

### 3. PROMJENA KLIME

#### 3.1. FLUKTUACIJE I VARIJACIJE KLIME

Kao sve u prirodi, tako se i klima ne prekidno mijenja. U početku razvoja klimatologije uzimalo se da je klima nepromjenljiva; da bi se dobili što pouzdaniji podaci o vrijednosti klimatskih elemenata, nastojalo se produljiti motreњe na što veći broj godina. Smatralo se da je srednjak to realniji (ili, kako se još kaže, stabilniji) ako je izveden iz većeg broja godišnjih podataka. Kasnije otkriveni nesumnjivi dokazi o promjeni klime doveli su do nužne potrebe točnijeg definiranja i određivanja pojma »promjenljivost klime« jer se brzo pokazalo da je promjena klime vrlo kompleksna, da se sastoji od nekoliko procesa vrlo različitog reda veličine koji su superponirani jedni na druge. Gleđan iz te perspektive, pojam »normalna vrijednost« nekog klimatskog elementa gubi važnost, odnosno nastao je problem koja je klima »normalna«, iz kojeg razdoblja. Naime, klima najnovijeg doba, tzv. *instrumentalnog perioda*, perioda postojanja točnih meteoroloških instrumenata baždarenih po jedinstvenim međunarodnim kriterijima — što omogućuje uspoređivanje numeričkih podataka iz najrazličitijih dijelova svijeta — *nema* nikakvu povlasticu, a ni razlog da bi se smatrala »normalnom« klimom. Ona je samo jedna etapa, jedna karika u beskonačnom nizu, koja se stjecajem okolnosti (opći napredak znanosti i tehnike, primjena međunarodnog dogovora o mjerjenju meteoroloških elemenata u točno definiranim uvjetima) prvi put može registrirati. Ali, da bi se odredila tendencija razvoja neke veličine, npr. tendencija razvoja klime, potrebno je imati »čvrstu točku«, standardnu veličinu iz jednog određenog perioda (»parametar«) s kojim će se uspoređivati ostale starije i mlađe veličine, a samo se

takvim *uspoređivanjem* podataka može dokazati tendencija razvoja klime. Za standardni period preporučeno je 30-godišnje razdoblje od 1901. do 1930. god. Ako ne postoje podaci iz ovog perioda, klima jednog kraja ili mjesta definira se prosječnim stanjem klimatskih elemenata u kontinuiranom, neprekinutom nizu od 30-ak godina (kaže se da podaci moraju biti homogeni). Ako se usporede dva ili više 30-godišnjih nizova podataka (preporučuje se uspoređivanje podataka sa srednjacima iz razdoblja 1901—1930), dolazi se do veličine promjene klime najnižeg reda veličine. Ali, već smo u početku vidjeli da još nije posve jasno što je klima. Prema tome, kako se može utvrditi promjenljivost klime, kako dokazati da se ona mijenja, ako nije posve jasno što je klima. Koliko je taj problem važan, najbolje se vidi iz činjenice da se o tome raspravljalno na više međunarodnih meteoroloških kongresa, a 1960. god. u Londonu je osnovana i specijalna Radna grupa za klimatološke norme Svjetske meteorološke organizacije, čijih se prepiska još uvijek mnogi ne drže, ili se zbog nedostatka podataka ne mogu držati. Uz ostalo, pokazalo se da duljina standardnog perioda nije jednaka za sve klimatske elemente niti je jednaka u svim dijelovima svijeta. (Npr., u vlažnim tropima dovoljno je samo nekoliko godina da se dobiju reprezentativni podaci o temperaturi, a u umjerenom pojusu dalje od obale oceana potreban je mnogo dulji period.) J. M. Mitchell i suradnici (1966) predložili su slijedeće termine.

Promjena klime je najgeneralniji termin kojim se obuhvaćaju svi mogući oblici nepostojanosti klime, bez obzira na njihovu statističku prirodu (ili fizičke uvjetne). Granica koja odvaja klimatske pro-

mjene od vremenskih promjena prepostavlja se da se nalazi negdje između 5 i 11 godina.

Suvremena promjena klime je promjena klime koja je nastala u posljednjim desetljećima, ali ne prije početka 20. stoljeća.

Sekularna<sup>132</sup> promjena klime je promjena klime koja je nastala u posljednjim desetljećima ili stoljećima. Smatra se da u većem dijelu svijeta sekularni period nije počeo prije početka ili sredinom 19. st. Sekularne promjene klime su reda veličine oko 200 godina, pa se nazivaju i *promjenom klime u instrumentalnom periodu*. Kao i u svim drugim slučajevima, vremenska granica nije fiksna.

Fluktuacija<sup>133</sup> klime je nepostojanost klime koja se sastoji od bilo kakvog oblika sistematske promjene, pravilne ili nepravilne, izuzimajući trend i diskontinuitet. Karakteriziraju je barem dva maksimuma (ili dva minimuma) i jedan minimum (ili jedan maksimum), uključujući vrijednosti na krajnjim točkama promatrano perioda. Fluktuacije bi imale vrlo različit period, otprikljike od jednog stoljeća do nekoliko milijuna godina, pa postoji mogućnost interferencije više fluktuacija različitog perioda.

Ako je fluktuacija pravilna, tj. ako se varijabla pravilno mijenja između sukcesivnog maksimuma i minimuma, onda se radi o *klimatskoj oscilaciji*.<sup>134</sup>

Varijacija klime je fluktuacija, ili samo njen dio, čije je karakteristično vrijeme dovoljno dugu da se može očitovati izrazita razlika između sukcesivnih 30-godišnjih srednjaka (normi) stanovite varijalne.

Klimatski trend je promjena klime koji karakterizira blag, monotoni porast ili pad srednje vrijednosti u periodu motreњa. Ne odnosi se samo na linearnu promjenu, ali je karakteriziran samo jednim maksimumom i jednim minimumom na krajnjim točkama promatrano perioda.

Postoje i druge definicije spomenutih termina, ali i drugi termini koji se nerijetko uzimaju u različitom značenju. Često se ti termini upotrebljavaju u literaturi u slijedećem značenju (L. Lysgaard, 1949):

Klimatska varijacija je razlika između dva sukcesivna 30-godišnja srednjaka. (Npr., ako je  $\bar{T}_{1901-1930}$  srednja temperatura tog perioda, tada se varijacija temperature od 1901 do 1960. god. dobiva kao razlika  $\bar{T}_{1931-1960} - \bar{T}_{1901-1930}$ ). Ako su varijacije permanentnog karaktera, tj. ako imaju stalni predznak, pozitivan ili negativan, tada se govori o promjeni klime.

Fluktuacija klime postoji onda ako varijacija mijenja predznak.

To je, dakle, obratno od prijedloga Svjetske meteorološke organizacije 1935. god. u Warszawi da se fluktuacijom klime smatra razlika između dva 30-godišnja srednjaka. Ako ta razlika prijede izvjesnu vrijednost (»...dépasse un certain valeur...«), onda se radi o varijaciji klime. Ali, kolika je ta »izvjesna vrijednost«? U. Rüge (1965) navodi da je to standardna devijacija.

Poznati istraživač klimatskih promjena H. W. Ahlmann (1948) fluktuacijom klime smatra promjene klime najnižeg reda veličine, klimatske promjene najnovijeg datuma. Klimatske promjene u dugim vremenskim periodima, klimatske promjene višeg reda veličine on naziva varijacija klime. (U varijacije klime ide pojava glacijacija ili ledenih doba, zajedno sa smjenom glacijala i interglacijala.)

Očito je da postoji terminološki kaos. Budući da je tendencija razvoja klime vrlo kompleksan proces, fluktuacija i varijacija klime nisu i ne moraju uvijek biti procesi istog smjera. Tako npr. u periodu općeg otopljavanja klime u duljem vremenskom razdoblju može biti kratkotrajnih perioda »pogoršanja« ili perioda zahlađenja, ili obratno, u razdoblju dugotrajnog zahlađivanja klime može biti kraćih faza otopljavanja. Zato se po fragmentarnim i kratkotrajnim podacima ne smiju izvoditi dalekosežni zaključci o tendenciji razvoja klime, napose ne kad se radi o kratkoperiodičnim promjenama klime (koje čak i ne moraju biti jednake u svim dijelovima svijeta).

<sup>132</sup> lat. *saeculum* — stoljeće

<sup>133</sup> lat. *fluctuatio* — gibanje; fluktuacija je promjena veličine bez stroge periodičnosti

<sup>134</sup> lat. *oscillare* — titrati, njihatiti; osciliranje je ravnomjerno opetovanje određenog niza stanja

### 3.2. PROMJENE KLIME U INSTRUMENTALNOM PERIODU

O najnovijim promjenama klime postoje obilni podaci, ali u golemoj većini oni potječu sa sjeverne hemisfere, odnosno s još užeg područja, s teritorija razvijenih zemalja s obje strane Atlantskog oceana. Prijе nego što pokušamo objasniti mehanizam klimatskih promjena u instrumentalnom periodu, potrebno je objasniti jednu klimatološko-statističku metodu koja se mnogo upotrebljava u teoriji, to je metoda izglađivanja vremenskih nizova, odnosno izračunavanje presižućih (ili pokretnih) srednjaka. Opća je karakteristika klimatskih srednjaka velika promjenljivost iz godine u godinu (tzv. međugodišnja varijacija). S opisanom metodom nastoje se utvrditi dugoperiodičke promjene u nizu podataka, a eliminirati previše naglašena odstupanja u nekim godinama. Kako se to radi, prikazat ćemo na jednom primjeru. Ako su

$$\bar{T}_1, \bar{T}_2, \dots, \bar{T}_{k-1}, \bar{T}_k$$

srednje godišnje temperature, onda je

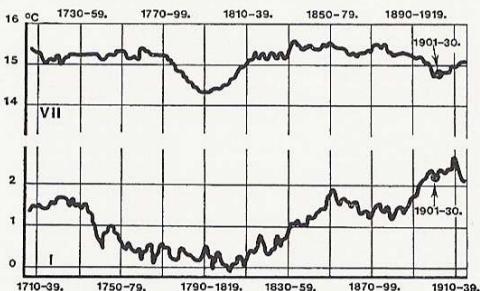
$$\bar{T}_{5-6} = \frac{1}{10} (\bar{T}_1 + \bar{T}_2 + \dots + \bar{T}_5 + \bar{T}_6)$$

$$\bar{T}_{6-7} = \frac{1}{10} (\bar{T}_2 + \bar{T}_3 + \dots + \bar{T}_{10} + \bar{T}_{11})$$

...

$$\bar{T}_{(k-5)-(k-4)} = \frac{1}{10} (\bar{T}_{k-9} + \bar{T}_{k-8} + \dots + \bar{T}_{k-1} + \bar{T}_k).$$

Tako se cijeli niz »komprimira« na onoliko godina (za polovicu s jedne i

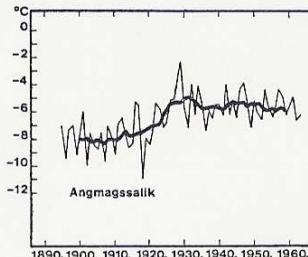


Sl. 350. 30-godišnji presežući srednjaci temperature zraka u Nizozemskoj (A. Labrijn; izvor: H. W. Ahlmann, 1948)

za polovicu s druge strane, tj. za po pet godina u gornjem slučaju) za koliko se godina izračunavaju presižući srednjaci (u gornjem slučaju 10, pa se kaže 10-godišnji presižući srednjaci). Presižući srednjaci mogu se izračunati za bilo koji broj godina (npr. 5, 10, 20, 30, 50 itd. godišnji presižući srednjaci). Tako se na grafu presižućih srednjaka lako može otkriti promjena u promatranoj klimatskoj elementu koja bi išla u red klimatskih promjena, mnogo lakše nego što se to može samo pomoći grafa godišnjih ili mješevnih vrijednosti promatranoj klimatskog elementa. Presižući srednjaci mogu se izračunati ne samo za temperaturu, nego i za bilo koji drugi klimatski element, ako postoji dovoljno dug niz motrenja, odnosno podataka.

Najdulji neprekiniti niz podataka o temperaturi potječe iz Nizozemske, gdje postoje točni, pouzdani podaci od početka 18. st. (sl. 350). Da bi se dobila što točnija slika o eventualnoj tendenciji promjene klime i o njenoj pravoj prirodi, nije dovoljno samo pratiti stoljetni niz srednjih godišnjih temperatura. Potrebno je pratiti, posebno analizirati, nizove srednjih mješevnih temperatura, napose temperature zimskih i ljetnih mjeseci, ili samo siječanj i srpanj. Siječanska temperatura opada od prve polovice 18. st. do minimuma u početku 19. st., kad je počeo porast temperature koji, po svemu sudeći, prestaje u 40-im godinama našeg stoljeća. Za graf srpanjske temperature zanimljiva je tendencija izrazitog pada temperature od početka prošlog stoljeća, dakle potpuno suprotno nego kod siječanske temperature!

