo hladnih ljetnih polugodina. Ovih devet razdoblja dubokog spuštanja granice vječnog snijega nije bilo ravnomjerno raspoređeno u intervalu od posljednjih 600 tisuća godina, javljale su se u četiri razdoblja koje smo ranije spomenuli.

Pomoću Milankovićevih krivulja osunčavanja prikazan je sekularni tok osunčavanja Zemlje fiktivnim oscilacijama geografske širine. Na slici 7. možemo vidjeti krivulju osunčavanja za sjevernu geografsku širinu od 65°; polazne zupčaste linije zamijenjene su kontinuiranim krivuljama u kojima su prikazane i međuvrijednosti koje leže između odstupanja sekularnog toka osunčavanja. Pri tome je krivuljom obuhvatio čitavu Zemlju, a ne samo pojedina područja kao u ranijim istraživanjima.



Slika 7: Krivulja osunčavanja

Što se tiče južne Zemljine polutke u vremenskom intervalu od posljednjih 600 tisuća godina, smanjenje ljetnog osunčavanja, računat po jedinici površine, devet puta je prešao iznos od 900 kaloričnih jedinica; što je devet najvećih sekularnih promjena ljetne količine osunčavanja u promatranom vremenskom razdoblju.

Minimumi ljetne količine osunčavanja navedeni su u tablici 6.

Tablica 6

Minimumi ljetne količine osunčavanja u tisućama godina								
600	560	485	444	314,4	198,5	152,2	105,1	30

U tim vremenskim periodima srednja solarna granica vječnog snijega spuštala se za iznose navedene u tablici 7.

Tablica 7

Srednje granice vječnog snijega izražene u metrima [m]								
910	1030	830	840	980	930	840	1110	830

Srednja temperatura ljetne polugodine snižavala se za iznose navedenim u tablici 8.

Tablica 8

Smanjivanja srednje temperature u Celzijevim stupnjevima [°C]								
6,1	6,9	5,5	5,6	6,5	6,2	5,6	7,4	5,5

Sniženje godišnje temperature iznosilo je kao što je navedeno u tablici 9.

Tablica 9

Srednje godišnje temperature u Celzijevim stupnjevima [°C]								
1,2	1,1	0,8	0,9	1,2	0,9	1,0	1,4	1,3

Usporedimo li najjači prodor hladnoće na sjevernoj polutki Zemlje prije 230 tisuća godina, na južnoj polutki to je bilo prije 105 tisuća godina od 1800. godine. Na sjevernoj polutki posljednje smanjenje osunčavanja postiglo je svoj maksimum prije 25 tisuća godina, a na južnoj prije 30 tisuća godina. Budući da su prodori hladnoće znali trajati deset ili više tisuća godina, može se uočiti da je prije 25 tisuća godina ledeno doba pogodilo obje Zemljine polutke. Isto vrijedi i za prodore hladnoće koji su se na južnoj polutki dogodili prije 600, 560, 484 i 444 tisuća godina, bliski su onima koji su se dogodili na sjevernoj polutki prije 590, 3, 550, 475, 6 i 435 tisuća godina.²²

Milanković je ovim pokazao istovremeno zaleđivanje obje polutke, upravo ono što su mnogi smatrali nemogućim. Ustanovio je kakav utjecaj na dužinu, visinu i trajanje snježnog pokrivača ima ljetni poluperiod. Hladna ljeta nisu imala dovoljno topline potrebne za topljenje snijega nataloženog tijekom zime, što je značilo da su se polarne snježne kape

²²Milanković, M., *Kanon osunčavanja Zemlje i njegova primena na problem ledenih doba (2. dio)*, str. 313.-325.

primjetno povećavale. Moglo se zaključiti kako hladna podloga i veličina ledenih pokrivača mnogo odbija, a vrlo malo upija Sunčevu energiju što je utjecalo na pogoršanje klimatskih uvjeta.²³

Ako su se u prošlosti ljetne količine osunčavanja smanjivale onda se, kao što je dokazano, isto to događalo i s visinskim položajem granice vječnog snijega. Taloženjem ledenog pokrivača temperaturna krivulja odstupala je od krivulje osunčavanja. Pri porastu osunčavanja najprije se morao dio primljene količine topline utrošiti na topljenje nago-milanog snijega i leda, prije nego što bi se povisila temperatura. U odnosu na minimum osunčavanja temperaturni minimum kasnio je za jedan vremenski interval koji je, ovisno o samoj debljini snježnog pokrivača, iznosio više tisuća godina, ponekad i više. Uzmemo li kao primjer Alpe, u nekim slučajevima u centralnom području zaleđivanja nije dolazilo do porasta temperature jer se zbog debljine ledenog pokrivača njegova površina podigla do one nadmorske visine na kojoj je bila zaštićena od topljenja.²⁴

Po Milankovićevim računima precesioni ciklusi imaju veći utjecaj na pojavu ledenih doba i njihovih posljedica na nižim nego na višim geografskim širinama. Što se tiče nagiba Zemljine osi, kut se više osjeća u područjima bližim polu nego u područjima bližim ekvatoru.²⁵

Ovaj veliki rad na klimatskim promjenama, u trajanju oko trideset godina, upotpunio je svojim životnim djelom pod naslovom „Kanon osunčavanja Zemlje i njegova primjena na problem ledenih doba” izdan 2. travnja 1941. godine.

²³Gledić, V., *Milutin Milanković: Život i delo*, str. 70.

