

KLIMATSKE PROMJENE

ANITA FILIPČIĆ

UVOD

Ni jedan segment klimatologije nije toliko prisutan u medijima kao klimatske promjene. Većina znanstvenika koji se bave klimatskim promjenama i njihovim posljedicama pripada dvjema strujama: pretjeranim optimistima i pretjeranim pesimistima. Često se prikazuju rezultati kompjutorskih simulacija koje uključuju parametre čije vrijednosti u budućnosti mogu biti vrlo različite, pa su stoga različite i simulacije, odnosno "scenariji" po kojima bi se trebala razvijati klima.

Da bismo mogli govoriti o promjenama klime, moramo se prvo podsjetiti što razumijevamo pod pojmom *klima*. Prije desetak godina iskusili smo nekoliko toplih zima, a ove godine pak svježije ljeto. Ipak, to ne znači da se klima mijenja. U našim je geografskim širinama potrebno oko 30 godina motrenja i bilježenja vremena da bismo utvrdili kakva je klima na nekom području. Možemo reći da je klima prosječni tijek vremena. No, ne mogu sve ljetne ili sve zimske temperature ili godišnje količine padalina biti svake godine ujednačene. Uvijek postoje

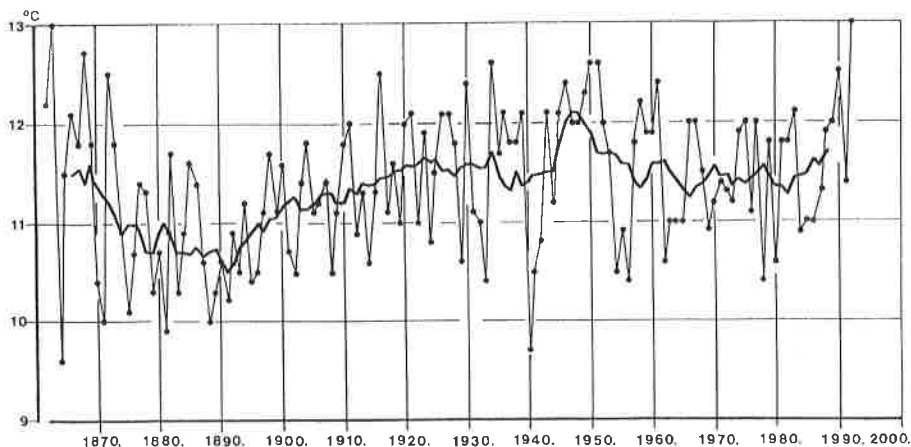
vrijednosti koje su ili više ili niže od prosječnih. Kada su ta odstupanja vrlo velika, nazivamo ih *ekstremima*. Ekstremi su također sastavni dio klime. Ako se vrijednosti nekoga klimatskog elementa od godine do godine stalno povećavaju ili smanjuju, možemo govoriti o razvoju klime.

Promjena klime je najgeneralniji termin kojim su obuhvaćeni svi oblici nepostojanosti klime, a može biti različitog trajanja i raspona.

KLIMA U INSTRUMENTALNOM RAZDOBLJU

Tendencije razvoja klime najlakše je utvrditi za ono razdoblje za koje imamo podatke izmjerene mjernim instrumentima. Nazivamo ga instrumentalnim razdobljem. Neke zemlje imaju vrlo dugačke nizove podataka. Tako najdulji neprekinuti niz podataka o temperaturi ima Nizozemska (s početka 18. st.), a nešto kraće nizove imaju Švedska, srednja Engleska i neke postaje u srednjoj Europi.

U Zagrebu se podaci bilježe od 1862. godine. Podaci o temperaturi u Zagrebu (sl. 1) pokazuju ono što vrijedi i za srednju Europu, a u



Sl. 1. Srednje godišnje temperature zraka u Zagreb-Griču i 10-godišnji pokretni srednjaci (6, 13, 14)

prosijeku i za cijelu sjevernu hemisferu. Uočava se blagi porast srednje godišnje temperature koji je počeo krajem 19. st. i trajao do 40-ih godina 20. st., a nakon toga je temperatura stagnirala. Spomenuti porast temperature bio je posljedica, prije svega, porasta zimskih temperatura. Otopljavanje 40-ih godina nije zahvatilo cijelu sjevernu hemisferu. Bilo je izrazitije u krajevima koji su pod utjecajem oceana, dok je u krajevima koji su pod utjecajem kontinenta ponegdje čak i zahladilo. Istraživanja na južnoj hemisferi pokazala su da su promjene temperature svjetski proces koji bi mogao biti u vezi s promjenom temperature svjetskog mora.

Na takvo otopljenje prvo su reagirali planinski ledenjaci. Budući da su planinski ledenjaci vrlo osjetljivi na promjene temperature, oni su na sjevernoj hemisferi već 100 godina u fazi povlačenja. Također je utvrđeno da kopni morski led u bazenu Sjevernog ledenog mora. Krajem 19. st. izmjerena je debljina leda od 3,65 m, a pred početak drugog svjetskog rata iznosila je samo 2,18 m. To je jedan od razloga porasta morske razine.

Osim temperature, uočene su i promjene u količini padalina. Količina padalina se povećala u jugoistočnoj Aziji i drugdje u umjerenim geografskim širinama, a smanjila se u subtropima i tropima Afrike, Australije, Brazila i SAD-a. Smanjenje količine padalina nije opći svjetski proces, već je ograničeno na suha područja.

Promjene klime u instrumentalnom razdoblju imale su niz ekonomskih posljedica. One su osobito teške u graničnim područjima između suhih i vlažnih klima, gdje nekoliko sušnih godina zaredom može itekako ugroziti gospodarstvo.