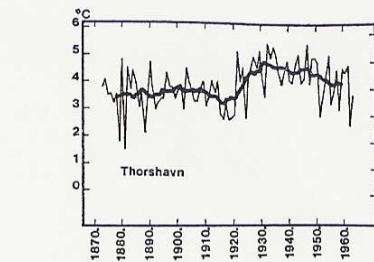
Slični su rezultati dobiveni i analizom nešto kraćih nizova temperature u Stockholmu, srednjoj Engleskoj i drugim dijelovima Europe, odnosno na čitavoj sjevernoj hemisferi. Svi oni pokazuju da je od početka ili sredine prošlog stoljeća (a negdje tek od kraja stoljeća) pa sve do drugoga svjetskog rata jasna tendencija slabog pada, stagnacije ili pak slabog porasta ljetnih temperatura, a jakog porasta zimskih temperatura, pa se u godišnjem prosjeku osjeća vrlo slaba tendencija otopljinjanja (siječanj je u Stockholmu topliji u prosjeku za 2,5°, a u Lancashireu



Sl. 351. Temperatura i 10-godišnji presižući srednjaci temperature iz razdoblja studeni-ožujak u Angmagssaliku (južni Grenland) i Thorshavn (Faererne) (G. Harris, 1964)

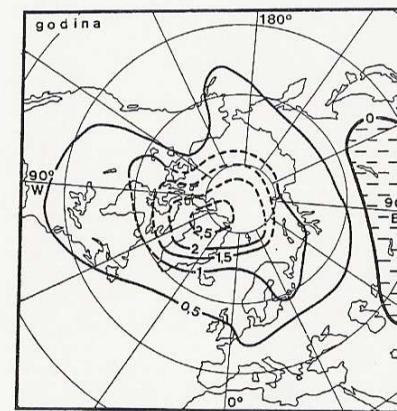
za 1,7°; srpanjske su temperature nešto pale, a srednja godišnja temperatura je za 0,3° viša u Lancashireu i za 0,5° u Stockholmumu).

Za upoznavanje prirode ovakvih podataka, odnosno za utvrđivanje tendencije razvoja klime, osobito su važni podaci iz viših geografskih širina; tako su u Oslu zimske temperature porasle za 1,9°, temperatura proljeća za 1°, a jeseni samo za 0,7°. Ljetna temperatura počela je rasti tek od početka 20. st., pa je srednja temperatura Norveške porasla za 0,6°. Porast temperature povećava se prema sjeveru, a osobito je velik na Svalbardu i Grenlandu. Srednja godišnja temperatura porasla je za 2°, a još su mnogo više porasle temperature zimskih mjeseci. Znatan dio topline troši se ljeti za kopnjene snijega



i leda, pa ljetna temperatura pokazuje tendenciju porasta tek mnogo kasnije. Od brojnih primjera uzeli smo Grenland i otoče Faererne (sl. 351), odnosno pratit ćemo 10-godišnje presižuće srednjake temperature u Angmagssaliku i Thorshavn u hladnom dijelu godine, jer su one bitno utjecale na opće otopljavanje tih krajeva. Očito je da je u oba slučaja došlo do izrazitog povišenja temperature koje je kulminiralo negdje oko 1930–1940. god., a od tog desetljeća kao da postoji tendencija stagniranja ili čak i pada zimskih temperatura.

Analizom sličnih promjena temperaturu u brojnim postajama na sjevernoj hemisferi došlo se do rezultata koji su prikazani na sl. 352. Sličan porast temperature zraka ustanavljen je u Danskoj, sje-



Sl. 352. Odstupanje srednje godišnje i srednje prosinčarske temperature 1929–1938. god. od srednjaka 1881–1898. god. (E. S. Rubinštajn; izvor: B. P. Alissow i dr., 1956)

vernem SSSR-u, na Kanadskim arktičkim otocima, čitavom sjevernom Atlantiku i sjevernom Pacifiku. Srednja godišnja temperatura je u periodu od 1929. do 1938. god. prema srednjaku od 1881. do 1938. god. porasla u bazenu sjevernog Atlantika i Sjevernog ledenog mora za 1,5—3,5° (područje maksimalnog otoplavljanja je na sjevernom Grenlandu), pa se često upotrebljava termin »otopljavanje Arktika« ili još šire »opće otopljavanje«. Mnogo je izrazitija tendencija otopljavanja u zimskim mjesecima (prosinac na sl. 352), napose u širem području Grenlanda, gdje je srednja prosinačka temperatura porasla za 4—6°. Vrlo je važno istaći činjenicu da temperatura u promatranom razdoblju *nije porasla* na čitavoj sjevernoj hemisferi. To osobito vrijedi za prosinac, pa se vidi da je u Sjevernoj Americi i središnjem dijelu euroazijskog kopna proces usmjeren u dijametralno suprotnom smjeru: u tim krajevima postoji proces *zahlađivanja* (u prosincu čak i do 2°). To znači da *ne postoji tendencija općeg otopljavanja sjeverne hemisfere*; ono je karakteristično samo za neke nijene dijelove, točnije: otopljavanje posljednjih godina prije drugoga svjetskog rata, tj. od 1929. do 1938. god. zahvatilo je pretežno krajeve pod utjecajem oceana. Dublje u kontinentima odvija se suprotan proces — *zahlađenje*.

U svjetskoj klimatološkoj literaturi (npr. H. H. Lamb, 1967) uzima se da je spomenuti »opći« porast temperature počeo oko 1840. god. (ili prije), a da je kulminacija bila oko 1940. god. (u Arktiku

1920—1940). Ni u tom slučaju, kako se pokazalo, nije ispravna tvrdnja da je taj proces otopljavanja svagdje počeo istovremeno, a ni maksimum nije postignut u istom razdoblju.

Istraživanja na južnoj hemisferi pokazala su da je otopljavanje ili zahlađenje posljednjih desetljeća svjetski proces (sl. 353), koji je sigurno u (komplikiranu) uročnoj vezi s promjenama temperature svjetskog mora. Prema stanju 1921—1930. god., u razdoblju 1931—1940. god. srednja godišnja temperatura zraka povećala se u sjevernom Pacifiku, u većem dijelu Sjeverne Amerike, u Atlantskom oceanu i u zapadnom i sjevernom dijelu Evrope, u bazenu Sjevernog ledenog mora, u Indijskom oceanu i u južnom Pacifiku. Ne postoje podaci po kojima bi se mogao izvesti zaključak o sličnim promjenama u užem području antarktičkog ledenog pokrova. Istovremeno je temperatura *pala* u Tihom oceanu između Australije i Filipina na zapadu te Srednje i Južne Amerike na istoku, u najvećem dijelu Afrike i južne Evrope, u najvećem dijelu unutrašnje Azije, te u sjeverozapadnoj Sjevernoj Americi.

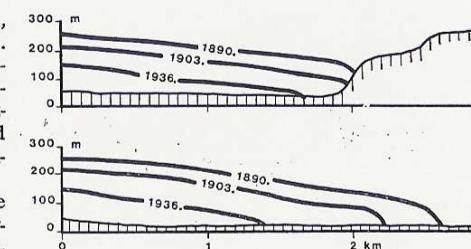
Ledenjaci su vrlo osjetljivi na promjene temperature; sistematsko ispitivanje njihovih dimenzija pokazalo je da se najveći dio ledenjaka, barem na sjevernoj hemisferi, nalazi u fazi povlačenja, koje traje već oko 100 godina (otprilike od 1850. god.). Tako se 1947—1948. god. od 262 ledenjaka u Francuskoj, Švicarskoj, Italiji, Austriji, Norveškoj i na Islandu 88% povlačilo, a samo 6,5% napredovalo. Godinu dana kasnije, 1949—1950. god., od

318 ledenjaka u Evropi 96% se povlačilo, 3,5% je napredovalo, a 0,5% je stagniralo. Nedostaju pouzdani podaci o antarktičkom ledenom pokrovu, a upravo bi oni bili najpouzdaniji za izvođenje dalekosežnih zaključaka. Uzima se da je jedan od bitnih uzroka povlačenja ledenjaka povišena ljetna temperatura.

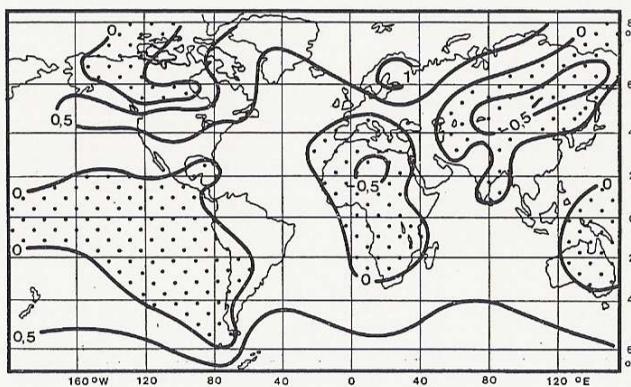
U vezi s otopljavanjem mora došlo je na sjevernoj hemisferi do kopnjenja morskog leda u bazenu Sjevernog ledenog mora; on je u periodu od 1893. do 1896. god. (Nansenova ekspedicija »Fram«) bio deblj u projektu 3,65 m, a od 1937. do 1940. god. (ekspedicija »Sedov«) samo 2,18 m, tj. debljina mu je manja za 40%. To je uzrok da su prostrani, nekad zaledeni dijelovi Sjevernog ledenog mora danas bez leda.

Na sl. 354. prikazan je profil jednog od brojnih ledenjaka koji se povlači već nekoliko desetaka godina. Na profilima se vidi ono najvažnije (a što se ne vidi na planu ili na fotografijama), a to je da ledenjaci ne samo da se povlače prema cirkovima, tj. prema svojim izvorišnim područjima, nego se bitno smanjuje i njihova debljina, odnosno volumen leda u njima. To znači da je povlačenje ledenjaka samo krajnja posljedica prije započetog procesa smanjenja volumena leda. Tako su se i duljina ledenog jezika Hoffell, kao i njegova debljina i volumen leda neprekidno smanjivali od 1890. do 1936. god. Brojna druga istraživanja utvrdila su da se smanjila količina leda i u akumulacijskom području, a ne samo da se povećala ablacija. Postoje znakovi da je to povlačenje ledenjaka na sjevernoj hemisferi u posljednjim godinama usporeno, ili pak sve više ledenjaka stagnira, a neki su se opet počeli spuštati. Povlačenje i spuštanje ledenjaka ovisi o visini snježne granice koja, osim o padalinama, ovisi i o temperaturi. Tako se snježna granica u Alpama od 1920. do 1950. god. izdigla za 90—95 m, u posljednjih 100 godina za 100—200 m, a u ekstremnim slučajevima čak za 400—500 m.

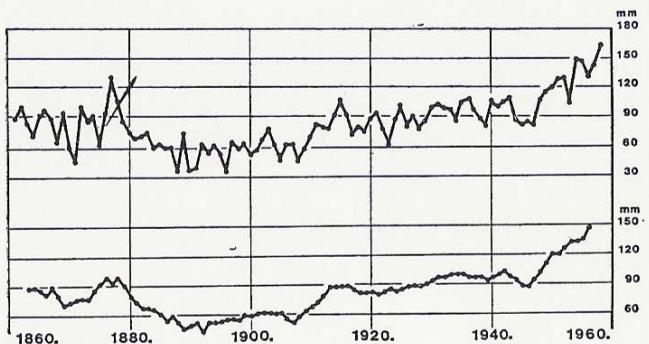
Uspoređivanjem visine razine svjetskog mora s raznih točaka svijeta u posljednjih nekoliko desetljeća pokazalo se da postoji opća tendencija porasta morske razine. Jedan od uzroka ovog procesa (začijelo glavni uzrok) može biti kopnjenje leda u vezi s porastom temperature u višim geografskim širinama, gdje se nalaze ledenjaci i ledeni pokrovi. Općenito se



Sl. 354. Dijelomični transverzalni i longitudinalni profil jednog od ledenih jezika (Hoffell) ledenjaka Vatna na Islandu (S. Thorarinsson, 1937)



Sl. 353. Odstupanje srednje godišnje temperature zraka u periodu 1931—1940. god. prema stanju 1921—1930. god.; točkicama su označena područja s padom temperature (R. Scherhag, 1950)



Sl. 355. Srednje godišnje razine svjetskog mora (gore) i 5-godišnji presjek srednjaci u posljednjih 100 godina (R. Fairbridge, 1961)

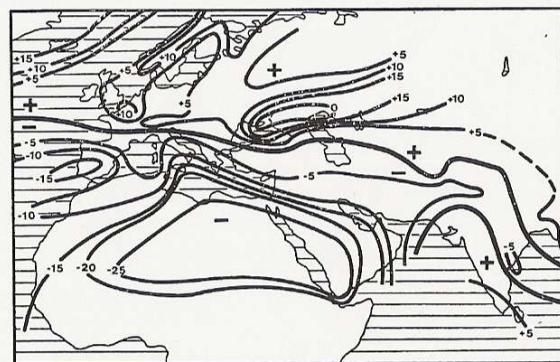
nje, dok B. Gutenberg (1941) uzima 1,1 mm godišnje.

Kao kod temperature, do sličnih je promjena došlo i u geografskoj raspodjeli padalina. Količina padalina *porasla* je u jugoistočnoj Aziji i u velikim dijelovima umjerjenih širina, zatim u nekim dijelovima Arktika, a *opala* je u subtropima i tropima Afrike, Australije, Brazila i Sjedinjenih Američkih Država. Osim velike varijabilnosti padalina u aridnim krajevima, njih karakterizira i velika anomalija, tj. veliko odstupanje padalina u jednom nizu godina uspoređenom s dugogodišnjim prosjekom. Na sl. 356. prikazana je anomalija padalina u sjevernoj Africi, jugozapadnoj Aziji i Evropi. Lijepo se vidi da je u najnovijem razdoblju, tj. od 1911. do 1940. god. u odnosu na srednjak od 1881. do 1910. god. znatno *opala* količina kiše u najvećem dijelu afro-azijskog pustinjskog pojasa (izuzetak je sovjetska srednja Azija, gdje je količina padalina *porasla*). I opet ista teškoća: najveća je anomalija upravo u krajevima s najmanjom količinom kiše, pa takve promjene količine padalina imaju izravne negativne posljedice jer smanjuju agrarnu i stočarsku proizvodnju.