²⁴Milanković, M., *Kanon osunčavanja Zemlje i njegova primena na problem ledenih doba (2. dio)*, str. 324.-325.]

²⁵Gledić, V., *Milutin Milanković: Život i delo*, str. 70.

2.2.3 Pomicanje Zemljinih polova

Proučavajući ledena doba Milanković je naišao na još jedno područje koje ga je zainteresiralo. Primjetio je kako na nekim mjestima nisu došla do izražaja sva ledena doba, već su neka spojena i na krivulji se nisu uočila. Zanimalo ga je zašto u Europi ne postoje tragovi ledenih doba u dalekoj geološkoj prošlosti, i to prije kvartara. Prije Milankovića time su se bavili Köppen i Wegener. Wegener je smatrao kako se sjeverni Zemljin pol rotacije u doba karbona²⁶ nalazio u Tihom oceanu, pa zbog toga nije bilo ledenog doba. Tako je Wegener 6. listopada 1924. odlučio poslati pismo Milankoviću u kojem mu se obratio i molio za pomoć u vezi istraživanja pomicanja Zemljinih polova i utjecaja, te je napisao:

„Ja bih se radovao kada biste prišli problemu pomeranja polova, čak iako se on ne može glatko rešiti. Već je dovoljno važno i to ako se jednom utvrdi šta se sve, sa teorijskog gledišta, može reći o ovom pitanju . . .”²⁷

Matematičkom teorijom pomicanja Zemljinih polova Milanković se počeo detaljno baviti od 1925. godine. Milanković nije odbacio Wegenerove poznate teorije nastanka kontinenta i oceana, već je tvrdio kako se trebaju ozbiljno shvatiti u daljnjim istraživanjima.

Wegener je smatrao da su kontinenti građeni od čvrstog materijala siala, nazvan tako jer su stijene bile bogate silicijevim i aluminijskim mineralima, a kontinentalne ploče ugrađene su u dio Zemlje fluidalnog stanja nazvan sima po siliciju i magneziju. Za ovaj dio Zemljine kore koji treba smatrati čvrstim, Milanković je nazvao izostazijskim pokrivačem Zemlje, a dio ispod njega fluidalnom podlogom ili fluidalnom Zemljinom jezgrom. Inače, izostazija je ravnoteža susjednih dijelova kore i dijelova plašta ispod njih. Stijene kore lakše su od stijena plašta, pa se može reći kako kora „pliva” na plaštu. Sve dok se ne uspostavi izostatska ravnoteža, dijelovi kore dižu se ili tonu, odnosno dok težina potisnutog dijela plašta ne bude jednaka težini kore.²⁸

Milanković je smatrao da Zemlju treba promatrati kao jedno fluidalno tijelo, odnosno prema dugotrajnim silama popustljivo tijelo koje je omotano nepravilnim, elastično prilagodljivim, nepovezanim pokrivačem. Kada bi taj pokrivač bio jednake gustoće kao unutar-nji dio, površina Zemlje bi bila potpuno glatka i mogli bi ju zamisliti kao pravilni elipsoid. Za takvo shvaćanje Zemlje određuje položaje glavnih osi inercije cijele Zemlje, u odnosu na unutar-nji dio, i pronalazi pomicanja nastala djelovanjem sila koje unutar-nji dio nastoje uravnotežiti vanjskom dijelu, pokrivaču.

Pronalazi izraz za moment inercije Ω , te je pokazao da se srednji rotacioni pol Zemlje podudara s polom inercije, gdje \vec{v} predstavlja brzinu kretanja srednjeg rotacionog pola.

²⁶Karbon je geološka era paleozojske ere, počela prije oko 340 milijuna, a trajala do oko 60 milijuna godina od današnjeg vremena.

²⁷Gledić, V., *Milutin Milanković: Život i delo*, str. 75.

²⁸Wikipedia, *Izostazija*, dostupno na: <http://hr.wikipedia.org/wiki/Izostazija>

Za sekularno kretanje rotacionog pola Zemlje u odnosu na Zemljinu površinu dolazi do sljedećih relacija:

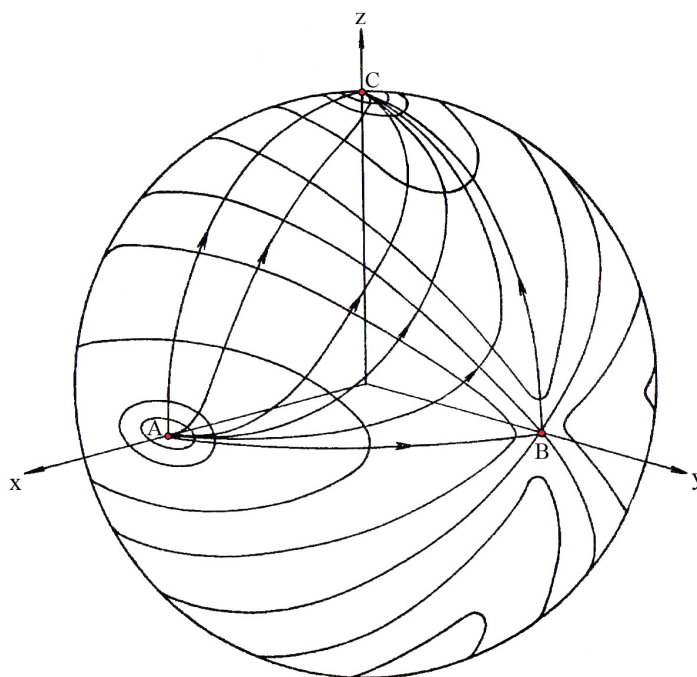
$$n = \frac{\kappa}{2(C - A)}, \quad (2.4)$$

$$\vec{v} = n \cdot \text{grad}\Omega, \quad (2.5)$$

gdje je κ koeficijent prilagođavanja, A i C su glavni momenti inercije u rotaciji Zemlje.