Temperatura mora ispred zapadne obale Grenlanda porasla se nakon 1920. godine za 1,3 °C. Tamo su Eskimi sve do početka 20. st. lovili tuljane i imali gotovo autarkičnu ekonomiju. Zbog otopljavanja klime ulov tuljana je drastično smanjen, a zamijenjen je lovom na bakalar. Zbog toga je atarkična ekonomija propala, a zamijenila ju je ekonomija

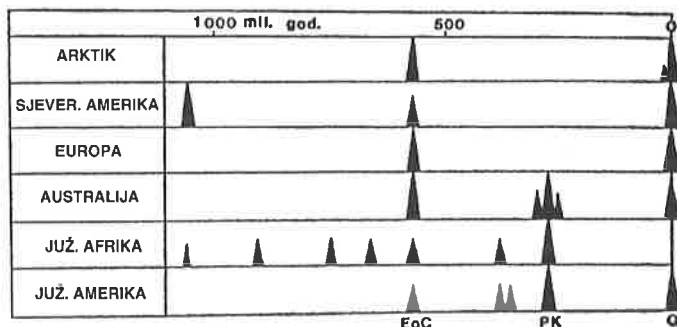
povezana sa svjetskim tržištem. Uvođenjem stalnog ribolova javila se i potreba da se izgrade stalna naselja i nabave suvremene ribarske brodice, što je još više ojačalo povezanost sa svjetskim tržištem.

Mnogobrojne se posljedice vide u višim geografskim širinama. Tako je npr. u Norveškoj granica šuma pomaknuta na veću nadmorsku visinu, a uzgoj zobi zamijenjen je uzgojem pšenice. U Finskoj je uočeno da voće ranije dozrijeva, a močvare su se isušile. Granica stalno zaleđenog tla povlači se na sjever, a razdoblje navigacije oko Svalbarda bitno je produljeno.

KLIMA U GEOLOŠKOJ PROŠLOSTI

Što idemo dalje u prošlost, podaci su sve nesigurniji i o promjenama klime govori se samo općenito. Jedan su izvor informacija fosili. Za svaku se vrstu zna živi ili ona u hladnom ili toplom okolišu, pa se prema tome može približno odrediti i kakva je bila klima: relativno topla ili relativno hladna. Mnogo se postiže i izotopskom analizom kisika. Naime, u morskoj vodi pri određenoj temperaturi postoji točno određen odnos izotopa kisika O^{18} i O^{16} . Nekađasnji omjer tih izotopa "zapisan" je u ljušturama organizama. Što ima više kisika O^{16} , to je temperatura bila viša, i obratno. Omjer izotopa kisika može se istraživati i u ledu.

Kroz cijelu geološku prošlost smjenjivala su se topla i hladna razdoblja. Topla su razdoblja trajala dulje. U hladnim su razdobljima (glacijacijama ili ledenim dobima) nastajali ledeni pokrovi. Sigurno je da su postojala tri ledena doba: prije 600 milijuna godina, prije 275



Sl. 2. Pojava glacijacija u prostoru i vremenu; EoC = eokambrij, PK = permo-karbon, Q = kvartar (12)

milijuna godina i najmlađe, u kenozoiku. Ledenih je doba bilo i ranije, ali podaci o njima nisu kompletirani. Glacijacije su mogle obuhvatiti samo jednu hemisferu, tj. nisu uvijek bile globalni proces (sl. 2). U paleozoiku je npr. sjeverna hemisfera imala toplu i vlažnu klimu, dok je južnu hemisferu pokrivaio golemi ledeni pokrov.

U ledenim dobima su postojala hladnija (glacijali) i toplija (interglacijali) razdoblja kraćeg trajanja. U interglacijalima je klima bila slična današnjoj ili čak toplija.

KENOZOJSKA GLACIJACIJA

Posljednja se glacijacija sastojala od četiri glacijala (ginc, mindel, ris, vorm). Iako se ta glacijacija često naziva pleistocenskom, taj naziv nije sasvim opravdan. Budući da je počela već u tercijaru, ispravnije bi je bilo nazvati kenozojskom.

Kao ni glacijacije prije nje, kenozojska glacijacija nije nastala naglo. Najprije je počela padati temperatura pridnene vode tropskog Pacifika, što je trajalo milijunima godina (sl. 3). Naime, na južnoj je hemisferi postojao Antarktički ledeni pokrov koji je hladio more oko sebe. Ta je hladna voda sistemom oceanske

cirkulacije dospjevala u tropske širine, a budući da je bila hladna, tonula je na dno.

Ledeni su pokrovi nakon nastanka sami pridonosili daljnjem zahlađenju klime, jer imaju veliki albedo. Time su postali važan klimatski modifikator. Ohlađivanje je bilo najjače u visokim geografskim širinama, a najvjerovatnije je počelo približavanjem Sjevernog i Južnog pola njihovu današnjem položaju.

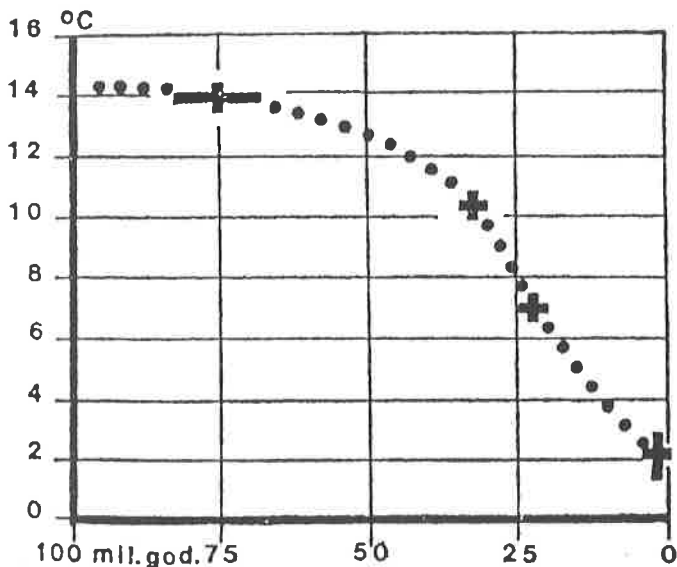
Ledeni pokrovi su počeli nastajati tamo gdje je bila najpovoljnija kombinacija niske temperature i obilnih padalina. Temperatura nije smjela biti jako niska, jer hladan zrak ima malen kapacitet za vodenu paru, a u suhom zraku ne mogu nastati padaline. Najpovoljniji uvjeti za nastanak ledenih pokrova bili su na Antarktiku i Grenlandu. Stoga su ti ledeni pokrovi najstariji. Tek poslije njihova stvaranja, nastali su ledeni pokrovi u umjerenim geografskim širinama. Međutim, ti su ledeni pokrovi najranije nestali, a ostaci Antarktičkog i Grenlandskog ledenog pokrova zadržali su se do danas.