Treba ipak istaći važnu činjenicu da smanjenje količine padalina nije opći svjetski proces; ono je ograničeno na suha područja, dok je suprotno tome u hu-

midnoj Evropi količina padalina *porasla*. Na Indijskom je poluotoku anomalija padalina pozitivna i negativna, ali je općenito malena. To upućuje na zaključak da je u monsunskoj Aziji ekonomski mnogo važnija varijacija padalina u sukcesivnim godinama, kao i broj i trajanje suhih i vlažnih razdoblja u toku ljetnog monsuna, nego anomalija padalina koja postoji u nešto duljim vremenskim razdobljima.

U vezi s povećanjem ili smanjenjem količine padalina je i kolebanje razine mnogih jezera. Tako je površina Kaspijskog mora poslije 1930. god. smanjena za 28 000 km<sup>2</sup>, ali je teško odvojiti utjecaj klimatskih promjena od utjecaja čovjeka koji znatno količinu vode u porječju Volge troši za navodnjavanje. Ipak, brojna



Sl. 356. Odstupanje količine padalina (u postotku od srednje godišnje količine) u razdoblju 1911–1940. god. prema godišnjem srednjaku iz razdoblja 1881–1910. god. u afro-azijskom pustinjskom pojusu i u umjerenoj pojusu u Evropi i Aziji (K. Butzer, 1957)

manja slana jezera u cijelom svijetu su isušila, a druga se smanjuju. Razina Mrtvog mora pala je sa —391 m 1897. god. na —398,83 m 1963. god.

Naglo i veliko smanjenje površine Kaspijskog mora ima izvjesne ekonomske posljedice; naime, 1/3 površine toga mora plića je od 10 m. Ribarstvo je odavno poznato, a najrazvijenije je upravo u najsevernijem, najplićem dijelu Kaspijskog mora, napose u delti Volge. Pad morske razine, odnosno smanjenje pašnjачke površine za ribu, uzrok je pada ulova ribe (na polovicu prema 1913. god.). Luka Port Iliča ne javlja se od 1951. god. na geografskim kartama. Do izvjesnih teškoća došlo je i u luci Baku, pa je izgrađen dublji Port Apšeron, a znamo da je Baku, po teretu, najveća luka SSSR-a (većinu tereta čini nafta). Znata sredstva su utrošena da se izgradi željeznička pruga od Mahač-Kale do Astrahan'a, prije svega da se olakša prijevoz nafte. Izvjesne su teškoće nastale i u Astrahanu, pa se do glavnog njegova sidrišta morao izjaružiti kanal. To isto učinjeno je i u luci Gurev. Na iste teškoće upućuje izgradnja željezničke pruge Astrahan'–Gurev, jer u »normalnim« uvjetima ne bi postojalo ekonomsko opravданje za njenu izgradnju. I u luci Krasnovodska potrebno je stalno jaruženje, dok je luka Prorva posve izgubila svoju važnost. Iako bi se dio jaruženja morao vršiti i da se morska razina ne spušta, jer neprestano raste gaz brodova, barem dio troškova treba ipak pripisati utjecaju spuštanja razine Kaspijskog mora.

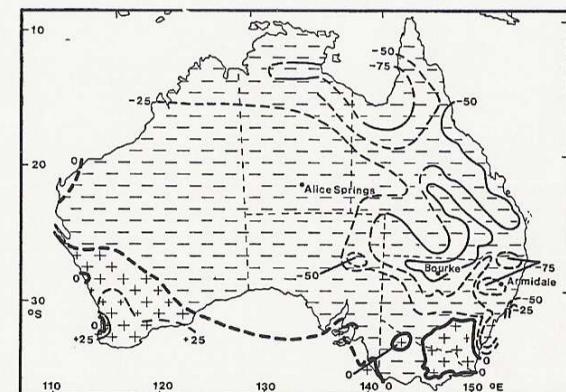
Klimatske promjene u posljednjih stotinjak godina nemaju važnost samo u teorijskim diskusijama; detaljna su istraživanja pokazala da one imaju »opipljive« ekonomske posljedice. Treba istaći da su najveće (negativne) posljedice u tzv. marginalnim područjima, u zonama na prijelazu iz humidičnih klima u aridne, ili pak na rubu područja s hladnim klimama. Upravo je klasičan primjer Australija, gdje se velika prostranstva nalaze na rubu aridne i humidične klima. Uspoređivanjem srednje količine padalina u 30-godisnjem razdoblju od 1881. do 1910. god. s 30-godišnjim razdobljem od 1911. do 1940. god. (tj.  $\bar{P}_{1881-1910} - \bar{P}_{1911-1940}$ ), pokazalo je da je srednja godišnja količina kiše *porasla* u područjima s ukupno 250 000 km<sup>2</sup>, dok se istovremeno *smanjila* u područjima s ukupno 2 500 000 km<sup>2</sup>. A sada dolazi ono najvažnije – to je prostorna diferencijacija krajeva sa smanjenom srednjom godišnjom količinom kiše, a koje je imalo sasvim različite efekte (sl. 357). Tako je smanjenje godišnje količine kiše u Bourkeu, Novi Južni Wales, za 75 mm imalo neuusporedivo veće posljedice nego npr. u Armidaleu, gdje je količina kiše smanjena također za 75 mm, ali Armidale ima svježiju ljetu i mnogo veću količinu kiše.

Tako su najozbiljnije posljedice nastale u *suhoj* unutrašnjosti Australije. Na primjer, broj goveda oko Alice Springsa pao je sa 350 000 grla 1958. god. na 165 000 grla 1964. god. (dakle, smanjenje za 185 000 grla goveda).

Taj je problem toliko važan da ćemo razmotriti još neke detalje (sl. 358). U australiskoj agrometeorološkoj praksi klimatska se regionalizacija vrši pomoću formule T. Wanga, čiji je graf hiperbola

$$r [12 r - 20 (t + 7)] = 3000.$$

$r$  = srednja mjeseca količina kiše u mm,  
 $t$  = srednja mjeseca temperatura u °C.  
 Granica između aridne i humidične klime je 3 000, a postoje različiti stupnjevi aridnosti (peraridnost, aridnost, semiaridnost)



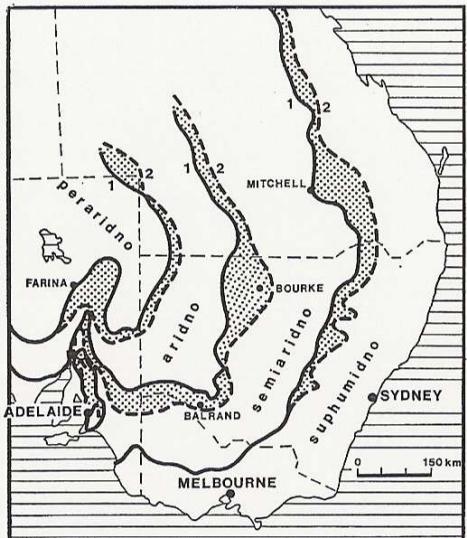
Sl. 357. Razlika između srednje godišnje količine padalina u Australiji 1881–1910. i 1911–1940. god. (mm); isprekidane izolinije su u područjima s nepotpunim podacima (J. Gentilli, 1971 a)

i humidnosti (suphumidnost, humidnost, perhumidnost, hiperhumidnost). Pozornjom analizom sl. 358. vidi se da je u ekonomski najvažnijim dijelovima Australije došlo do izrazite aridizacije klime pomicanjem granice između peraridne i aridne, zatim između aridne i semiaridne, te konačno između semiaridne i suphumidne klime. Na primjer, pojasi zapadno od Balranda i Bourke u Novom Južnom Walesu je 30 godina bio semiaridan, a u narednih 30 godina, od 1911. do 1940. god., postao je aridan, a to je silno utjecalo na raspodjelu biljnog i životinjskog svijeta. Kod naselja Mitchell (Queensland), Bourke (Novi Južni Wales) i Farina (Južna Australija) granica se pomakla čak do 100 km.

U klimatološkoj literaturi mnogo se citira primjer Grenlanda i Islanda. Poređenjem stanja u posljednjim godinama na prijelazu u 20. st. i recentnih opažanja pokazalo se da je došlo do promjene u geografskoj raspodjeli, u uvjetima razmnožavanja, u količini itd. većine životinskih vrsta koje žive u sjevernom Atlanti-

ku. Nekoliko vrsta riba koje imaju veliku ekonomsku vrijednost pomaklo je svoju sjevernu granicu areala. Na primjer, u sjeverozapadnom Atlantiku bilo je glavno ribolovno područje oko 1920. god. između 60° i 67° N, s tim da je težište bilo južnije od 65°. Pedesetih godina pomaklo se glavno ribolovno područje 300 milja sjevernije. U vodama oko Islanda pojavilo se devet novih vrsta riba, povećao se broj individua u 23 vrste, a pet vrsta ribe pomaklo je svoj areal na sjever. To vrijedi i za dvije vrste kitova.

Slične promjene, ali s još većim posljedicama, nastupile su i u vodama Grenlanda. Već smo vidjeli da je poslije 1920. god. otopljavanje klime, osobito zimi, poprimilo toliku razmjere da je to imalo i velike praktične posljedice u životu Grenlanda. Pred obalom zapadnog Grenlanda morska je voda postala toplija za 1,3°. U području Julianehåb Eskimi su sve do početka ovog stoljeća lovili tuljane i imali gotovo autarkičnu ekonomiju. Od 1910. god. počinje lov bakalara (1916. god. ulovljeno je 125 t, 1925. god. 1 000 t, a 1951. god. nešto više od 20 000 t), brancina i velike ploče, koji postaju vrlo važna hrana i izvozni proizvod! Istovremeno s otopljavanjem klime došlo je do katastrofalnog pada ulova tuljana, koji je zamijenjen lovom na bakalare. Tako dolazi do nagle preorientacije s gotovo autarkične ekonomije na ekonomiju povezanu sa svjetskim tržištem. Ta je promjena uzrokovala mnoge socijalne i kulturne probleme. Tehnika ribolova, način prehrane i tip naselja naglo su se izmijenili. Eskimi na zapadnom Grenlandu doslovno su »preko noći« od lovaca postali ribari. Nekadašnji polunomadski način lovljenja tuljana zamijenjen je stalnim ribolovom. Riba se lovi cijelu godinu, a ribari su izgradili stalna naselja i čitavu mrežu pomoćnih ribarskih postaja gdje se vrši prva faza prerade ribe, dok je u Narssau izgrađena tvornica za preradu ribe. Ali, to je samo ribolov uz obalu i u fjordovima. Preorientacija na ribolov donijela je problem uvoza sve potrebne robe, dok je prije toga ekonomija bila autarkična jer se od tuljana dobivala hrana, odjeća, materijal za gradnju čamaca (kajak), slanina, odnosno od nje dobiveno ulje za rasvjetu i grijanje. Mnogo je novaca trebalo da se kajaci zamijene suvremenim ribarskim brodicama opremljenim novom ribarskom opremom i motori-



Sl. 358. Premještanje klimatskih granica u Australiji u 60-godišnjem razdoblju: 1. položaj granice 1881—1910. god.; 2. položaj granice 1911—1940. god.; točkicama su označena područja u kojima je došlo do aridizacije klime (J. Gentilli, 1971 b).

ma, eholotima i radio-vezom.

Julianehåb je središte grenlandskog ovčarstva (27 000 ovaca od ukupno 30 000 koliko ih ima na Grenlandu). Ovčarstvo je moguće samo u manjim izoliranim područjima gdje su povoljni lokalni klimatski, edafski i vegetacijski uvjeti. Zato prevladavaju izolirani, razbacani posjedi. Gotovo bez izuzetka oni se nalaze na istim mjestima gdje su bili vikingški posjedi od 10. do 15. st. Slabljenjem lova na tuljane nestaju stara, malena, razbacana naselja lovaca na tuljane, a stanovništvo prelazi u naselja u području gajenja ovaca i ribolova.

Spomenimo još nekoliko posljedica najnovijih klimatskih promjena. U Norveškoj je pšenica zamijenila zob, a obrađeno to dobro je do granice šume, koja se istovremeno izdigla na veću nadmorskiju visinu. U Finskoj je ustanovljeno da voće ranije dozrijeva, granica areala pšenice i

raži pomakla se na sjever, a neke su se močvare isušile. Slično je utvrđeno i u Švedskoj, na Islandu i na Grenlandu. Granica stalno zaledenog tla povlači se na sjever. Period navigacije na otočju Svalbard porastao je sa 95 dana 1909—1912. god. na 175 dana 1930—1938. god. i na 203 dana 1939. god. Najnovijim klimatskim promjenama barem djelomično se pripisuje katastrofalno sušenje slavonskih nižinskih hrastovih šuma (1909—1945) na velikim prostranstvima (Z. Vajda, 1947). Klimatske promjene na prijelazu u 20. st. utjecale su na poremećaj biocenotske ravnoteže. Sve promjene koje su nastale na početku ovog stoljeća nisu izravno utjecale na sušenje naših hrastovih šuma, nego su odlučno utjecale na slabljenje biološke snage, otpornosti tih šuma, a s druge strane vrlo su povoljno djelovale na razmnožavanje i rasprostiranje insekata i gljiva koji napadaju hrastove.