Ovo je osnovna vektorska jednadžba sekularnog kretanja pola. Vektor brzine sekularnog kretanja je u svakoj točki putanje pola proporcionalan gradijentu polja Ω . Ubrzo nakon toga uspio je pronaći još jedno izvođenje osnovne jednadžbe sekularnog kretanja Zemljinih polova koje su zbog jednostavnosti i lakše razumljivosti mnogi geofizičari bolje prihvatili.²⁹

Pri izračunavanju polja Ω , referentni koordinatni sustav postavio je u centar Zemlje, a koordinate ravnine podijelio je na osam jednakih područja, „oktanata”. Jedan takav oktant prikazan je sfernim trokutom ABC na slici 8. čija su tjemena točke prodora pozitivnih krakova koordinatnih osi kroz Zemljinu površinu.



Slika 8: Oktant ABC

Točka A je tjeme koje odgovara minimalnoj vrijednosti Ω , točka C odgovara maksimumu od Ω , a točka B maksimumu-minimumu od Ω .

²⁹Milanković, M., *Kanon osunčavanja Zemlje i njegova primena na problem ledenih doba (1. dio)*, str. 311.-325.]

Stranice ovog sfernog trokuta su simetrale polja Ω , ekviskalarne linije polja Ω sijeku te stranice pod pravim kutom tako da su te stranice ortogonalne trajektorije tih linija.

Tri različite vektorske linije polja $grad\Omega$ imaju pozitivan smjer $A \rightarrow B$, $A \rightarrow C$ i $B \rightarrow C$. U okolini ta tri prodora koordinatnih osi vidimo na slici 8. da su ekviskalarne linije elipse (ortogonalne trajektorije su parabole koje prolaze kroz točku A , isto kao i kroz točku C) ili hiperbole (ortogonalne trajektorije prolaze kroz točku B). Budući da skalar Ω i u početnoj i u završnoj točki ovih krivulja postiže svoje ekstremne vrijednosti, u tim točkama je gradijent od Ω jednak nuli. Te dvije točke predstavljaju sve ravnotežne položaje rotacionog pola, točka A položaj labilne, a točka C položaj stabilne ravnoteže. To znači sljedeće, ako se pol u prošlosti nalazio u bilo kojoj točki sfernog trokuta ABC , unutar ili na rubu, pomicao bi se sve dok ne bi postigao stabilan položaj u točki C , a ukupno pomicanje pola tako može iznositi najviše 90° . Ovim opisanim vektorskim krivuljama pripadaju sekularne putanje pola bez obzira na početne uvjete.³⁰

Time se stvara predodžba o kretanju pola, a rješavanjem diferencijalne jednadžbe i uvođenjem polarnih koordinata Φ i Ψ dobiva jednadžbu putanje pola i način kretanja po njoj:

$$\cos\Psi \cdot tg^k\Psi = C_1 \cdot tg\Phi, \quad (2.6)$$

$$tg\Psi = C_2 \cdot e^{\mu t}, \quad (2.7)$$

čime je ujedno nađen i vremenski tok kretanja pola.

U tablici 10. na sljedećoj stranici izloženi su rezultati koje je Milanković izračunao.

Tablica 10. sadrži koordinate od 25 točaka sekularne putanje sjevernog, odnosno južnog pola, koje se odnose na sadašnju mrežu Zemljinih meridijana i paralela. Od 25 točaka, 16 ih pripada prošlosti, jedna sadašnjosti, a 8 budućnosti.

Za Milankovića, pomicanje polova u posljednjih 600 tisuća godina odvijalo se lagano tako da se nije moglo osjetiti, zbog čega za proračune sekularnog toka osunčavanja Zemlje nije koristio.³¹

Njegovi matematički računi pokazali su da se za vrijeme karbona sjeverni Zemljin pol nalazio u Tihom oceanu, u blizini Havaja, a južni pol u blizini južne Afrike. Tada je Zemljin ekvator prolazio kroz najsjevernije dijelove našeg kontinenta, a time klima bivala na tom području topla, što dokazuju naslage kamenog ugljena koje se nisu mogle stvoriti u današnje vrijeme. Na primjer, danas je Grenland prekriven ledom, a tada je bio obrastao gustim šumama, dok je u južnoj Africi vladalo ledeno doba, a u razdoblju tercijara sjeverni pol se pomaknuo do Aljaske i tako izazvao glacijacije Aljaske i istočnog Sibira.

³⁰Milanković, M., *Kanon osunčavanja Zemlje i njegova primena na problem ledenih doba (2. dio)*, str. 337.-342.]

³¹Isto, str. 363.