VIRMSKI GLACIJAL

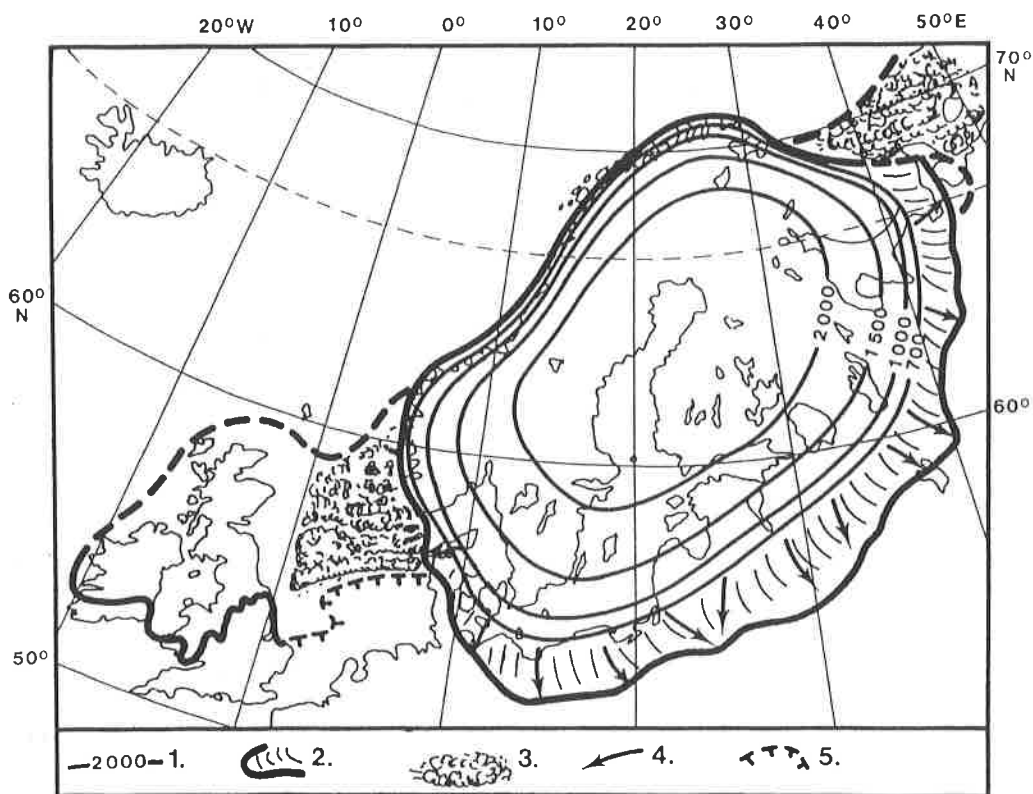
U pravilu, svaka je mlađa glacijacija u geološkoj prošlosti, kao i erozija između glacijacija, brisala tragove starije glacijacije, a svaki mlađi glacijal je uništavao tragove starijega glacijala. Zbog toga danas postoji najviše tragova najmlađega, virmskog glacijala.

Virm je počeo prije oko 70 000 godina i trajao do prije 10 000 godina. Najniža temperatura bila je prije 25 000 godina (maksimum virma). U maksimalnom razvoju ledeni pokrovi su prekrivali 26,5% kopna. Na sjevernoj hemisferi ledeni su se pokrovi širili prema jugu, tj. prema vjetrovima koji su donosili padaline.

Europski ledeni pokrov (sl. 4) imao je površinu od 4,25 milijuna km². Najbolji uvjeti za njegov nastanak bili su u Skandinaviji. Visina mu je naglo



Sl. 3. Temperatura pridnene vode u ekvatorskim širinama Tihog oceana u posljednjih 75 milijuna godina (5)



Sl. 4. Rekonstrukcija Europskog ledenog pokrova u maksimumu posljednjeg glacijala:

1. izohipse,
2. rub ledenog pokrova,
3. šelfski led,
4. smjer gibanja leda na periferiji,
5. hipotetska obala (2)