### 3.3. HISTORIJSKE I HOLOCENSKE PROMJENE KLIME

Promjene klime u instrumentalnom periodu jesu posljednja, najbolje upoznata faza razvoja klime. (Iako se temperatura u nekim gradovima mjeri već nekoliko stoljeća, u prethodnom razmatranju ipak smo se ograničili na posljednjih stotinjak godina, osim primjera na sl. 350, jer se stariji termometri ne mogu usporediti s današnjima, a ni uvjeti mjerjenja, koji su danas strogo definirani, često nisu bili ispunjeni; ukratko, kaže se da mnogi nazivi nisu homogeni.) Što se više udaljujemo u prošlost, podaci su nesigurni, sve se više gube detalji, a ostaje očigledna samo opća tendencija promjene klime. Prema sadašnjem stanju znanja moglo bi se izdvojiti više faza, ali moramo imati na umu činjenicu da su se uviјek javljale izuzetno hladne zime ili vruća ljeta i suše (jedna ili više godina za redom), koje su odudarale od općeg stanja. Početak otopljavanja sredinom prošlog stoljeća (koje je kulminiralo, čini se, oko 1940. god.) možemo obratno označiti krajem jednog hladnog razdoblja koje je nazvano *malo ledeno doba* (između 1430. i 1850. god., a najhladnije je bilo oko 1550. i 1700—1850. god.) kad se u Evropi javio niz vrlo hlad-

nih zima. Brojni su se ledenjaci spustili najniže poslije posljednjeg, virmeskog glacijala, i na toj su se visini održali sve do kraja 19. st., kad su se počeli naglo povlačiti; u tom je razdoblju led zatrpan i zatvorio neke alpske prijevoje. U arktičkim krajevima veoma se proširila površina zaledenog mora (arktički polarni led). Tada su propali prvi pokušaji da se plove Sjeveroistočnim i Sjeverozapadnim prolazom. Temperatura vode sjevernog Atlantika sjeverno od 50° N bila je 1—3° niža nego danas. Veoma se povećao broj zima kada se zaledivala Temza. Brojni posjedi u Alpama, Norveškoj, na Islandu bili su napušteni. Na Islandu je savim prestalo gajenje žitarica, koje je u najskromnijim razmjerima obnovljeno tek poslije 1920. god. Na tom istom otoku tada su nestale posljednje šume, koje su se očuvale iz prijašnjih povoljnijih klimatskih razdoblja (nestanak šume treba djelomično prislati i djelovanju čovjeka). Na Islandu postoje brojni dokazi da su se ledenjaci spustili i zatrpani nekadašnje farme i naselja. U 16. st. posve nestaju vikingške kolonije na Grenlandu. Istovremeno u Engleskoj nestaju vinogradi koji su postojali

u prijašnjem topljem razdoblju. Oko 1780. god. u srednjoj Engleskoj bila je srednja siječanska temperatura oko  $2,5^{\circ}$  niža nego oko 1920. i 1930. god. U području Vivaraais kod Lyona, Francuska, berba grožđa između 1500. i 1800. god. pomakla se za 20 dana na sredinu listopada. Poznato je da je švedski kralj Karlo X zimi 1658. god. sa cijelom svojom vojskom prešao preko zaledenog Malog Belta.

Osobito su zanimljivi podaci iz naših krajeva (P. Vujević, 1931; slobodni prijevod T. Š.):  
1716. god. 13. kolovoza pao je snijeg u Bosni, koji je učinio mnogo štete na žitnim poljima.

1726. Pakrac. Snijeg je pao 7. prosinca [18. XII po novom kalendaru]... i trajao je sve do Sv. Jurja [4. svibnja].

1777. Sarajevo. 24. kolovoza pade toliko snijega da je prekrio kuće i ulice; stotinu godina ne pamti se da je palo toliko snijega.

1778. Sušak. 13. [24] ožujka godine 1778. bijaše velika suša; ni kiša ni snijeg ne pade od Sv. Ignacija [31. prosinca].

1784. Lika. Godine 1784. bijaše takva suša da se ne može ni zamisliti. Posve mašnja oskudica; ni žita, ni sijena u cijeloj zemlji ne bijaše.

1802. Kostajnica... budući da godina 1802... bijaše bez kiše, ljudi ostadoše bez ikakvih plodova.

1803. Lika. Godina 1803. bijaše neplodna. Suša i glad izmoriše sve okolne zemlje. Zemlja bijaše spaljena... Te godine mnogi pomrješe od gladi.

Zanimljiva je i jedna bilješka o vremenu koja je nađena među starim spisima u Vrbovniku (otok Krk), u dnevniku nazvana

nom Dižmar, knjizi desetine kaptola u Vrbovniku. (Opaske u zgradama dodane su razjašnjenja radi; izvor: A. Gilić, 1948.)

1620. To leto bi prestup i to leto se fortuna [oluja] od bure na dan S.tog Matija (25. februara). I učini se tolika stid (studen) zač (jer) ta stid dura veliko vreme. To isto leto biše perva sreda [korizmena] na dan 4. marta. I takva stid biše da parvi četartak korizmeni [5. marta] ja pop Matii Sparožić služeć misu od kuvenata i smarznu se S.ta karv u kaleži i vsm ostalim redovnikom ki služahu ta dan. Posahnuše... [jedna riječ nečitljiva] i vino u bačvah se smarzivaše.  
1621. na dan 26. pervara [februara] dignu se fortuna od bure. Učini se tolika stid da se vino u bačvah smarzivaše. I mnogo drivja [drveća] pozebnu...

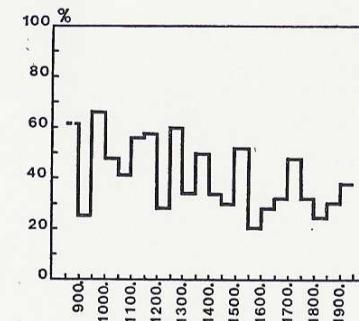
Iz ovog razdoblja postoje podaci i o promjeni razine Kaspijskog mora (sl. 359), što je posljedica klimatskih promjena, promjena temperature, padalina i evapotracije u porječju Volge i nad samim Kaspijskim morem, a sve se to svodi na promjene opće cirkulacije atmosfere u spomenutom razdoblju. Iz godine u godinu Volga donosi vrlo različite količine vode ( $155 \text{ km}^3$  1921. god. i  $379 \text{ km}^3$  1926. god.), ali to se — promatranjem sl. 359 — očito odnosi i na prijašnja razdoblja. Najviše razine Kaspijskog mora bile su oko 1660., 1780. i 1900. god., a najniže oko 1600., 1720. i 1840. god. (te oko 1960.). Nije se uspjelo utvrditi periodičnost u kolebanju; to je vrlo teško jer se uzima da postoji interferencija valova s različitim periodima. Ukratko, odnos između pretežno niske temperature u »malenom ledenu dobu« i razine Kaspijskog mora ni u kom slučaju nije jednostavan jer su se povremenojavljale izuzetno vlažne i izuzetno suhe godine ili kraća razdoblja od nekoliko godina.

Prije »malog ledene doba« (barem u Evropi) bilo je razdoblje od kojih 150 godina u prosjeku relativno viših temperaturi, koje je počelo oko 1400. god., a trajalo je do oko 1550. god.

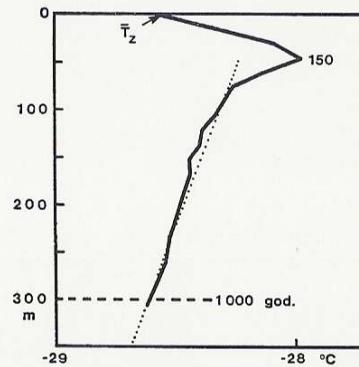
Prije toga, od 1200. do 1400. god., 200 godina bio je period izrazite labitnosti klime u Evropi, kada su se izmjenjivale brojne poplave i katastrofalne suše, vrlo hladne i vrlo blage zime. Komuniciranje između Islanda i Skandinavije bilo je vrlo

otežano, a između Skandinavije i Grenlanda praktički je posve prekinuto. U to doba posve nestaje vikinga kolonija na Grenlandu. Ali, klima nije bila neprekidno ne-povoljna. Tako je utvrđeno da je od 1128. do 1437. god. vinova loza rasla u istočnoj Pruskoj, Litvi, južnoj Norveškoj i južnoj Engleskoj, a u Schwarzwaldu (SR Njemačka) uspijevala je do visine 780 m (danas najviše do 560 m oko Bodenskog jezera u Badenu). Ipak, u cijelini to je razdoblje postupnog pogoršanja klime, pa vinova loza u Engleskoj nestaje oko 1400. god. Da je to doista tako, možemo se uvjeriti promatranjem sl. 360. Iako na vinogradarstvo utječu i socijalni faktori, ipak se uzima da je izraziti trend opadanja vinogradarstva u Badenu posljedica postupnog pogoršanja klime u ovom razdoblju i kasnije, tj. od 1300. do 1430. god. Gornja granica gajenja vinove loze u Badenu spustila se za 220 m, a od 1300. do 1500. god. gornja granica nekih vrsta drveća u Vosgesu, Schwarzwaldu i Sudetima spustila se za 100—200 m.

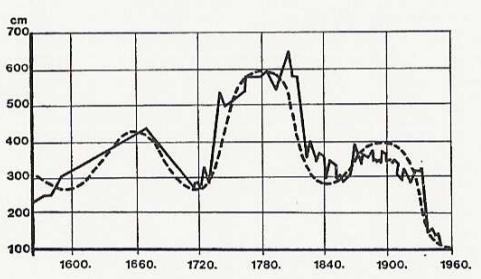
Bit će zanimljivo razmotriti i trend porasta temperature na Antarktici (sl. 361). Na apscisi se vidi da je taj porast vrlo blag. Antarktički ledeni pokrov je golem, pa otuda i njegov velik utjecaj na klimu čitave južne hemisfere. Upravo ta golemost antarktičkog ledenog pokrova upućuje na zaključak da su klimatske promjene nižeg reda veličine vjerojatno mnogo slabije izražene nego npr. u Evropi. Temperatura leda u jednoj bušotini koja je izbušena na ledenu pokrovu, gdje je on visok 1513 m, očito pokazuje trend postupnog porasta temperature, jer se uzima da temperatura leda na određenoj dubini odgovara srednjoj godišnjoj temperaturi razdoblja kad je pao snijeg (a poslije se prekrystalizirao u firm i led). Nakon postanka leda na 300 m dubine, koji je star 1000 godina, temperatura je do dubine oko 90 m (tu je led star 150 godina) porasla za  $0,45^{\circ}$ . Tako bi se moglo uzeti da je u ovom dijelu antarktičkog ledenog pokrova u posljednjih tisuću godina srednja godišnja temperatura porasla za  $0,45^{\circ}$ . (Promjena temperature u ledu vrlo je kompleksan proces jer postoji stalna kondukcija topline, a nije uvijek jasno koliko na taj proces utječe mehanizam za bušenje leda i, konačno, da li u dugim slojevima led pritiče iz hladnije unutrašnjosti. Na istoj polarnoj postaji i kasnije su vršena još dublja bušenja i



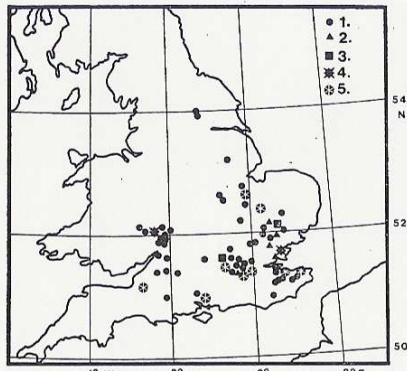
Sl. 360. Berba grožđa u Badenu, SR Njemačka, 850—1950. god.; postotak godina s dobrim urodom po 50-lijecima (K. Müller, 1953)



Sl. 361. Temperatura leda u bušotini dubokoj 300 m na Antarktici (Byrd Station,  $80^{\circ}\text{S}$  i  $120^{\circ}\text{W}$ ); točkasta crta prikazuje linearni trend temperature leda od 100 do 300 m dubine,  $\bar{T}_z$  — srednja temperatura zraka 1957 (H. Wexler, 1959)



Sl. 359. Razina Kaspijskog mora (puna krivulja) i izglađena krivulja kolebanja razine (isprekidana krivulja) (L. S. Berg, 1934 i B. A. Sljamin, 1962)



Sl. 362. Vinogradi u Engleskoj koji se spominju 1.000—1.300. god.: 1. površina vinograda 0,4—0,8 ha ili nepoznato, 2.—4 ha, 3. više od 4 ha 4. vinogradi za koje postoje dokazi da su se obradivali 30—100 godina, 5. vinogradi obradivali više od 100 godina (H. H. Lamb, 1968)

i do Sjeverne Amerike). U to su se doba na Grenlandu gajile žitarice i bilo je razvijeno stočarstvo (ovčarstvo i govedarstvo), a ledenjac na Islandu bili su vrlo maleni. Ljudi su pokapali u rahllo tlo, koje je danas stalno zaleđeno (pa bi i to bio jedan od dokaza kasnijeg zahlađenja klime). Iz toga se izvodi zaključak da je srednja godišnja temperatura na južnom Grenlandu bila 2—4° viša nego danas. Eskimi su u to doba prodrli sve do otoka Ellesmere, daleko na sjeveru u Kanadskom arktičkom arhipelagu. U srednjoj Norveškoj gornja granica naselja i krčevina te obradjenih polja bila je za 100—200 m viša nego danas. U to doba, 800—1000. god., spominju se brojni vinogradi u Engleskoj, koji su se gajili do Gloucestershirea i Herefordshirea, pa sve do Yorka (sl. 362), a za vino se tvrdilo da je po kvalitetu ravno francuskom. To bi upućivalo na 1—2° višu srednju ljetnu temperaturu nego danas, i na osobito povoljne uvjete u jeseni. Kad što je poznato, danas nema vinograda u Engleskoj, ali iz 11—14. st. postoje brojni pisani dokumenti iz kojih se mogla rekonstruirati geografska raspodjela, pa čak i veličina vinograda. U tom razdoblju englesko je vino bilo tako kvalitetno da su Francuzi u jednom mirovnom ugovoru s Engleskom zahtijevali zabranu gajjenja vinove loze (H. H. Lamb, 1968). Uspješno kultiviranje vinove loze u Engleskoj navodi na zaključak da nije

bilo kasnih proljetnih mrazova, osobito ne u doba cvata vinove loze i nešto poslije toga. Isto tako mora se zaključiti da je bilo dovoljno sunca, nešto viša temperatura ljeta i ne previše kiše u toploj dijelu godine, da je bila relativno jaka insolacija i ugodna temperatura u jesenskim mjesecima i, konačno, ne preoštire zime. Historijski podaci pokazuju da je limitirajući faktor razvoja vinogradarstva u Francuskoj i Njemačkoj, odnosno faktor koji je odredio sjevernu granicu rasprostiranja vinove loze, bila apsolutna minimalna temperatura (dugotrajni valovi hladnoće s temperaturama —20 do —25°), dok je u Engleskoj limitirajući faktor bila temperatura proljetnih mjeseci, odnosno pojava mraza u svibnju, a tek u manjoj mjeri nedovoljno topla ljeta. Raspodjela vinograda u Engleskoj, koji su se najduže održali, čini se da je prilično ovisila i o dobrom izboru parcela s dobrim tlom i najpovoljnijom insolacijskom eksponicijom.