Tablica 10: Koordinate od 25 točaka obje putanje pola

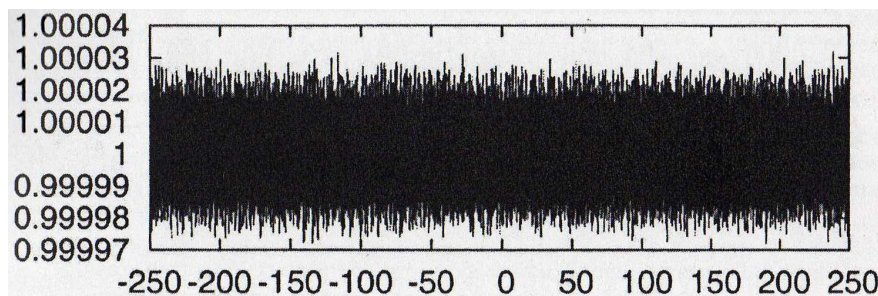
Vrijeme od prošlosti (negativno) ka budućnosti (pozitivno)	Sjeverni pol Zemlje		Južni pol Zemlje	
	Geografska dužina	Geografska širina	Geografska dužina	Geografska širina
$-\infty$	$-168^{\circ}08'$	$+20^{\circ}02'$	$+11^{\circ}52'$	$-20^{\circ}02'$
-40	$-167^{\circ}26'$	$+20^{\circ}12'$	$+12^{\circ}34'$	$-20^{\circ}12'$
-30	$-166^{\circ}10'$	$+20^{\circ}34'$	$+13^{\circ}50'$	$-20^{\circ}34'$
-20	$-162^{\circ}43'$	$+21^{\circ}39'$	$+17^{\circ}17'$	$-21^{\circ}39'$
-15	$-159^{\circ}21'$	$+23^{\circ}36'$	$+20^{\circ}39'$	$-23^{\circ}36'$
-12	$-156^{\circ}35'$	$+26^{\circ}35'$	$+23^{\circ}25'$	$-26^{\circ}35'$
-10	$-154^{\circ}56'$	$+30^{\circ}05'$	$+25^{\circ}04'$	$-30^{\circ}05'$
-9	$-153^{\circ}13'$	$+32^{\circ}46'$	$+26^{\circ}47'$	$-32^{\circ}46'$
-8	$-151^{\circ}59'$	$+36^{\circ}10'$	$+28^{\circ}01'$	$-36^{\circ}10'$
-7	$-150^{\circ}43'$	$+40^{\circ}30'$	$+29^{\circ}17'$	$-40^{\circ}30'$
-6	$-149^{\circ}24'$	$+45^{\circ}55'$	$+30^{\circ}36'$	$-45^{\circ}55'$
-5	$-148^{\circ}03'$	$+52^{\circ}25'$	$+31^{\circ}57'$	$-52^{\circ}25'$
-4	$-146^{\circ}42'$	$+59^{\circ}54'$	$+33^{\circ}18'$	$-59^{\circ}54'$
-3	$-145^{\circ}23'$	$+67^{\circ}58'$	$+34^{\circ}37'$	$-67^{\circ}58'$
-2	$-144^{\circ}03'$	$+76^{\circ}01'$	$+35^{\circ}57'$	$-76^{\circ}01'$
-1	$-142^{\circ}51'$	$+83^{\circ}30'$	$+37^{\circ}09'$	$-83^{\circ}30'$
0	–	$+90^{\circ}$	–	-90°
+1	$+39^{\circ}43'$	$+84^{\circ}38'$	$-140^{\circ}17'$	$-84^{\circ}38'$
+2	$+40^{\circ}46'$	$+80^{\circ}22'$	$-139^{\circ}14'$	$-80^{\circ}22'$
+3	$+41^{\circ}49'$	$+77^{\circ}00'$	$-138^{\circ}11'$	$-77^{\circ}00'$
+4	$+42^{\circ}47'$	$+74^{\circ}19'$	$-137^{\circ}13'$	$-74^{\circ}19'$
+6	$+44^{\circ}25'$	$+70^{\circ}44'$	$-135^{\circ}35'$	$-70^{\circ}44'$
+10	$+46^{\circ}48'$	$+67^{\circ}18'$	$-133^{\circ}12'$	$-67^{\circ}18'$
+15	$+48^{\circ}24'$	$+65^{\circ}53'$	$-131^{\circ}36'$	$-65^{\circ}53'$
$+\infty$	$+49^{\circ}34'$	$+65^{\circ}16'$	$-130^{\circ}26'$	$-65^{\circ}16'$

3 Potvrda i dokazi Milankovićeve teorije

Nakon Milankovićeve smrti 1958. godine njegova teorija biva pomalo zaboravljena i nepriznata. Međutim, desetljeće poslije smrti započinje novi život Milutina Milankovića. Poznat po astronomskoj teoriji klime, po matematičkoj teoriji osunčavanja, stvorio je takvu teoriju koja se mogla dalje matematički provjeriti i geološki potvrditi. Podsjetimo se da je utvrdio tri osnovna elementa (promjena položaja Zemljine osi, promjena ekscentriciteta i promjena nagiba ekliptike) koji se periodično mijenjaju i te elemente dovodio u vezu s promjenom klime. S vremenom je sve više dokaza ukazivalo na točnost njegovih izračuna.