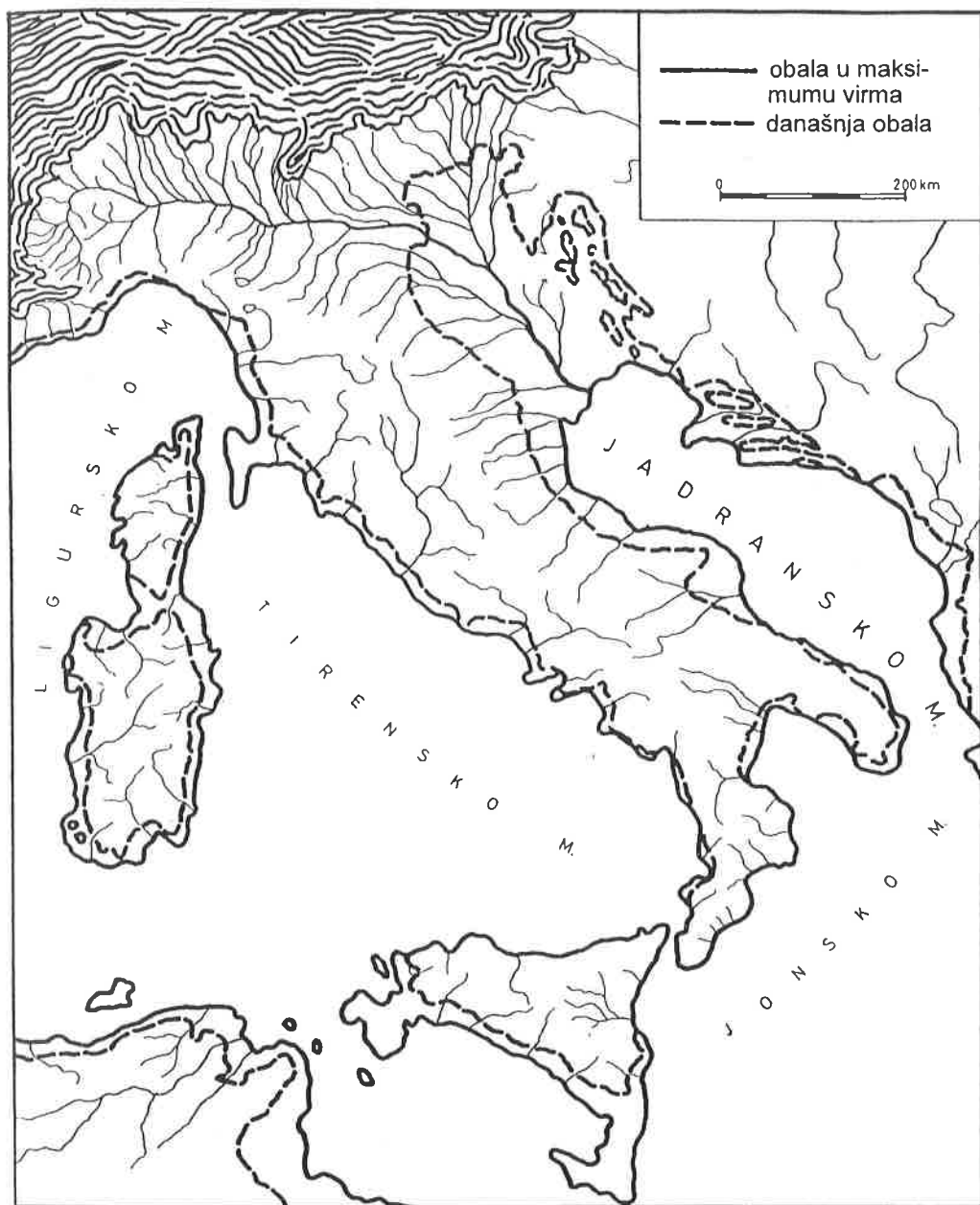
rasla od obale prema unutrašnjosti Skandinavije (to pokazuje gustoća izohipsi), a blaže je opadala prema istoku i jugu. Ledeni pokrov je rastao prema zapadu i jugu, tj. u susret toplim i vlažnim vjetrovima. Njegovo pružanje prema jugu bilo je izrazitije u Njemačkoj i Poljskoj jer je istočnije zrak bio prehladan. U maksimumu virna srednja je godišnja temperatura bila 10° - 12°C niža od današnje.

Za nastanak velikih ledenih pokrova bila je utrošena velika količina morske vode. Zato je morska razina u maksimumu virna bila oko 100 m niža od današnje, pa su paleogeografski odnosi bili sasvim drugačiji od današnjih (sl. 5). Zbog niske temperature količina padalina je bila manja nego li danas (sl. 6). To je bilo najizrazitije u višim geografskim širinama.

Količina padalina bila je najbližnja današnjoj u Južnoj Europi. Važno je, međutim, spomenuti da je među padalinama daleko najveći dio bio zastupljen snijegom.

Kao i drugi ledeni pokrovi, europski ledeni pokrov je nastao u vlažnoj i svježoj klimi, a nestao u suhoj i vrlo hladnoj. Pri kraju virna ledeni pokrov u Europi je sasvim nestao.

Zanimljivo je spomenuti kako je ledeni pokrov utjecao na raspodjelu stanovništva u pretkolumbovskoj Americi. Kad su Europljani otkrili Ameriku, najgušće su bili naseljeni pretežno zapadni krajevi kontinenta. Uzroke tome treba tražiti u doseljavanju Indijanaca (sl. 7). Danas je prihvaćena pretpostavka da su Indijanci došli iz Azije i da su u Sjevernu Ameriku stigli prije 20 000 - 25 000 godina. Pogrešno se,

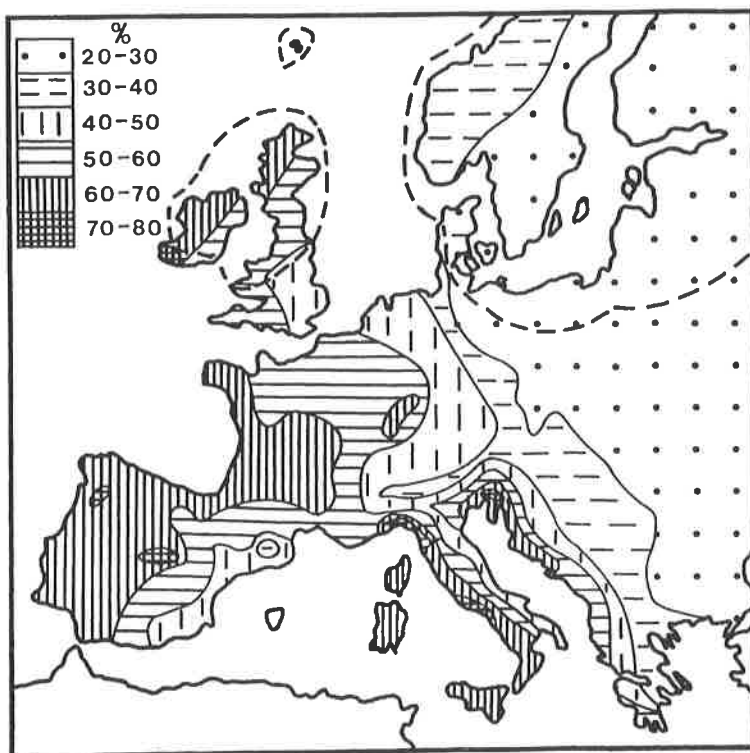


Sl. 5. Paleogeografske promjene u srednjem Mediteranu krajem pleistocena;