U zapadnoj i srednjoj Evropi vinogradi su se proširili 4—5 širinskih stupnjeva sjeverije od njihove današnje granice rasprostiranja i za 100—200 m nadmorske visine više nego danas. Granica šume u Alpama i u srednjoj Evropi bila je za 70—200 m viša nego danas, a to znači da je srednja ljetna temperatura bila za oko 1° viša nego danas.

Međutim, i iz ovog razdoblja ima neочекivanih vesti o vrlo hladnim zimama. Tako se u starim kronikama navodi da se zimi 829. i 1010—1011. god. pojavit led na Nilu kod Kaira, a 801—802. i 859—960. god. mjestimično se zaledio sjeverni Jadran; 801—802. god. zaledilo se Crno more, sve njemačke rijeke, te Seine u Francuskoj; 1048. god. zaledio se Kattegat, pa su čopori vukova prešli iz Norveške u Dansku; 1070. god. Rajna je bila zaledena neprekidno od studenog do travnja.

Od 5. st. naše ere, pa sve do oko 2000 god. prije n. e. razdoblje je općenitog pogoršanja klime u poređenju s prethodnim »klimatskim optimumom«. Najteži klimatski uvjeti bili su od oko 900. do oko 450. god. prije n. e. (rano željezno doba), a klima se pogoršala do razmjera katastrofalnih za neke civilizacije, pa se općenito smatra da je to bio jedan od pokretača brojnih »seoba naroda«, od kojih je sigurno najvažniji dolazak Ahajaca iz Panonske zavale u Grčku, gdje ulaze u svjetsku povijest pod nazivom Heleni. (Sa sobom su

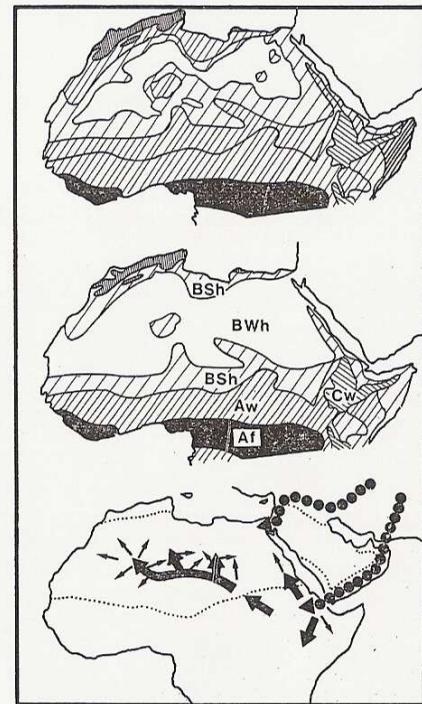
donijeli brončano i željezno oružje i oruđe koje pripada halštatskoj kulturi.) Čini se da su barem do rimske epohe Sredozemlje i susjedni krajevi bili vlažniji nego kasnije. Brojna naselja na obalama jezera u srednjoj Evropi bila su poplavljena i napuštena.

Prije ovog pogoršanja klime dugo je bilo klimatski vrlo povoljno razdoblje, za to je nazvano *klimatskim optimumom*<sup>135</sup> (ili *atlantskim klimatskim optimumom*, odnosno *atlantikom*), a trajalo je od 4000—5000. god. prije n. e. do 2000—3000. god. prije n. e.; srednje ljetne temperature na sjevernoj hemisferi bile su 2—4° više nego danas. Šuma se naglo proširila daleko na sjever Evrope. Snježna granica u srednjoj Evropi bila je za 300 m viša nego danas. Istovremeno je bio subpluvijal (5000—2400. god. prije n. e.), tj. vlažno razdoblje u sjevernoj Africi i na Bliskom istoku, koji je pogodovao naseljavanju Sahare i njenih perifernih područja. Iz tog razdoblja ostale su brojne zidne slike u pećinama po kojima se mogu rekonstruirati migracijski putovi stočara u krajevima koji su danas pustinja (sl. 363). »Doista začuduje da je najveća pustinja na svijetu u vremenu ne tako davnom... bila životno područje neočekivanog intenziteta.« S paleoklimatskim promjenama genetski su povezane izmjene faune, a to se odrazilo u zidnom slikarstvu. Iz toga se izvodi zaključak da su domaća goveda, zajedno s njihovim vlasnicima, selilačkim plemenima, od početka 6. tisućljeća prije n. e., preko Etiopskog visočja prešla daleko na zapad u unutrašnjost Sahare, koja je tada imala stepsku klimu. Oko 3000. god. prije n. e. počinje aridizacija Sahare, životni su uvjeti sve teži, stočari napuštaju Saharu, a nad plemenima koja su se doselila u dolinu Nila sve više jača autokratska vlast faraona, nastaje faraonski Egipt. Oko 3600. god. prije n. e. u Egiptu nestaju slon i žirafa, ali se slon još dugo, do rimske ere, održao u Alžiru, pa ih je Hanibal upotrijebio za opremanje svoje vojske.

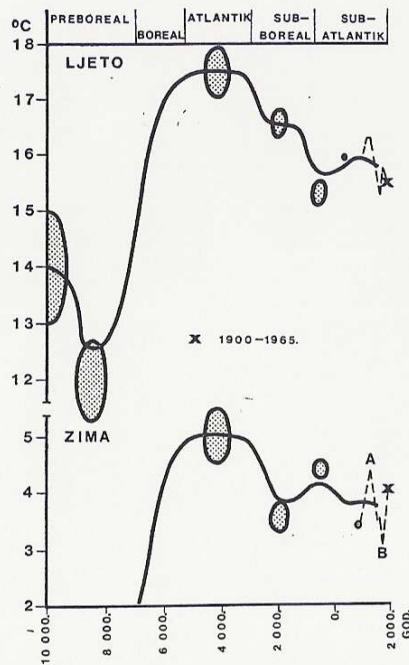
Prije klimatskog optimuma, ako se zanemare manje klimatske promjene, postojao je *opći trend porasta temperature*, praćen povlačenjem evropskog ledenog pokrova i ledenih pokrova u Sjevernoj Americi i Sibiru, te planinskih ledenjaka u Alpama, Kordiljerama itd. To je period opće deglacijacije, iako se led, razumije

<sup>135</sup> lat. superlativ od *bonus* — dobar, tj. optimum znači najbolje

se, nije svagdje kontinuirano povlačio istom brzinom. Budući da se tragovi sve više gube što se dublje ide u prošlost, i njihovo je datiranje sve nesigurnije, bez obzira na asinkronost povlačenja ledenih pokrova, može se — s obzirom na dimenzije promatranih procesa — uzeti da je *posljednji glacijal prestao prije kojih 10 000 godina*. Ako se zanemare klimatske promjene nižeg reda, može se zaključiti da je od početka holocena, prije 10 000 godina, temperatura rasla sve do maksimuma u atlantskom klimatskom optimumu, a od tada se osjeća opće zahlađenje klime. Kako je bilo s raspodjelom padalina u svakom spomenutom razdoblju, mnogo je teže govoriti, jer je geografska raspodjela padalina kompleksnija; u istom razdoblju u nekim je krajevima klima postala *vlažnija*, a u drugima *suša*.



Sl. 363. Hipotetska raspodjela klimatskih tipova u Africi u jednoj neolitskoj vlažnoj fazi (gorje) i današnja klimatska regionalizacija po W. Koppenu (sredina). Dolje: vjerojatni putovi migriranja domaćih goveda u neolitiku. (W. F. E. Resch, 1967)



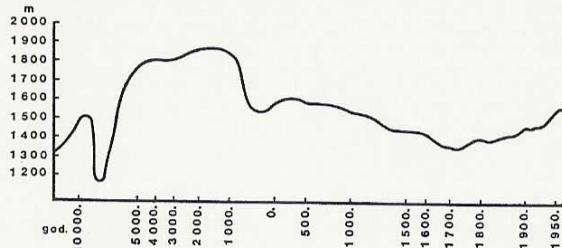
Sl. 364. Hipotetski hod temperature u ravnici srednje Engleske. Trendovi 1000-godišnjih (debeli krivulji) i 100-godišnjih srednjaka (isprekidane krivulje). Točkaste ovalne površine pokazuju granice unutar kojih su moguće greške radiokarbonskog datiranja i mogući rasponi procjene temperature. A) topla faza u ranom srednjem vijeku; B) tzv. malo ledeno doba. (H. H. Lamb i dr., 1966)

Sve spomenute klimatske promjene možemo sintetizirati s nekoliko primjera. Na sl. 364. prikazan je hipotetski hod temperature u srednjoj Engleskoj ljeti i zimi posebno. Temperaturne promjene najmlađeg razdoblja, koje su relativno lakše dostupne, imale su prilično veliku amplitudu, pa se iz tog može zaključiti da je tako sigurno bilo i u daljnjoj prošlosti, što znači da su »termogrami« iz dalmje prošlosti krajnje generalizirani, ali se ipak može izvesti opći zaključak da je za prvu polovicu holocena karakterističan trend porasta temperature, za-

tim dolazi stagnacija u atlantiku, a poslije toga osjeća se trend pada temperature, i ljetne i zimske.

Opisane promjene temperature u holocenu odrazile su se, uz ostalo, i na visini snježne granice u Norveškoj (sl. 365); treba upozoriti da podjela na apscisi nije aritmetička, pa su tako naglašene mlađe klimatske promjene, a starije su generalizirane. Iako ledenjaci i snježna granica ne reagiraju momentalno na klimatske promjene, nego postoji izvjesno »zaostajanje u fazici«, analizom sl. 365. dolazi se do već poznatog zaključka da je snježna granica u malenom ledenom dobu bila najniža u čitavom holocenu, a do te je razine pala spuštanjem s najviše razine u klimatskom optimumu. Kraći jači pad bio je između 500. god. prije n. e. i na početku naše ere. U klimatskom optimumu snježna je granica dugo bila vrlo visoka, a do te je visina došla izdizanjem od početka holocena. To holocensko izdizanje snježne granice nastavak je njenog izdizanja od maksimuma posljednjeg glacijala, ali ono nije bilo kontinuirano, nego su se izmjenjivale faze njenog izdizanja i spuštanja.