Projekt CLIMAP (Climate: Long range Investigation, Mapping, and Prediction) uzet je sedamdesetih i osamdesetih prošlog stoljeća koji je potvrdio Milankovićeve cikluse osunčavanja. Shackleton i Opdyke 1972. godine sastavljaju vremensku ljestvicu klimatskih događaja za posljednjih 700 000 godina pomoću geomagnetnih i izotopskih svojstava iz Tihog oceana. Kasnije 1976. godine Hays, Imbrie i Shackleton izvode spektralnu analizu uzoraka iz Indijskog oceana i utvrđuju da se u proteklih 500 000 godina klima mijenjala u ovisnosti o promjeni nagiba Zemljine osi rotacije i precesije upravo onako kako je predvidio Milanković svojom astronomskom teorijom.³²

Razvoj teorije kretanja planeta Sunčevog sustava nastavlja se i danas i time su učinjeni važni pomaci i dobiveni novi rezultati koji Milankovićeve ideje potvrđuju i poboljšavaju. Upravo te nove rezultate do kojih je došla grupa istraživača opservatorija u Parizu vođena Jacquesom Laskarom 2004. godine, ukratko ću objasniti. Prikazali su promjene velike poluosi putanje baricentra sustava Zemlja-Mjesec u periodu od ukupno 500 milijuna godina kao što se može vidjeti na slici 9.

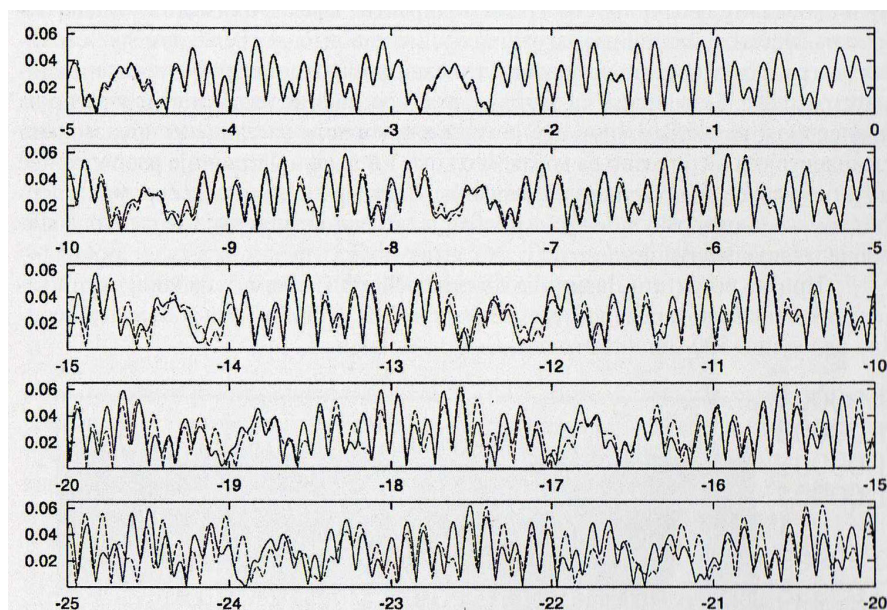


Slika 9: Promjene velike poluosi baricentra sustava Zemlja-Mjesec u astronomskim jedinicama

³² Anđelić, T.P., ur., *Život i delo Milutina Milankovića 1879.-1979.*, str. 69.-70.

Možemo zaključiti da je amplituda promjena izuzetno mala oko $0,00004 \text{ AJ}^{33}$, odnosno 6000 km , čime je pokazano stabilno kretanje Zemlje oko centralne zvijezde Sunca u ovom vremenskom intervalu na slici 9.

Na slici 10. prikazane su promjene ekscentriciteta Zemljine putanje za proteklih 25 milijuna godina, gdje možemo uočiti novi model koji odstupa od prethodnog, a s vremenom se odstupanje povećava.



Slika 10: Ekscentricitet Zemljine putanje za proteklih 25 milijuna godina

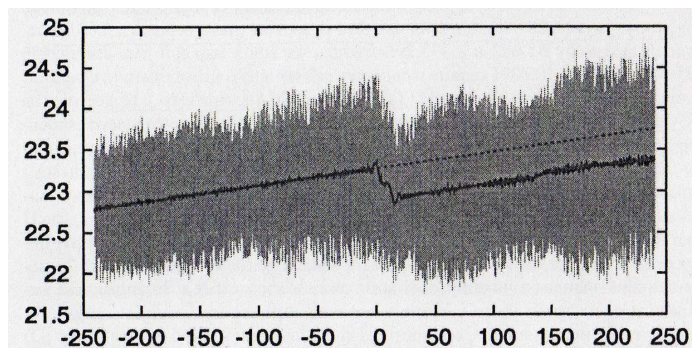
Minimalne vrijednosti ekscentričnosti Zemljine putanje su približno jednake nuli što odgovara približno kružnoj putanji, gotovo stalnoj udaljenosti Zemlje od Sunca i minimalnim razlikama intenziteta Sunčevog zračenja koje godišnje dolazi na Zemlju. Maksimalne vrijednosti iznose $0,06$ što odgovara razlici udaljenosti Zemlje od Sunca u perihelu i afelu od oko 18 milijuna kilometara, i maksimalnoj godišnjoj razlici intenziteta zračenja.

Milanković je u svojim proračunima naveo kako mu je nagib Zemljine osi rotacije potreban s točnošću do na 140 kutnih sekundi. No, već kod početnih uvjeta koje je primjenjivao postoje odstupanja od suvremenih vrijednosti.

Milankovićeva vrijednost za sekularne promjene nagiba Zemljine osi rotacije za vremenski interval od 600 000 godina iznosi $22,40^\circ$, dok su Laskar i suradnici dobili vrijednost od $22,65^\circ$. Ipak, za vremenski interval od 100 000 godina dobio je vrijednost ekscentriciteta za samo 50 kutnih sekundi razlike od Laskara i suradnika.

³³AJ je astronomska jedinica i iznosi približno 150 milijuna kilometara.