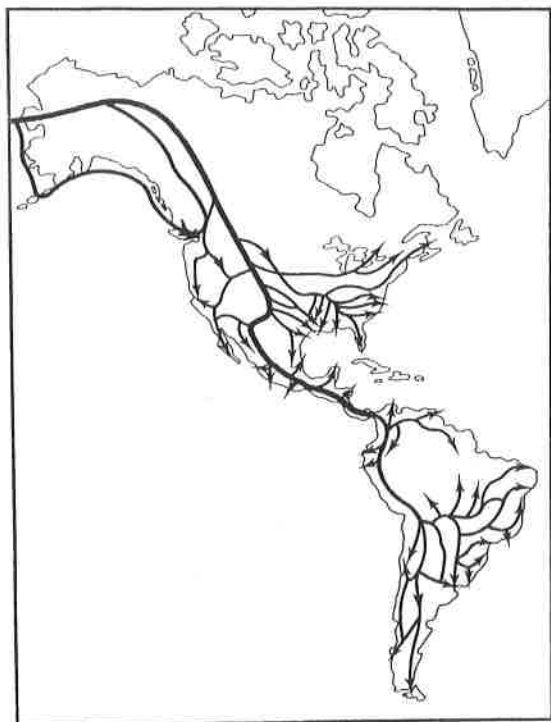
1. obala u razdoblju najnižeg položaja morske razine u posljednjem glacijalu,
2. današnja obala (1)

međutim, navodi da se njihovo naseljavanje odvijalo preko zaleđenog Beringova prolaza. Zbog niže morske razine raspodjela kopna i mora bila je drugačija od današnje, pa Beringov prolaz nije postojao ni zaleđen niti nezaleđen.

Na području na kojem se danas nalazi Beringov prolaz tada je bilo kopno. Dolaskom na američko kopno Indijanci su putovali suhom i hladnom unutrašnjošću Aljaske. Za njihovo kretanje prema jugu bila je važna činjenica da ledeni



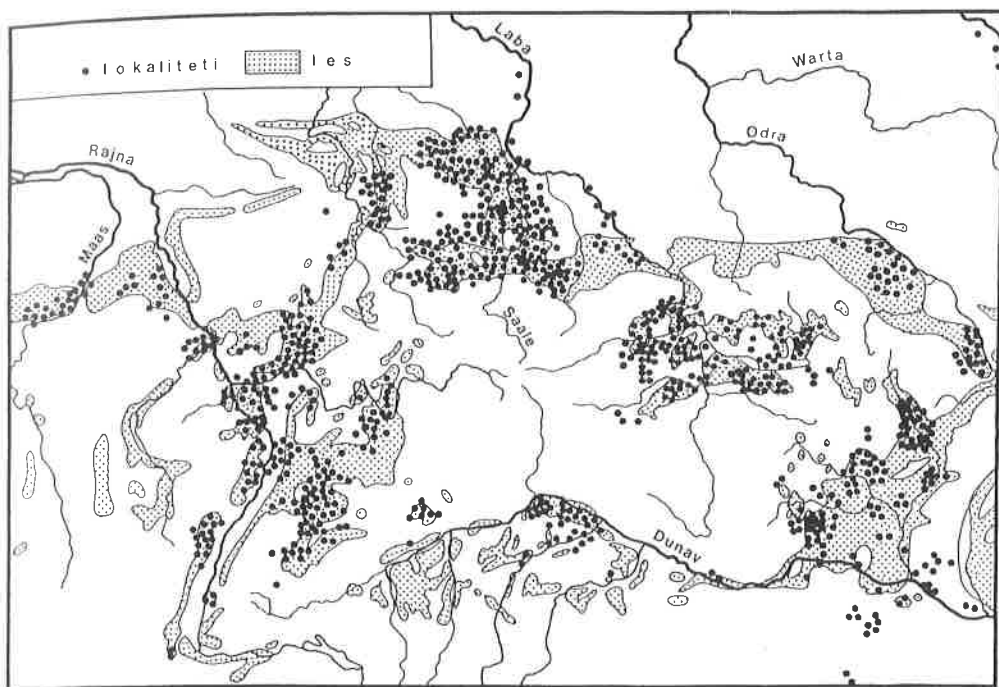
Sl. 6. Raspodjela padalina u maksimumu posljednjeg glacijala u Europi; postotak od današnje količine (7)



pokrov u Sjevernoj Americi (Laurencijski ledeni pokrov) tada nije bio spojen s ledenjacima u Kordiljerima, već je između njih postojao nezaleđeni koridor u predgorju Kordiljera. Migracijska struja razilazila se tek oko 50. paralele prema zapadu i istoku, jer se sjevernije nalazio ledeni pokrov. U južnoj Americi izbjegavana je Amazonija, a plemena koja su tamo "zalutala" ostala su na vrlo niskoj kulturnoj razini.

Posredni utjecaj ledenih pokrova na naseljenost vidljiv je i u Europi (sl. 8). Otpuhivanjem finijeg materijala u blizini ledenih pokrova nastao je "hladni les", tj. les u umjerenom, subarktičkom i arktičkom pojasu. Les u srednjoj Europi nastao je pretežno otpuhivanjem sitnih čestica preostalih u riječnim dolinama poslije poplava. Po završetku posljednjeg glacijala na njemu se razvio debeli sloj plodnog tla. Zbog

Sl. 7. Migracijski putovi u Sjevernoj i Južnoj Americi (11)



Sl. 8. Neolitska poljoprivredna središta i rasprostranjenje lesa u srednjoj Europi (4)

toga je u neolitiku razvoj poljoprivrede počeo u lesnim područjima, a to je onda izravno utjecalo na geografsku raspodjelu stanovništva i naselja.