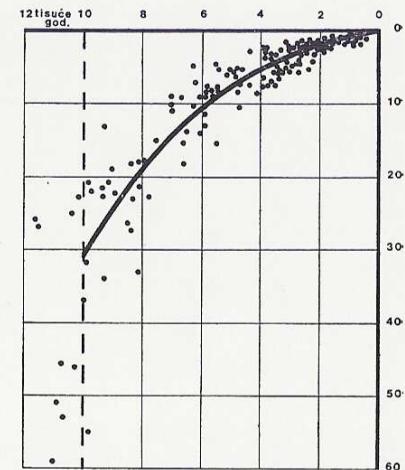
Na temperaturne promjene u holocenu upućuje konačno i izdizanje morske razine, samo je taj odnos posredan. Količina leda na Zemljiji (ledeni pokrovi na Antarktici i Grenlandu danas, a u prošlosti u Sjevernoj Americi, Aziji, Evropi; planinski ledenjaci; zaledeno more) ovisi o temperaturi zraka i morske vode, jer o njima ovisi evaporacija sa svjetskih mora i balanca leda na Zemljiji. Budući da se radi o mehanizmu planetarnih dimenzija, a trajanje pouzdanih mareografskih mjerjenja ne mogu se usporediti s promatranim razdobljem, mora se pretpostaviti da je krivulja visine razine svjetskog mora »izglađena« krivulja, tj. vjerojatno odra-



Sl. 365. Visina snježne granice u Norveškoj u posljednjih 12 000 godina (O. Liestel; izvor: M. Schwarzbach, 1961)

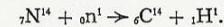
žava samo opći trend promjene klime, a malo ili nikako ne održava kratkovremene promjene s malom amplitudom. Da se visina morske razine mijenja, definitivno je utvrđeno u prošlom stoljeću proučavanjem arheoloških spomenika, odnosno građevina na obalama Sredozemnog mora. Tome su se pridružili i radovi na našoj obali. Već 1908. god. A. Gniers studijom rimske građevine na obali Istre dolazi do zaključka da se morska razina na obali zapadne Istre poslije prvih stoljeća rimske vladavine izdigla za 1,5 m, na obali istočne Istre za 1,5 do 1,75 m, a na obali južne Istre za 1,3 do 1,5 m, pa zaključuje da se u posljednjih 2000 godina morska razina izdigla za oko 2 m. Istraživanjima u ostalim dijelovima Mediterana (D. Hafemann, 1961) došlo se do zaključka da se razina Sredozemnog mora od sredine 1. tisućljeća prije n. e. do danas izdigla za 2,5 do 2,8 m. Već se u samom početku utvrdilo da izdizanje morske razine nije uniformno, tj. svako istraživanje područje daje nešto drugačiji rezultat. Tako se došlo do zaključka da se na opće izdizanje morske razine u holocenu (kasnije ćemo vidjeti da se sve to primjenjuje i na daljnju prošlost), koje je posljedica kopnjenja leda na kopnu (tzv. glacioeustatičke<sup>136</sup> promjene morske razine), superponiraju promjene u vezi s epirogenom<sup>137</sup> pokretima Zemljine kore, odnosno obale. (Naime, neki dijelovi obale mogu tonuti, ili se pak izdizati, bez obzira na glacioeustatičko gibanje morske razine; konačni rezultat u nekom istraživanom prostoru bit će zbroj ili razlika tih komponenata; samo ćemo spomenuti da to nisu jedine komponente koje utječu na visinu morske razine, ali su ipak najvažnije.)

Istraživanje položaja morske razine u holocenu mnogo je olakšano analizom organskih ostataka s morskog dna. Pri tome je potrebno utvrditi približnu dubinu na kojoj je istraživani uzorak nađen, ili ako je istraženi organizam, je li on ondje živio ili je naknadno na bilo koji način donesen iz drugog područja (sl. 366). Nakon toga određuje se starost. Za određivanje starosti upotrebljava se radiokarbonска metoda određivanja starosti uzorka. Radiokarbonsko datiranje je metoda određivanja apsolutne starosti materijala



Sl. 366. Morska razina u posljednjih 10 000 godina; svaka točka prikazuje jedan radiokarbonski uzorak (T. Segota, 1973)

koji sadržava ugljik. CO<sub>2</sub> u atmosferi sadržava osim stabilnih izotopa C<sup>12</sup> i C<sup>13</sup> također i minimalne količine radioaktivnog izotopa C<sup>14</sup>. On nastaje djelovanjem neutrona na atmosferski dušik



Iz atmosfere radioaktivni C<sup>14</sup> neprekidno prelazi direktno u biljke i indirektno u druge žive organizme, pa je i u njima minimalan dio ugljika prisutan u obliku radioaktivnog izotopa C<sup>14</sup>. Kad se smrću prekida izmjena tvari između organizma i atmosfere, organizam prestaje primati C<sup>14</sup>, ali ga ne prestaje gubiti, jer se radioaktivno raspadanje pravilno nastavlja. Ako je poznato koliko C<sup>14</sup> sadržava živa materija i kojom se brzinom C<sup>14</sup> raspada, određivanjem preostalog C<sup>14</sup> u nekom uzorku mrtve tvari može se izračunati koliko je vremena prošlo od smrti organizma. Vrijeme poluraspada C<sup>14</sup> iznosi 5 570 godina. Utvrdi li se npr. da komad drveta sadržava za polovicu manje ugljika C<sup>14</sup> nego živo stablo, proizlazi da je taj komad drveta star 5 570 godina; ako sadržava samo četvrtinu količine C<sup>14</sup> koju je imao dok je drvo bilo živo, onda je star oko 11 000 godina itd. Geiger-Müllerovim brojačem može se odrediti vrlo malena količina C<sup>14</sup>, pa to omogućuje određivanje

<sup>136</sup> glacioeustatičam — teorija da razina svjetskog mora ovisi o količini leda na kopnu

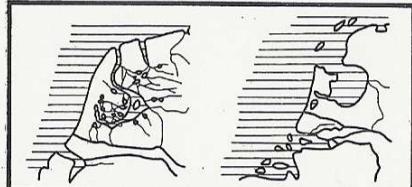
<sup>137</sup> grč. *epitro* — kopno; *genesis* — postanak; epirogeniza — dugotrajni radikalni pokreti kopnenih masa

starosti uzorka do oko 70 000 godina. Ali, potrebna je velika opreznost u radu, tj. postoje brojne mogućnosti (kontaminacija itd.) promjene stanja poslije smrti, a koje nisu rezultat samo raspadanja radioaktivnog C<sup>14</sup>.

Da bi se odredio položaj morske razine u raznim dijelovima holocena, iskorišteni su podaci od 147 radiokarbonbskih uzoraka iz cijelog svijeta (svaka točka na sl. 366. prikazuje starost i dubinu uzorka). Kad postoje ovakvi podaci, odnosno empiričke točke, onda se metodom sume najmanjih kvadrata izračuna krivulja za koju smatramo da će se najbolje prilagoditi empiričkim točkama. U spomenutom radu izabrana je parabola koja se, već na prvi pogled, dobro prilagođava empiričkim točkama. Tako se došlo do rezultata da je morska razina prije 2 000 godina bila za 1,91 m, niža od današnje, a prije 10 000 godina bila je 31 m niža nego danas. To se dobro slaže s većinom drugih procjena položaja morske razine u spomenutim godinama. Iz metodologije izračunavanja proizlazi činjenica da krivulja prikazuje samo generalni trend izdizanja morske razine, a ne i povremena njezina manja izdizanja i spuštanja (ako ih je bilo). Dakle, *opće izdizanje morske razine u posljednjih 10 000 godina u biti se slaže s općim porastom temperature u holocenu*. Je li morska razina u klimatskom optimumu bila nešto viša nego danas, nije pouzdano utvrđeno, ali ima istraživača koji su skloni tom mišljenju. Možemo još samo spomenuti detalj da brzina izdizanja morske razine nije bila ista u cijelom holocenu, tj. trend nije linearan nego parabolican; izdizanje morske razine bilo je brže u prvom dijelu holocena, a sve sporije što smo bliže današnjicima. Ako je sve to točno, iz grafa se može zaključiti da se i u narednim stoljećima može očekivati daljnje iz-

dizanje morske razine (doduše, sve sporije).

Iako je izdizanje morske razine relativno vrlo spor proces (kad se usporedi s trajanjem ljudskog vijeka), ipak se ne smatra posve teorijskim problemom, jer u nekim dijelovima svijeta sve to može imati i te kako važne praktične posljedice. Svakako, prije svega misli se na niske obale. Jedan je takav primjer prikazan na sl. 367. Poznato je da je polovica Nizozemske ispod morske razine, i sve bi to bilo preplavljenje da čovjek nije izgradio čitav sistem brana, nasipa i kanala. (Zato postoji i posebno ministarstvo za obranu od vode, Ministerium van Waterstaat). U rimsko doba kopno je u Nizozemskoj bilo znatno prostranije nego danas. Postupno izdizanje morske razine (plus tonjenje delte Rijne) uzrok je povlačenja obale prema unutrašnjosti. Tako je poslije 1 500 god. more preplavilo 500 000 ha zemljišta, pa je već u 18. st. postojao veliki zaljev Zuidersee, a more je prodrlo u kopno i u drugim dijelovima te zemlje. Međutim, povijest Nizozemske doista je povijest borbe čovjeka i kopna s jedne strane i mora s druge strane, a vodi se već nekoliko stoljeća. Prvi su rezultati postignuti poslije 17. st., tako da se već 1800. god. naziru znatne promjene u odnosu kopna i mora. Sistemom poldera more se potiskuje, a na njegovu mjestu ostaju obrađene površine. Zanimljivo je podsjetiti da se u borbi protiv vode mnogo iskoristavao jedan klimatski element — vjetar. Biće su izgrađene brojne vjetrenjače (važan element nizozemskog pejzaža), koje su se upotrebljavale za crpenje vode iz nasipa i za prebacivanje kanalima u more. Borba s morem je dugotrajna, sistematska i neprekidna, a osobito velike teškoće nastaju kad do obale dođu izuzetno duboke ciklone s orkanskim vjetrovima i visokim valovima koji nerijetko znaju probiti nasipe, pa morska voda preplavi mnoge poldere. Tako je do sada bilo više katastrofalnih poplava; samo 1953. god. poginulo je i utopilo se 1700 osoba, 500 000 osoba ostalo je bez doma, a učinjene su bile goleme materijalne štete. Borba protiv mora ne iscrpljuje se samo u mehaničkoj zaštiti od njega. Ne manji je problem salinizacija obradiva tla, kao i to kako slatku vodu brojnih rijeka odvesti u more. Nije jednostavan ni problem zaštite podzemnih voda od zaslanjivanja, jer se one troše za piće i u tehničke svrhe.



Sl. 367. Lijevo: Nizozemska u rimskoj epohi; desno: Nizozemska u 17. st. (M. Senger, 1957)

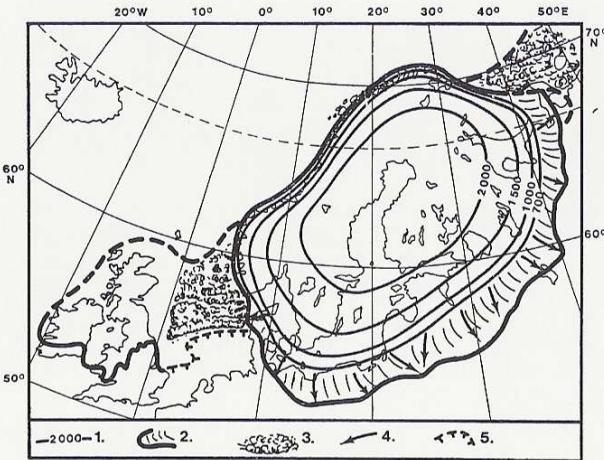
### 3.4. KLIMA POSLJEDNJEG GLACIJALA

Ako se zanemare povremena, relativno kraća zahlađenja i nešto jača, ali isto kratkotrajna otopljavača, razdoblje od posljednjih 10 000 godina (tj. period poslije nestanka golemih ledenih pokrova u umjerenim geografskim širinama na sjevernoj hemisferi) karakterizira progresivno »poboljšanje«, otopljavačanje klime. Nestanak ledenih pokrova (osim na Grenlandu) omogućio je relativno nagli porast temperature, koji je kulminirao u post-virmskom klimatskom optimumu. Budući da je posljednji glacijal tek »nedavno« prestao, prije samo 10 000 godina, do danas su se očuvali brojni tragovi njegova postojanja po kojima se, s priličnom sigurnošću, može rekonstruirati tok klimatskih promjena u posljednjem hladnom razdoblju kvartarne ili pleistocene (ili, možda najbolje, kenczojske) glacijacije. U toku kvartarne glacijacije ledeni pokrovi na sjevernoj hemisferi nekoliko su puta nastajali i nestajali, pa se može uzeti da se upoznavanjem mehanizma postanka, razvoja i nestanka ledenih pokrova u posljednjem glacijalu u biti otkrivanju slični procesi i u starijim glacijalima.

»Pogoršanje« klime, tj. prije svega postupni pad temperature koji je konačno uzrokovao stvaranje golemih ledenih pokrova u Sjevernoj Americi (Laurentijski ili sjevernoamerički ledeni pokrov), sjevernoj Evropi (evropski ledeni pokrov, sjevernoevropski ili skandinavski ledeni pokrov), Aziji (sibirski ledeni pokrov) i povećanje grenlandskeg ledenog pokrova (grenlandski ledeni pokrov, čini se, bio je učlavnom očuvan i u posljednjem interglacijalu, kao što je i danas, nasuprot ledenim pokrovima na spomenutim kontinentima koji su krajem posljednjeg glacijala potpuno nestali), počeo je, čini se, prije 70 000 godina. Zahlađenje je nastupilo postupno, a prije nekih 70 000 godina konačno su nastali optimalni uvjeti za ekspanziju ledenih pokrova, koji su na svim kontinentima sjeverne hemisfere nastali u »isto« vrijeme. Budući da su padaline, uglavnom snijeg, donosili vjetrovi s juga, ledeni pokrovi na sjevernoj hemisferi širili su se prema jugu (prema jugu u Sjevernoj Americi, prema jugu i zapadu u Evropi), *u susret vjetrovima koji su donosili padaline*. Ekvatorska granica ledenih pokrova bila je određena padalinama i temperatu-

rom ljetnih mjeseci, tj. ovisila je o odnosu akumulacije i ablacija, pa je tako bila određena najjužnija granica njihova prostornog razvoja. Prema tome, posljednji glacijal, virm ili virmski glacijal u Evropi (Würm) počeo je prije 70 000 godina, prestao prije 10 000 godina, trajao je, dakle, oko 60 000 godina. U momentu maksimalnog površinskog razvoja, u posljednjem glacijalu, sjevernoamerički ledeni pokrov imao je površinu (R. F. Flint, 1971) 12,5 mil. km<sup>2</sup>, evropski ledeni pokrov 4,2 mil. km<sup>2</sup>, sibirski ledeni pokrov 2,16 mil. km<sup>2</sup> i grenlandski ledeni pokrov 2,1 mil. km<sup>2</sup>. Zajedno s brojnim odvojenim zaledenim područjima u planinama i na otocima, na sjevernoj je hemisferi bilo zaledeno 26,78 mil. km<sup>2</sup>, ali tome treba dodati i nekoliko milijuna kvadratnih kilometara zaledenog Sjevernog ledenog mora i sjevernog Atlantika. Zajedno s antarktičkim ledenim pokrovom led je prekriuo 40 mil. km<sup>2</sup>, tj. 26,5% površine kopna.