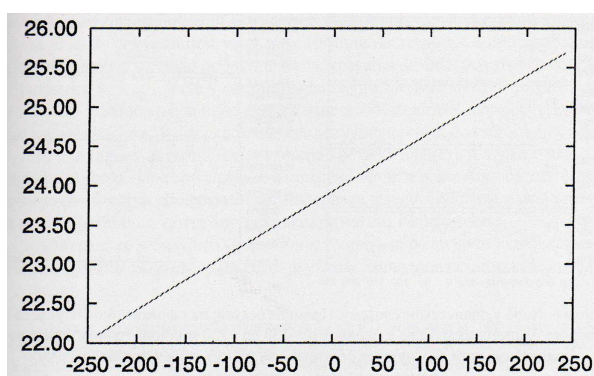
Ako pogledamo sliku 11. uočiti ćemo zanimljivu karakteristiku promjene nagiba Zemljine osi rotacije. Sivom bojom istaknuto je područje promjene trenutnog nagiba, crnom krivuljom istaknuta je srednja vrijednost, a iscrtana krivulja pokazuje linearan tijek promjena srednjeg nagiba zbog lakšeg uočavanja pada vrijednosti nagiba Zemljine osi rotacije.



Slika 11: Nagib Zemljine osi u kutnim stupnjevima od -250 do $+250$ milijuna godina

Vidi se značajan pad vrijednosti nagiba oko sadašnjeg razdoblja za $0,38$ kutnih stupnjeva zato što precesiona frekvencija Zemljine osi rotacije prolazi kroz sekularnu rezonancu s poremećajem frekvencija longituda perihela Jupitera i Saturna i longitude ulaznog čvora Saturna. Što se tiče Milankovićevih rezultata i izraze koje koristi vrlo se dobro slažu sa suvremenim modelima.

Još jedan rezultat sekularne promjene do koje su došli Laskar i suradnici odnosi se na promjene precesione frekvencije. Srednja udaljenost Mjeseca i Zemlje raste prosječno oko $3,9$ *cm* godišnje, a za posljedicu toga je smanjenje Zemljine precesione frekvencije sa oko 58 kutnih sekundi godišnje, koja je bila vrijednost prije oko 250 milijuna godina, zatim 50 kutnih sekundi godišnje danas, na oko 45 kutnih sekundi godišnje za sljedećih 250 milijuna godina. Na slici 12. prikazana je promjena duljine dana koja će se promijeniti za 4 sata sljedećih 500 milijuna godina.



Slika 12: Duljina dana u vremenskom intervalu od 500 milijuna godina

Na točnost predviđanja kretanja planeta utječu mnogi čimbenici, a jedan od glavnih razloga kaotičnog kretanja u Sunčevom sustavu je preklapanje sekularnih rezonanci. U tablici 3. navedeni su neki od čimbenika koji utječu na točnost današnjih astronomskih teorija kretanja planeta i duljina vremenskog intervala nakon kojeg ovi navedeni čimbenici nemaju više točnost potrebnu za paleoklimatska ispitivanja.³⁴

Tablica 11: Glavni izvori netočnosti rješenja u teoriji kretanja planeta u milijunima godina (Laskar, 1999.)

Ograničavajući faktor	T
Netočnost masa i početnih uvjeta	38
Doprinos Jupiterovih satelita	35
Netočnost evolucije sustava Zemlja-Mjesec	40
Utjecaj velikih asteroida	32
Smanjivanje mase Sunca	50
Netočnost dinamičkog J2 faktora Sunca	26

U današnje vrijeme promjena nagiba Zemljine osi rotacije i ekscentričnost Zemlje djeluju u smjeru zahlađenja, a precesija ima smjer zagrijavanja. Neujednačenost ova tri astronomska elementa neće promijeniti prirodni klimatski tok sve dok se oni ne ujednače. Kako je Köppen 1922. godine predvidio, a Milanković nastavio proučavati i matematički izračunavati, suvremena znanost ne može proučavati niti predviđati buduće klimatske promjene bez njihovih temelja. To je potvrdio i Četvrti izvještaj Međuvladinog tijela za klimatske promjene (IPCC-Intergovernmental Panel of Climate Change) objavljen 2007. godine. U Četvrtom izvještaju predstavljene su znanstvene spoznaje o klimatskim promjenama, utjecajima i mjerama prilagodbe klimatskim promjenama, te potencijalima smanjenja emisija.

Što se tiče pomicanja polova i ledenih doba možemo reći sljedeće. Po izračunatim položajima sekularne putanje polova rotacije euroazijska ploča bi se trebala kretati prema sjeveroistoku sve do „konačne” budućnosti, kao i afrička ploča što potvrđuje većina geofizičkih ispitivanja da je opći smjer kretanja tektonskih ploča identičan, a to pokazuje kako je Milankovićev matematičko-mehanički model točan i prihvatljiv. Euroazijska kontinentalna ploča će u vremenu, koje Milanković označava s $+\infty$ (vidi tablicu 2.), vjerojatno biti prekrivena potpuno ledom, jedino će južni azijski dio ostati djelomično pod umjerenijom klimom. Po Milankovićevom modelu vječno prekriveni snijegom i ledom bit će Europa, Azija, najveći dio Grenlanda, Sjeverna Amerika i sjeverna Afrika na sjevernoj Zemljinoj polutki.

³⁴Očić, Č., ur., *Zbornik radova s Međunarodnog simpozija Stvaralaštvo Milutina Milankovića održanog u Dalju 23. i 24. maja 2008. godine*, str. 84-92.