KLIMA U HOLOCENU

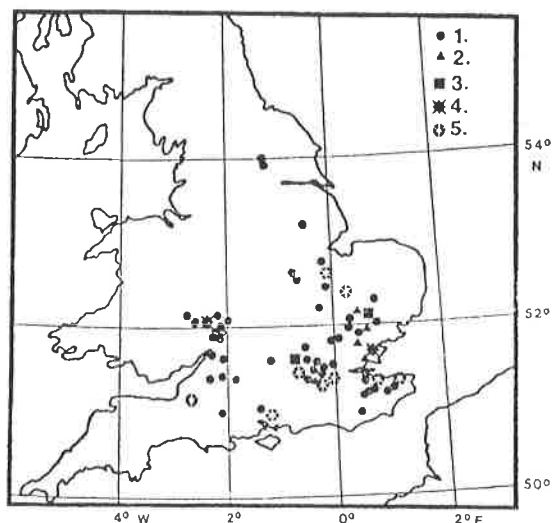
Posljednjih 10 000 godina karakterizira otopljanje klime, mada temperatura nije neprekidno rasla. Izmjenjivale su se faze s hladnijom i toplijom klimom. Prvo je do 2000 g. pr. Krista trajao porast temperature. To je bilo najizrazitije između 4000. i 2000. g. pr. Krista, pa se to razdoblje naziva *klimatskim optimumom*. Temperatura je bila 2° - 4°C viša nego li danas. Zbog toga se snježna granica nalazila oko 300 m više negoli danas, a šume su sezale daleko na sjever. U to je vrijeme u sjevernoj Africi i na Bliskom istoku klima bila vlažna, pa je tada bila naseljavana Sahara. Danas se u pustinjama mogu vidjeti zidne slike u pećinama. One prikazuju neke životinje koje su karakteristične za stepu, što dokazuje vlažniju klimu na tom području nego što je danas. Tek pri kraju klimatskog optimuma počela je aridizacija Sahare. Tada je stočari napuštaju i odlaze u dolinu Nila.

Od 2000. g. pr. Krista pa sve do 5. st. klima je bila vrlo surova, što je za neke civilizacije bilo katastrofalno. Smatra se da su teški klimatski uvjeti bili jedan od pokretača "seoba naroda".

Nakon toga je sve do 1200. g. klima bila povoljnija, pa se to razdoblje naziva *malim optimumom*. To je bio topliji period s relativno mirnim Atlantikom, što je omogućilo Vikinzima da 870. god. nasele Island, a krajem 10. st. i Grenland. Na Grenlandu su se tada gajile žitarice, a i stočarstvo je bilo vrlo razvijeno. Srednja godišnja temperatura je na južnom Grenlandu bila 2° - 4°C viša od današnje. U Norveškoj je gornja granica naselja bila za 100-200 m viša negoli danas.

Zanimljivo je da je Engleska između 800. i 1000. g. proizvodila vrlo kvalitetno vino. Vinogradi su se nalazili širom Engleske (sl. 9), što znači da nije bilo kasnih proljetnih mrazeva, da je bilo dovoljno sunca, manje kiše i da su zime bile blage. Danas više nema engleskih vinograda jer im današnja klima ne odgovara.

Usprkos općenito toploj klimi, javljali su se i klimatski ekstremi. Tako se 829. god. zaledio



Sl. 9. Vinogradi u Engleskoj koji se spominju 1000.-1300. god.: 1. površina vinograda 0,4-0,8 ha ili nepoznato, 2. 2-4 ha, 3. više od 4 ha, 4. vinogradi za koje postoje dokazi da su se obrađivali 30-100 godina, 5. vinogradi obrađivani više od 100 godina (8)

Nil kod Kaira, a zimi 801/2. i 859/60. mjestimično se zaleđio i sjeverni Jadran.

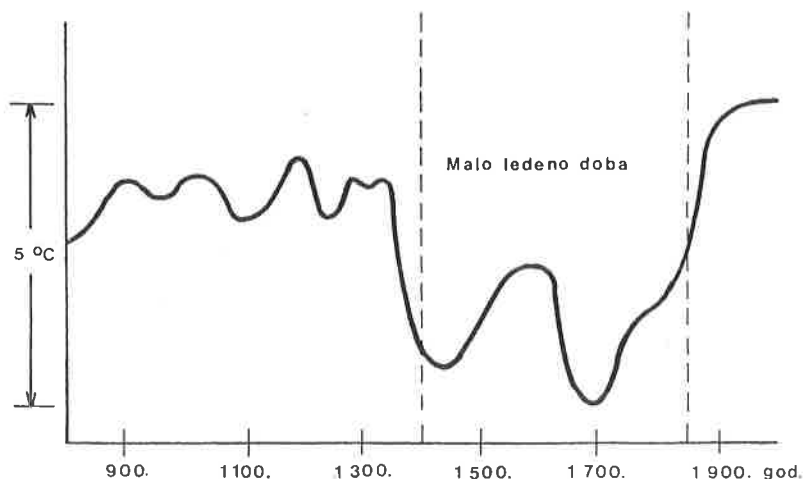
Od 1200. do 1400. godine klima je bila dosta labilna. Smjenjivale su se vrlo hladne godine s blagim zimama, poplave s katastrofalnim sušama. Otežana je komunikacija Skandinavije s Islandom, a vikinške kolonije na Grenlandu nestaju. To je bio uvod u *malo ledeno doba* koje je trajalo do 1850. godine, a najhladnije

razdoblje bilo je oko 1450. i oko 1700. godine (sl. 10). Niske temperature uzrokovala su ponovno spuštanje brojnih ledenjaka. Površina zaleđenog mora u Arktiku se proširila. Napušteni su mnogobrojni posjedi u Alpama, Norveškoj i na Islandu, gdje prestaje uzgoj žitarica. U to vrijeme nestaju i vinogradi u Engleskoj.