Da bismo što bolje razumjeli o kakvim se procesima radi, prikazat ćemo kako je (vjerojatno) izgledao evropski ledeni pokrov u maksimalnoj fazi svoga površinskog razvoja u posljednjem glacijalu (sl. 368). Očito je da su najpovoljniji uvjeti, optimalna relacija između padalina i temperature, bili na Skandinavskom poluotoku, pa je u »zavjetrinu« najvišeg dijela Skandinavije (unutar izohipse od 2 000 m) ledeni pokrov bio relativno ravan (maksimalna debљina leda procjenjuje se na 2 650–3 750 m, odnosno A. A. Asse užima 2 500 m). Po gustoći izohipsa lako se može zamisliti profil evropskog ledenog pokrova. Njegova je visina naglo rasla od obale prema unutrašnjosti Skandinavskog poluotoka (debљina ledenog pokrova u Velikoj Britaniji nije bila velika), a relativno je mnogo blaže visina opadala prema istoku i jugu. Vodenu para dolazila je sa zapada i juga, pa je i ledeni pokrov rastao u tom smjeru, *u susret toplim vjetrovima koji su donosili vodenu paru*. Dokle će dospijeti rub ledenog pokrova, ovisilo je o vrlo delikatnoj ravnoteži između utjecaja temperature ljetnih mjeseci i količine zimskih padalina. Već na ovom primjeru možemo upozoriti na često isticani prividni paradoks da je evropski ledeni pokrov prodirao dalje na jug u Njemačkoj i Poljskoj, dok je u vrlo hladnoj is-



Sl. 368. Rekonstrukcija evropskog ledenog pokrova u maksimumu posljednjeg glacijala: 1. izohipse (m), 2. rub ledenog pokrova, 3. šelfski led, 4. smjer gibanja leda na periferiji i 5. hipotetska obala (A. A. Aseev, 1966)

točnoj Evropi i današnjem sjevernom dijelu evropskog SSSR-a njegova granica naglo skretala na sjever. To je jedan od brojnih primjera da preniska temperatura može biti limitirajući faktor razvoja ledenog pokrova, jer s preniskom temperaturom dolazi drugi limitirajući faktor, premalena količina snijega. Zato je evropski ledeni pokrov najjužnije prodirao ondje gdje temperatura nije bila ispod donje granice optimuma, a padalina je bilo dovoljno, jer je blizu bio glavni izvor vlaže, Atlantik i Mediteran. Približavanjem Atlantskom oceanu temperatura je toliko porasla da je postala limitirajući faktor razvoja ledenog pokrova, ali ovaj put iznad granice optimuma. Ablacija je bila prejaka da bi ledeni pokrov prodirao daleje na jug. Tako se uzdužna os evropskog ledenog pokrova pružala od jugozapada prema sjeveroistoku, tj. paralelno s općim pružanjem obale Atlantika, odnosno u skladu s raspodjelom kopna i mora. Gibanje leda, po analogiji s današnjim antarktičkim ledenim pokrovom i po brojnim posrednim tragovima očuvanim u današnjem reljefu, zaključuje se da je bilo najintenzivnije na periferiji ledenog pokrova, gdje je nagib ledenog pokrova bio relativno strm. Tako je uz periferiju ledenog pokrova nastala golema masa rastresitog, akumulacijskog materijala i

niz glacijalnih i periglacijalnih<sup>138</sup> reljefnih oblika.

Dok je evropski ledeni pokrov, kao i drugi ledeni pokrovi u umjerenim geografskim širinama na sjevernoj hemisferi, posve nestao pri kraju posljednjeg glacijala, antarktički ledeni pokrov u biti je sačuvalo svoje dimenzije sve do danas. Svi istraživači Antarktike bez izuzetka se slazu u mišljenju da je antarktički ledeni pokrov danas gotovo isti kao i u posljednjem glacijalu. Zato smo na sl. 369. dali hipsometrijsku kartu današnjeg antarktičkog ledenog pokrova.

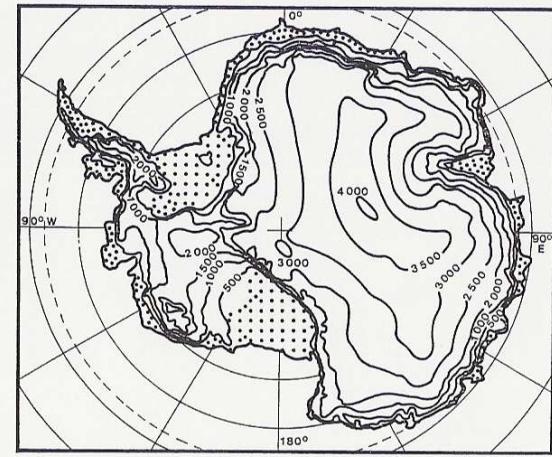
On ima oko 14 mil. km<sup>2</sup>, a samo nešto manje od 3% kopna nije prekriveno ledom. Prema tome, Antarktika je doista »ledeni kontinent«. Iz raspodjele izohipsa vidi se da je Antarktika podijeljena na dva dijela: a) na Zapadnu Antarktiku (koja je u geotektonskom smislu nastavak Anda iz Južne Amerike) i b) na Istočnu Antarktiku (prostrani kontinentalski blok, vjerojatno dio strog prakontinenta Gondvane). Iako je Antarktika u poređenju s drugim kontinentima (osim s Australijom) vrlo pravilna, gotovo kružna, postojanje Rossova i Weddella mora, koja se veoma približuju jedno drugome, nije omogućilo postanak posve pravilnog, kružnog ledenog pokrova. (Kako bi izgledao ledeni pokrov na posve pravilnom kontinentu, može se zaključiti po Istočnoj Antarktici.)

Pozornjom analizom sl. 369. lijepo se vidi da visina antarktičkog ledenog pokrova raste od obale prema unutrašnjosti, ali ne jednoliko, nego bi idealan presjek bila poluelipsa. To znači da se visina antarktičkog ledenog pokrova naglo povećava od obale prema unutrašnjosti, a to se odražava u gustoći izohipsa u širem obalnom pojusu. Dublje u unutrašnjosti izohipse su

<sup>138</sup> grč. *peri* — oko; lat. *glacies* — led; reljefni oblici koji nastaju u pojusu oko nekadašnjih ili današnjih ledenih pokrova i ledenjaka

sve rjeđe, tako da je centralni dio Istočne Antarktike relativno zaravnjen. Budući da se Južni pol ne nalazi u geometrijskom središtu Antarktike, najveća visina nije u području Južnog pola, nego se nalazi dalje od njega, između 30. i 80. meridiana (30° i 80° E). Ondje se nalazi vrlo niska kupola unutar izohipse od 3 500 m. Koliko opće konture ledenog pokrova ipak ovise o reljefu ispod leda, vidi se po tome što svaka more ili zaljev potiskuju izohipse prema polu, a polutoci prema sjeveru. Opisani profil antarktičkog ledenog pokrova tako se može protumačiti već upoznatom raspodjelom padalina (odnosno snijega). Količina padalina naglo opada prema unutrašnjosti ledenog pokrova; u tome se — osim utjecaja preniske temperature u unutrašnjosti ovog kontinenta — očituje u orografskom efektu, tj. antarktički ledeni pokrov je golema reljefna barijera koja čini velike teškoće prodiranju ciklona u unutrašnjost, a s druge strane, na strmoj se periferiji »ispada« najveći dio snijega, pa u unutrašnjosti padne vrlo malo padalina. Srednja visina antarktičkog ledenog pokrova iznosi 2 400 m, a najveća visina nešto malo više od 4 000 m. Srednja debljina leda iznosi oko 2 000 m, a maksimalna debljina 4 250 m. Prema tome (W. Schwerdtfeger, 1970), 55% površine Antarktike više je od 2 000 m, a 25% više od 3 000 m. Volumen leda na Antarktici procjenjuje se na 24 mil. km<sup>3</sup>. (Kad bi okopnjo sav taj led, morska bi razina — ako se ne uzmu u obzir neki drugi procesi koji bi eventualno djelovali u suprotnom smjeru — izdigla za oko 54 m! Tako bi bilo potopljeno oko 4 mil. km<sup>2</sup> kopna na kojem danas živi golem broj ljudi.)

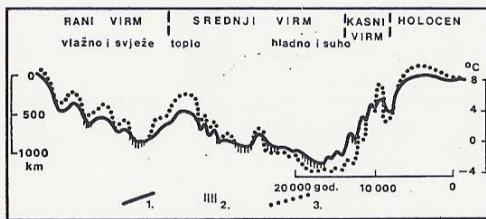
Kad je evropski ledeni pokrov već nastao, on je postao geografska realnost i *klimatski modifikator* vrlo velikih dimenzija. Iako su teškoće goleme, po indirektnim posljedicama ipak se može rekonstruirati raspodjela temperature u fazi maksimalnog razvoja evropskog ledenog pokrova. Novija su istraživanja pokazala da je u fazi najjačeg zahlađenja srednja godišnja temperatura bila 10—12° niža ne-



Sl. 369. Visina antarktičkog ledenog pokrova (K. K. Markov i dr., 1968)

go danas, ali ipak postoji jasna geografska diferencijacija; temperatura je najviše palila u umjerenom pojasu (neposredno uz rub ledenih pokrova, a znatno manje u tropima, više u unutrašnjosti kopna nego nad oceanima. H. Poser je (1947; 1948) zaključio da je srednja siječanska temperatura u Zagrebu iznosila —14°, a srednja temperatura prosinca i veljače —12°. Iz današnje raspodjele temperature na antarktičkom ledenom pokrovu mora se zaključiti da je u unutrašnjosti evropskog ledenog pokrova temperatura morala biti vrlo niska (u siječnju —35° do —45°, prema A. A. Aseevu, 1969). Tako je evropski ledeni pokrov bio izvorišno područje vrlo hladnih arktičkih zračnih masa koje su se, s kratkim prekidima, veći dio godine prelijevale preko periglacijalnog pojasa i preko Mediterana i sjeverne Afrike.

Da bismo što bolje upoznali prirodu razvoja i pulsiranja ledenih pokrova kao i prateće procese, prije svega promjenu temperature i sedimentiranje lesa, na sl. 370. prikazano je pulsiranje evropskog ledenog pokrova i odgovarajuće promjene temperature. (U ovom momentu nas neće zanimati je li ekspanzija pokrova na sve strane, osobito prema jugu, posljedica pada temperature, ili je pad temperature posljedica površinskog povećanja ledenog pokrova; to bi isto vrijedilo i za fazu povlačenja ledenog pokrova, odnos-



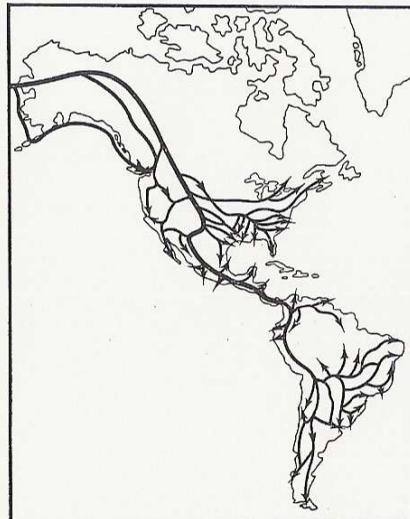
Sl. 370. Shematski prikaz toka virma u srednjoj i sjevernoj Evropi; 1. položaj ruba evropskog ledenog pokrova, 2. periodi sedimentiranja lesa, 3. hod temperature (P. Woldstedt, 1958)

no za povišenje temperature. Isto tako, moramo imati na umu činjenicu da je razvoj od početka do maksimuma posve hipotetičan jer je ledeni pokrov svojom ekspanzijom, a kasnije i u fazi općeg povlačenja, uništio najveći dio tragova po kojima bi se mogla rekonstruirati evolucija ledenog pokrova do maksimuma. Tako se do zaključka o klimatskim promjenama u većem dijelu posljednjeg glacijala dolazi indirektno.) Južna granica evropskog ledenog pokrova postupno se spušta na jug ili se pak povremeno povlačila na sjever; dakle, taj proces nije bio kontinuiran. U fazi opće ekspanzije ledenog pokrova (u prikazanom slučaju u fazi napredovanja ruba ledenog pokrova na jug) javljala su se kraća razdoblja kad se ledeni pokrov povlačio, a temperatura je privremeno porasla. Isto tako u fazi općeg povlačenja ledenog pokrova poslije maksimuma povlačenje je bilo isprekidano razdobljima ponovne ekspanzije ledenog pokrova i pada temperature. Pri tome je važno upozoriti na činjenicu da se krivulja temperature i južni položaj ledenog pokrova ne poklapaju savršeno, jer je ekspanzija i recesija ledenog pokrova bitno ovisila o još jednom klimatskom elementu — o količini padalina, a i ona se bitno mijenjala u toku posljednjeg glacijala (i svakog starijeg glacijala). Posebno značenje za razvoj ledenog pokrova imala je činjenica da je evropski (i svaki drugi) ledeni pokrov u posljednjem (i svakom starijem) glacijalu nastao u vlažnoj i svježoj klimi, a nestao u suhoj i vrlo hladnoj klimi.