Na južnoj polutki Zemlje Antarktiki će zadržati sadašnje stanje, a Južna Amerika i Australija ostat će izvan globalnog zahlađenja. Razlog tome je kada se sjeverni pol bude nalazio na kopnenom dijelu onda će se brže i više širiti prema jugu nego što je to danas. Kri-vulja osunčavanja bit će ista, ali svejedno će se led i snijeg lakše širiti kopnom jer ih neće spriječavati vodene barijere, zone zagrijavanja oceanskih i morskih voda, niske točke zamrzavanja ili količina soli u oceanima i morima.³⁵

O prošlosti klime na Zemlji od 2000. godine znanost je došla u mogućnost precizno izmjeriti temperaturu i koncentraciju CO₂ (ugljik-dioksid) u bilo kojem trenutku. Mnogo znanja postignuto je analizom kemijskog sastava mjehurića zraka koji su se zadržali u ledu. Na temelju analiza možemo odrediti kada je točno nastao mjehurić zraka u ledu, a tada se zna koliko je leda na Zemlji bilo, kolika je u to doba bila temperatura i količina CO₂ u atmosferi. Na koji način se dolazi do jednostavnih zaključaka možemo navesti primjer izotopa kisika ¹⁸O. Budući da lakši kisik ¹⁶O, kao sastavni dio molekule vode, isparava s površine Zemlje u većim količinama nego teži kisik ¹⁸O, ima ga više u ledu. Ako je manje ¹⁸O zarobljeno u ledu, znači da ga je više bilo u oceanima i morima. Na temelju udjela izotopa kisika ¹⁸O u mjehurićima zraka možemo odrediti količinu leda na Zemlji u vrijeme kada je nastao. Pri određivanju temperature koristi se vodikov izotop deuterij (²H). Pri smrzavanju omjer deuterija i običnog vodika se mijenja jer deuterij ima veću masu, pa se sporije kreće i molekula vode, koja ga sadrži, brže se zamrzava. Mjerenjem postotka deuterija određujemo temperaturu koja je bila u doba kad je led nastao. Na isti način mjerenjem postotka CO₂ u ledu određujemo njegovu količinu u atmosferi. Ledena doba i ugljik-dioksid dijele dugu povijest, ledena sedimentna jezgra sadrži cijelu povijest promjene CO₂.

Istraživanje leda na Antarktiku dalo je podatke da je temperatura prije 154 000 godina bila za 10°C niža od temperature u zadnjih 1000 godina, i zatim je nastupilo globalno zagrijavanje, pa je prije 127 000 godina temperatura bila viša za 15°C. Takav prijelaz iz globalnog ledenog doba u globalno zagrijavanje slijedi i porast koncentracije stakleničkih plinova. Glavni staklenički plinovi su vodena para, koja uzrokuje oko 36-70% efekta, ugljik-dioksid (CO₂), koji uzrokuje 9-26% efekta, metan (CH₄), koji uzrokuje 4-9% efekta, te ozon, koji uzrokuje 3-7% ukupnog efekta staklenika. Prema „efektu staklenika”, najprije se smatralo kako porast stakleničkih plinova, naročito ugljik-dioksida, uzrokuje porast temperature, sve dok se nije ustanovilo upravo suprotno, porast temperature ima za posljedicu porast stakleničkih plinova.³⁶

Isto tako za vrijeme maksimuma posljednjeg ledenog doba, oko 20 000 godina prije sadašnjosti, razina svjetskih oceana tada bila je oko 120 m niža nego danas, a za vrijeme doba prije 35 milijuna godina na Zemlji je bilo vrlo malo leda i razina svjetskih oceana je bila

³⁵Očić, Č., ur., *Zbornik radova s Međunarodnog simpozija Stvaralaštvo Milutina Milankovića održanog u Dalju 23. i 24. maja 2008. godine*, str. 228.-232.

³⁶Pandža, G. (2011), Intervju, Vladimir Paar: Iza negativnih klimatskih scenarija stoje interesi industrijskih lobija, *Vjesnik.hr* [online], Dostupno na: <http://www.vjesnik.hr/Article.aspx?ID=844DB746-CEF9-4022-9124-57F3139C3607>

oko 70 m viša nego danas. James Hansen i suradnici spominju kritičnu točku i točku bez povratka za sadržaj CO₂. Kritična točka je točka pri kojoj klimatsko forsiranje dovodi do dramatičnih promjena klime, ali se još uvijek može izbjeći ako se forsiranje smanji. Dok je točka bez povratka točka pri kojoj se smanjenje forsiranja više neće moći dostići, odnosno sadržaj ugljik-dioksida trebalo bi smanjiti od sadašnjih 385 ppm³⁷ na najviše 350 ppm ili manje. Hansen i suradnici su optimistični i jedan od načina na kojem se trenutno radi je otpremanje ugljik-dioksida u podzemne spremnike.³⁸

Možemo zaključiti kako smo trenutno na kraju globalnog zagrijavanja iza kojeg slijedi ledeno doba. Vremenski interval trenutnog globalnog zagrijavanja traje dulje nego ranija doba zagrijavanja, što znači da smo još prije nekoliko tisuća godina trebali biti u ledenom dobu. Razlog tome vrlo vjerojatno je čovjekov utjecaj.

³⁷Skraćenica ppm (parts per million) upotrebljava se za izražavanje koncentracije u relativnim proporcijama i bezdimenzionalna je, 1 ppm predstavlja 1 dio na 10⁶ dijelova.