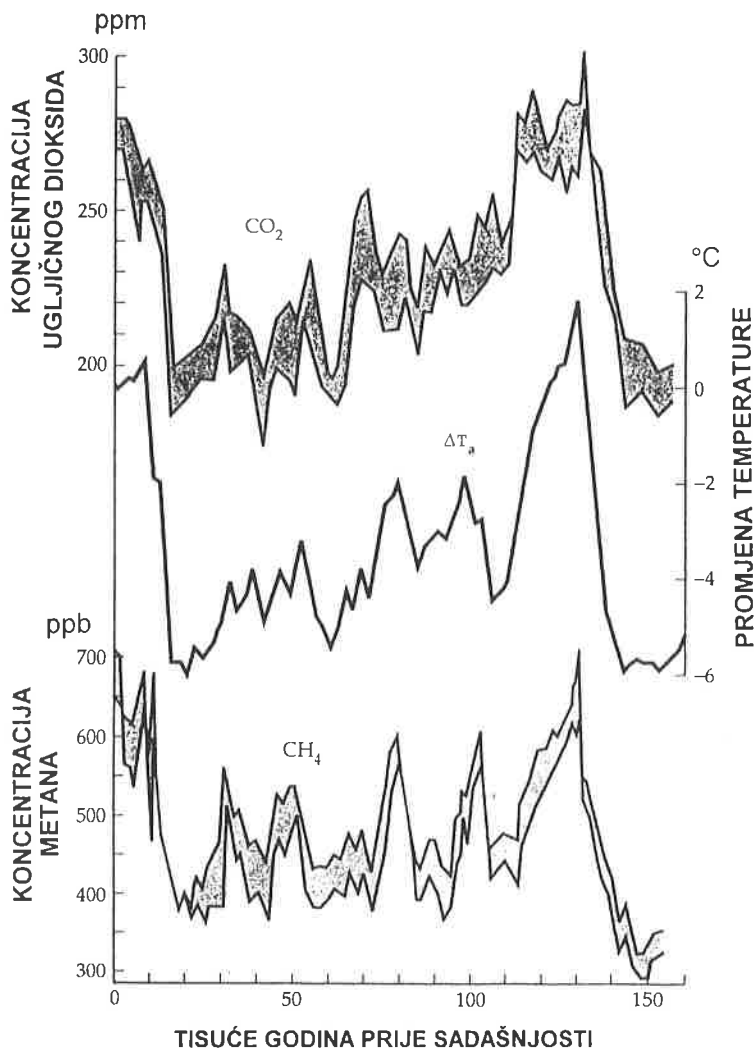
Nakon malog ledenog doba temperatura je počela rasti, što traje sve do danas, a obuhvaćeno je instrumentalnim razdobljem.

Što nas očekuje?

Od 1860. do 1994. godine srednja je godišnja temperatura porasla za 0,7 °C. Stoga se već oko 100 godina povlače planinski ledenjaci na sjevernoj hemisferi, a morski led u Sjevernom ledenom moru kopni. Danas se zna da ispuštanje CO₂ u atmosferu dovodi do porasta temperature zbog djelovanja tzv. efekta staklenika. Istovremeno, ispuštanje SO₂ ima za posljedicu pad temperature, ali se ta dva procesa ne poništavaju. Staklenički plinovi ostaju u atmosferi stotinama godina, a sumporna se kiselina vraća na Zemlju u obliku kiselih kiša, najkasnije za nekoliko mjeseci. Budući da kratko ostaju u atmosferi, kapljice sumporne kiseline ne udaljuju se mnogo od svog izvorišta, pa je njihov utjecaj ponajprije regionalan, a ne globalan. Zbog toga je konačan rezultat ipak povišenje temperature.



Sl. 10. Generalizirana krivulja temperature zraka u istočnoj Europi u posljednjih 1 000 godina (9)

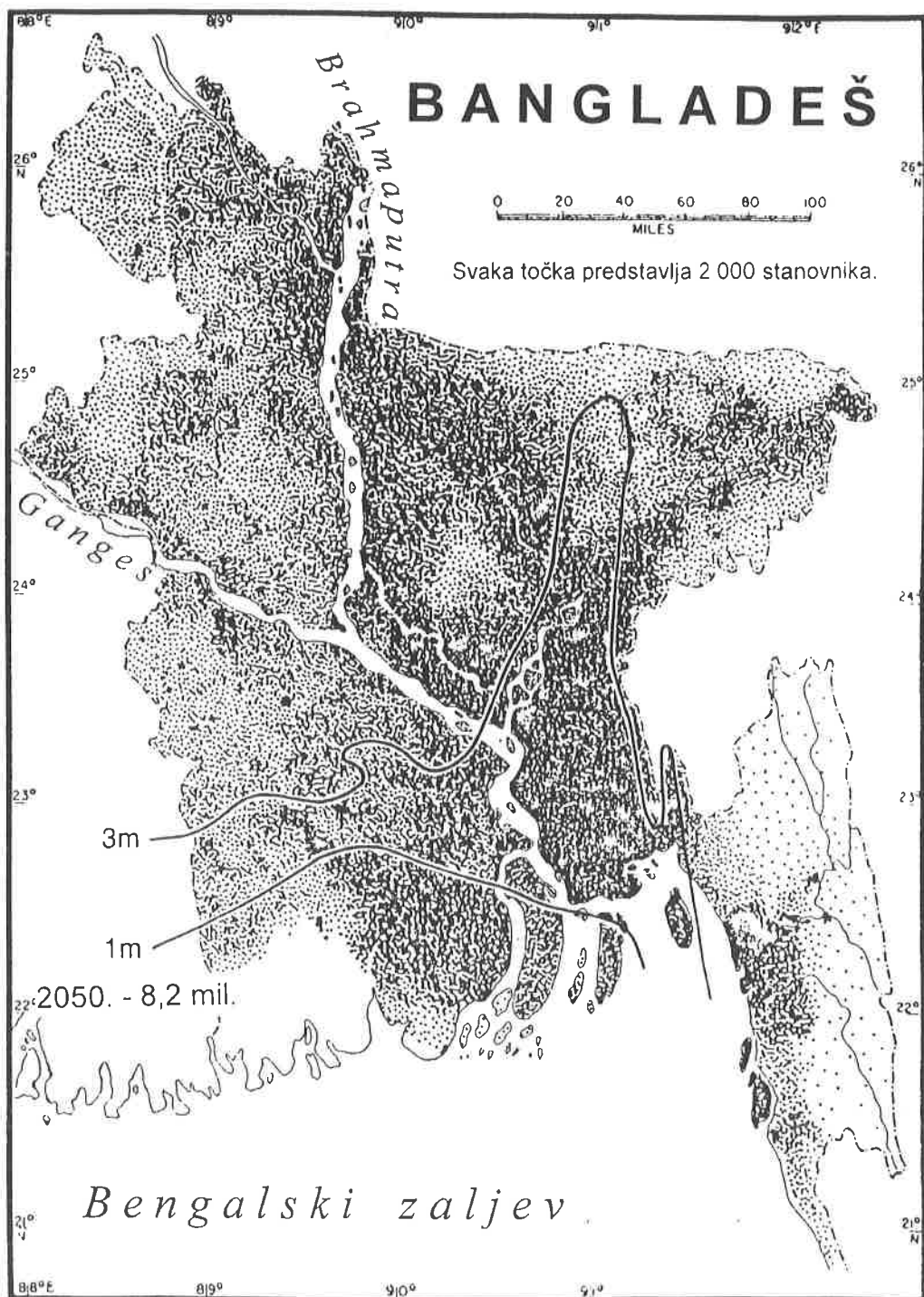


Sl. 11. Varijacije u koncentraciji metana i ugljičnog dioksida i promjena temperature nad Antarktikom (stanica Vostok) (10)

Upitno je, međutim, u kolikoj je mjeri zatopljenje posljedica porasta koncentracije stakleničkih plinova, a u kolikoj je mjeri to prirodan proces, neovisan o djelovanju čovjeka. Čovjek je, naime, sklon donostiti zaključke s gledišta trajanja svoga života, a vidjeli smo da se klima u geološkoj prošlosti mijenjala iz jednog ekstrema u drugi. Tako se mijenjala i koncentracija stakleničkih plinova u posljednjih 160 000 godina (sl. 11). Čak bismo se mogli zapitati: uzrokuje li porast CO₂ porast temperature, ili porast temperature povećava koncentraciju CO₂. Naime, pri višoj se temperaturi CO₂

otapa u moru slabije, pa je njegova koncentracija veća.

Porast temperature očekuje se i na to će uzrokovati porast razine svjetskog mora. U posljednjih 100 godina razina mora je porasla za 12 cm. Kad bi se kopnjenje leda nastavilo kao u tih 100 godina, do 2050. godine razina mora bila bi viša za 40-60 cm. a po nekim proračunima i za 100 cm. To bi bilo osobito nepovoljno za niske obale, s velikom koncentracijom stanovništva, kao što je to u Bangladešu (sl. 12). Ako bi se razina mora izdigla za 1 m, poplavila bi područje na kojemu bi 2050. godine



Sl. 12. Izohipse od 1 i 3 m, i gustoća naseljenosti u Bangladešu 2050. god. (3, izvor 15)

živjelo 8,2 mil. stanovnika. Kada bi nestao ledeni pokrov na Zapadnom Antarktiku, to bi povisilo morsku razinu za oko 6 m. Približna količina leda je i na Grenlandu, dok je na Istočnom Antarktiku još i mnogo veća. Utješnije prognoze temelje se na činjenici da je prije otprilike 5 000 godina temperatura bila viša od današnje, ali je i to bilo prehladno da bi ledeni

pokrovi okopnili. To bi značilo da ledeni pokrovi ipak neće tako brzo nestati.

Kakva nas klima očekuje u budućnosti, danas zapravo ne znamo. Postoje brojni modeli kojima se nastoje simulirati buduće promjene, ali se ne zna kolike će vrijednosti poprimiti parametri koji se koriste u tim modelima.

LITERATURA

- Atlante Fisico Economico d'Italia, Milano, 1940.
- Aseev, A.A. (1966): Opyt rekonstrukcii drevnih evropejskih lednikovyh sčitov. Doklady AN SSSR, Serija geografičeskaja 6, 14.
- Broadus, J.M. et al. (1986): Rising sea level and damming of rivers: possible effects in Egypt and Bangladesh. In: Effects of Changes in Stratospheric Ozone and Global Climate, Vol. 4: Sea Level Rise, J. G. Titus (ed.), UNEP/EPA, pp. 165-189.
- Clark, J. G. D. (1952): Prehistoric Europe. The Economic Basis. London.
- Emiliani, C. (1954): Temperatures of Pacific Bottom Waters and Polar Superficial Waters During the Tertiary. Science 119, 853.
- Juras, J. (1985): Neke karakteristike promjene klime Zagreba u posljednjem tridesetljeću. Geofizika 2, 93.
- Klein, A.-M. (1953): Die Niederschläge in Europa im Maximum der letzten Eiszeit. Versuch einer Rekonstruktion aus dem Höhenunterschied zwischen damaliger und heutiger Schneegrenzlage. Petermanns Geographische Mitteilungen 97, 98.
- Lamb, H. H. (1968): Britain 's climate in the past. The Changing Climate: selected papers by H. H. Lamb. London.
- Lamb, H. H. (1969): Climatic Fluctuations. In: H. Flohn, edit. World Survey of Climatology, Vol. 2, General Climatology, New York.
- Lorius, C. J. et al. (1990): The ice-core record: Climate sensitivity and future greenhouse warming. Nature 347, 139-145.
- Macgowan, K. (1950): Early man in the New World. New York.
- Schwarzbach, M. (1961): Das Klima der Vorzeit. Stuttgart.
- Šegota, T. (1970): Sekularne fluktuacije temperature u Zagrebu. Geografski glasnik 32, 39.
- Šegota, T., A. Filipčić (1996): Klimatologija za geografe. III. izd. Školska knjiga, Zagreb.
- Warrick, R. A., et al. (ed.) (1993): Climate and sea level change: observations, projections and implications. Cambridge University Press.