³⁸Č. Očić, ur., *Zbornik radova s Međunarodnog simpozija Stvaralaštvo Milutina Milankovića održanog u Dalju 23. i 24. maja 2008. godine*, str. 61.-62.

4 Nagrade i priznanja

Potvrdu i priznanje za svoj rad Milanković nije doživio; tek od 1976. godine, kada je u američkom časopisu „Science”³⁹ potvrđena njegova teorija, njegov ugled u znanosti počinje dobivati na važnosti. Milutin Milanković uvršten je među pet najvećih znanstvenika 20. stoljeća, a NASA⁴⁰ ga je uvrstila među 15 najvećih znanstvenika svih vremena koji su posvetili svoj život proučavanju Zemlje.

Po njemu je nazvan krater „Milanković” na daljoj strani Mjeseca 34 kilometra u promjeru na $+22,0^\circ$ širine i $-145,0^\circ$ visine. Također, krater „Milanković” na Marsu nosi njegove ime, kao i asteroid „1605 Milanković”. Istaknimo još jedno svjetsko priznanje, 1993. godine Europsko geofizičko društvo ustanovilo je medalju „Milutin Milanković” koja se dodjeljuje znanstvenicima koji postižu priznate rezultate u područjima kojima se bavio i sam znanstvenik.

UNESCO je 2009. godinu proglasio godinom Milutina Milankovića povodom 130. godišnjice njegova rođenja, a njegov lik krasi novčanicu od 2000 dinara kao i poštansku marku iz 2004. godine Republike Srbije.

³⁹„Znanost”

⁴⁰National Aeronautics and Space Administration (NASA)

Literatura

- [1] T. P. ANĐELIĆ, ur., *Život i delo Milutina Milankovića 1879.-1979.*, Srpska akademija nauka i umetnosti, Beograd, 1979.
- [2] V. GLEDIĆ, *Milutin Milanković: Život i delo*, Admiral Books, Beograd, 2007.
- [3] M. MILANKOVIĆ, *Kanon osunčavanja Zemlje i njegova primena na problem ledenih doba (1. dio)*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1997.
- [4] M. MILANKOVIĆ, *Kanon osunčavanja Zemlje i njegova primena na problem ledenih doba (2. dio)*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1997.
- [5] Č. OČIĆ, ur., *Zbornik radova s Međunarodnog simpozija Stvaralaštvo Milutina Milankovića održanog u Dalju 23. i 24. maja 2008. godine*, Srpska akademija nauka i umetnosti, Beograd, 2009.
- [6] G. PANDŽA, Intervju, *Vladimir Paar: Iza negativnih klimatskih scenarija stoje interesi industrijskih lobija*, Vjesnik.hr [online], 2011.
Dostupno na: <http://www.vjesnik.hr/Article.aspx?ID=844DB746-CEF9-4022-9124-57F3139C3607>
- [7] D. SPASOVA, *Milutin Milanković: putnik kroz vasionu i vekove*, Zavod za unapređenje obrazovanja i vaspitanja, Beograd, 2008.
- [8] WIKIPEDIA, *Milankovićeve ciklusi*,
Dostupno na: http://hr.wikipedia.org/wiki/Milankovićeve_ciklusi
- [9] WIKIPEDIA, *Milutin Milanković*,
Dostupno na: http://en.wikipedia.org/wiki/Milutin_Milanković
- [10] WIKIPEDIA, *Izostazija*,
Dostupno na: <http://hr.wikipedia.org/wiki/Izostazija>

Sažetak

U uvodnom dijelu diplomskog rada opisana je biografija Milutina Milankovića, podijeljena u tri poglavlja: obitelj i djetinjstvo, obrazovanje u Osijeku i Beču, te život i rad u Beču i poslije u Beogradu. Glavni dio čini njegov znanstveni rad s najistaknutijim proučavanjima kao što su osunčavanje planeta, naročito Zemlje, izmjena ledenih doba, te pomicanje Zemljinih polova. Na kraju su navedeni najvažniji dosadašnji načini i dokazi koji su potvrdili Milankovićevu teoriju, kao i priznanja u njegovu čast.

Ključne riječi: Milutin Milanković/klimatske promjene/osunčavanje/Milankovićeve ciklusi/ledeno doba/pomicanje polova

Summary

In the introductory part of bachelor thesis is shown Milutin Milanković biography, divided in three chapters, family and childhood, education in Osijek and Vienna and life and work in Vienna and later in Belgrade. Main part is focused on the scientific work with most distinctive observations such as insolation, specifically of Earth, ice age cycles and shifting of the Earth poles. In the last chapter, we have the scientific methods and confirmations of Milanković's theory, along with acknowledgment of his theories in his honor.

Keys words: Milutin Milanković/ climate changes/ insolation/ Milanković cycles/ ice age/ shifting poles

Životopis

Zovem se Ivana Fajfer, rođena sam 21. siječnja 1985. godine u Osijeku. Od 1991. do 1998. godine završila sam osnovnu školu „Jagoda Truhelka” u Osijeku, a osmi razred završila 1999. godine u osnovnoj školi „Popovac” u Popovcu, te iste godine upisala opću gimnaziju „Gimnazija Beli Manastir” u Belom Manastiru. Godine 2003. upisala sam studij matematike i fizike na Odjelu za matematiku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Uz to, aktivni sam i dugogodišnji član Crvenog križa u Osijeku.