Raspštranjenost ledenih pokrova u posljednjem glacijalu nije isključivo teorijsko pitanje, već je imalo dalekosežne posljedice, ali u mnogo većim vremenjskim dimenzijama, tj. utjecalo je na razvoj čov-

jeka i na njegovu raspštranjenost na Zemlji. U ovom slučaju pogledat ćemo samo jedan od brojnih primjera utjecaja raspštranjenosti ledenih pokrova, njihov utjecaj na naseljavanje Novog svijeta u pretkolombovskom periodu (sl. 371). I u momentu maksimalnog površinskog razvoja laurentijskog ledenog pokrova u posljednjem glacijalu, on se nije spojio s ledenjacima u Kordiljerama; između njih zaostao je nezaledeni koridor u predgorju Kordiljera. Kad su Evropljani otkrili Ameriku, svagdje su naišli na starosjedioce koji su greškom nazvani »Indijancima«. Geografska raspodjela tog stanovništva i gustoća naseljenosti često su bili sasvim obrnuti. Najgušće su bili naseljeni Meksiko i ostali dio Srednje Amerike, te veći dio Anda u Južnoj Americi, dakle pretežno zapadni krajevi obaju kontinenata.

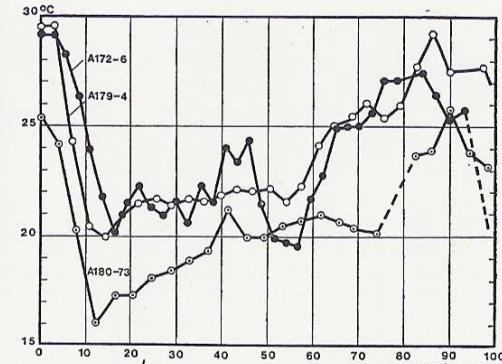
Opcenito je usvojena pretpostavka da Indijanci potječe iz Azije i da su počeli seliti u Sjevernu Ameriku još u paleolitiku, odnosno u drugoj polovici posljednjeg glacijala, prije 20–25 tisuća godina, u izuzetno teškim klimatskim uvjetima. U Novi su svijet stupili pretpostavlja se preko Rta Prince of Wales (Beringov prolaz



Sl. 371. Migracijski putovi u Sjevernoj i Južnoj Americi (K. Macgowan, 1950)

na poluotoku Seward (Aljaska), jer je tu prijelaz bio najlakši, tj. zbog niske razine svjetskog mora Beringov je prolaz tada bio kopneni most između Azije i Sjeverne Amerike. Vjeruje se da su prvi doseljenici bili vrlo primitivni, isključivo su bili sakupljači i lovci. Prvi Indijanci pretpostavljaju se došli su onda kada je južna i sjeverna obala Aljaske još bila zaledena, ali ledom nije bila prekrivena zaravni Yukon u suhoj i vrlo hladnoj unutrašnjosti Aljaske, pa su tu činjenicu morali iskoristiti doseljeni Indijanci. Od zaravnih Yukon najbolji put u kontinent i na jug vodio je dolinom rijeke Mackenzie, najzapadnijim rubom Velikih nizina u podnožju Stjenjaka, jer kad je došao prvi val doseljenika, Kordiljere i istočna Kanada još su bili pod ledom. Kad su već došli do 49. paralele, onda su se naglo razišli na zapad i istok, ali na sjever nisu mogli prodrijeti sve dok se nije povukao laurentijski ledeni pokrov. Cini se da se glavni migracijski put nastavio dalje na jug po rubu Stjenjaka da bi prešao na zapadni rub meksičke zaravni. Dalje se put nastavio preko visoravn u Srednju Ameriku te dalje po zaravnima u Andama na jug. Račvanje Anda omogućilo je cijepanje jednog puta na istok po sjevernom rubu Južne Amerike. Put na jug bio je relativno lagan; ne silazeći u Amazoniju, on je vodio do Bolivijs, gdje se već lako moglo prijeći na istok, na zarvni južnog Brazila. To naseljavanje trajalo je tisuće godina, ali je ipak bilo relativno brzo kad se usporedi s tehnikom putovanja u ono doba. Treba podsjetiti na činjenicu da su u doba Columbova otkrića Amerike najnaprednije indijanske zajednice bile na visoravnima Srednje Amerike i u sjevernom dijelu Južne Amerike. Bile su to visokoorganizirane i razvijene zajednice koje su se bazeale na sedentarnoj poljoprivredi, a najviši, najhladniji krajevi imali su razvijeno stočarstvo. Dalje na jugu klimatski su uvjeti bili povoljniji tako da su se Indijanci razišli po više putova sve do Ognjene zemlje. Sigurno nije slučajno da su najviši stupanj razvoja postigli Indijanci na visoravnima Sjeverne, Srednje i Južne Amerike, dok su rodovi i plemena koja su »zalutala« u Amazoniju i u klimatski vrlo nepovoljnu Ognjenu zemlju i sjevernu Kanadu ostala na najnižoj kulturnoj razini.

Temeljite promjene temperature koje su pratile postanak, pulsiranje i povlače-



Sl. 372. Paleotemperature površinskog sloja vode u sjevernom Atlantiku (H. E. Suess, 1956)

nje, te konačni nestanak evropskog, sjevernoameričkog i sibirskog ledenog pokrova, duboko se odrazile i u temeljitim promjenama temperature svjetskog mora, posebno temperature površinskog sloja vode (sl. 372). U površinskom sloju vode žive mikroorganizmi koji iz vode uzimaju kalcijev karbonat i ugrađuju ga u svoju ljuštu. Od tih mikroorganizama posebno su zanimljivi pelagički foraminiferi, koji su vrlo osjetljivi na promjenu temperature morske vode. Promjena temperature morske vode odražava se u relativnoj zastupljenosti pojedinih vrsta (»tople« i »hladne« vrste) i u broju individuala u jediničnom volumenu vode. Dakle, količina kalcijeva karbonata u vapnenim ljušturicama foraminifera ovisi o temperaturi njihove životne sredine. Njihov smrć na morsko dno neprestano pada prava »kiša« njihovih ostataka, koji se talože kao organski mulj. Zato se može očekivati da su dubokomorski sedimenti — ako nisu poremećeni — idealna sredina za istraživanje paleoklimatskih promjena jer postoji vertikalni kontinuitet (iako, ne baš uvijek). Već se otprije postupno usavršavala tehnika vodenja uzoraka morskog sedimenta pomoću specijalnih sonda, pa su tako izvučene »jezgre« duže od 20 m, koje zahvataju sedimente taložene u posljednjih nekoliko stotina tisuća godina. Analizom pojedinih slojeva otkriva se promjena temperature u razdobljima kad su ti slojevi taloženi. Međutim, odnos između mikrofaunističkog sadržaja i količine kalcijeva karbonata s jedne strane i tem-

perature zraka i morske vode s druge strane vrlo je suptilan.

S razvojem nuklearne fizike došlo se do »mjerenja paleotemperatura pomoću izotopske analize kisika. Morski organizmi koji iz vode ekstrahiraju kalcijev karbonat za izgradnju svojih ljuštura istovremeno uzimaju i kisik iz morske vode; ali, morski organizmi ga uzimaju u onom izotopnom omjeru u kojem postoji u morskoj vodi, tj. odnos kisikova izotopa  $O^{18}$  prema izotopu  $O^{16}$  u kisiku vezanom u karbonatnoj ljuštu. Odraz je temperature morske vode u dobu stvaranja karbonatnih ljuštura. Iako postoje goleme teškoće, uspjelo se doći do tzv. izotopnih temperatura koje približno odgovaraju promjenama temperature površine oceana kad su živjeli analizirani mikroorganizmi.

Da bi se posve razumjelo o kakvoj se metodi radi, treba istaći činjenicu da je svjetski ocean golemo »spremješte« topline koja se vrlo intenzivno i relativno brzo prenosi iz jednog dijela svijeta u drugi. To znači da je odnos između temperature vode i klimatskih promjena nižeg reda veličine neposredan, ali je temperaturne promjene nižeg reda veličine u svjetskom moru teže otkriti nego na kopnu gdje postoje veće amplitude. Važna je činjenica da su teškoće »mjerenja paleotemperatura izuzetno velike, da je ta tehnika daleko od savršenstva, pa se iz sadašnjih rezultata ne mogu izvoditi posve sigurni dalekosežni zaključci zato što je mjerjenje starosti sedimenata još nepouzdano (otuda često znatne, pa i bitne razlike između različitih autora u interpretiranju, odnosno obradi istih sonda). Odnos između temperature životne sredine i fizioloških procesa u živom organizmu previše je kompleksan, suptilan i još nedovoljno poznat da bi se sa sigurnošću mogli izvoditi sigurni i jednostavni dalekosežni zaključci. Tome nešto pridonose i diagenetski procesi nakon taloženja sedimenta i utjecaj živih organizama na dnu mora (npr. neke životinje jedu morski mulj).

Na sl. 372. prikazana je promjena temperature površinskog sloja vode sjevernog Atlantika u posljednjih 100 tisuća godina. Tri grafa paleotemperatura dobivena su izotopskom analizom kisika iz tri »jezgre« izvučene sondama A1794 ( $16^{\circ}36'N$  i  $74^{\circ}48'W$ , dubina 2 965 m; Karipsko more), A172-6 (Karipsko more  $14^{\circ}59'N$  i  $68^{\circ}51'W$ , dubina 4 160 m) i A180-73 (srednji Atlantik  $0^{\circ}10'N$  i  $23^{\circ}W$ , dubina 3 749 m). Imajući

na umu sve spomenute rezerve, ipak se može zaključiti da je temperatura počela padati prije 70–80 tisuća godina sve do minimuma prije oko 15 tisuća godina, poslijе čega je počelo naglo otopljavanje. U prvoj fazi posljednjeg glacijala, od početka do njegova maksimuma, jasno se opažaju temperaturne promjene nižeg reda veličine, dok to nije moguće reći za dio krivulja od maksimuma posljednjeg glacijala do danas.

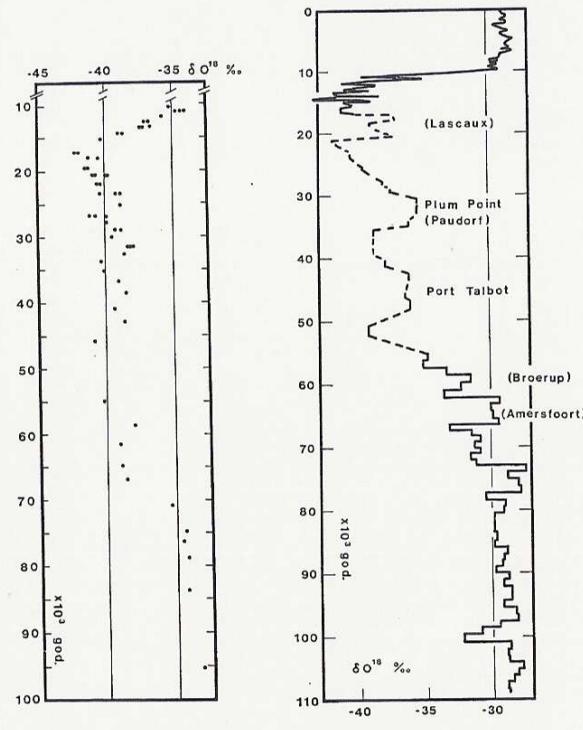
Izotopska analiza kisika iz ljuštura bentoskih foraminifera dala je tako povoljne rezultate da su istraživači brzo poslje toga proširili tu metodu i na analizu izotopskog sastava kisika u antarktičkom i grenlandskom ledu. Ta se metoda temelji na slijedećoj činjenici. Molekule vode koje »isparavaju« iz svjetskog mora sadržavaju određenu količinu kisika, koji se sastoji od težeg izotopa  $O^{18}$  i lakšeg izotopa  $O^{16}$ , a odnos kisika  $O^{18}/O^{16}$  u isparenoj vodi bit će funkcija temperature u času isparavanja vode. (Viša temperatura — veći udio molekula s izotopom  $O^{16}$  i, obratno, niža temperatura — veći udio molekula vode s izotopom  $O^{18}$ .) Zato je prvi korak bilo utvrđivanje standardnog omjera  $O^{18}/O^{16}$  u vodi današnjeg mora. Kad uskoro dođe do sublimacije, tj. kad od vodene pare nastane snijeg koji padne na ledeni pokrov, izotopski sastav kisika opet će biti isti kao izotopski sastav kisika iz vodene pare, tj. opet će biti funkcija temperature. (Međutim, postoje ljeta i zime, pa će i u svakoj godini varirati izotopski sastav kisika iz snijega. Ta će razlika uskoro nestati zbog molekulske difuzije u ledu, pa će izotopski sastav kisika u ledu odražavati srednju godišnju temperaturu.) Zato će odnos izotopa  $O^{18}/O^{16}$ , odnosno relativno odstupanje ili devijacija kisika-18 ( $\delta O^{18}$  u ‰), koja je izmjerena u uzorcima leda, od omjera utvrđenog za standardnu vodu iz današnjeg svjetskog mora, biti drukčiji u »hladnom« (glacijalnom) i »toplom« (interglacijalnom) ledu. Tako se odnos izotopa kisika  $O^{18}/O^{16}$  ili relativno odstupanje  $\delta O^{18}$  u ledu od standardne vode mijenja s povećanjem dubine snijega i firna, odnosno leda jer se mijenjala temperatura vode u moru u dobu stvaranja snijega. Jasno, i u ovom slučaju trebalo je savladati brojne teškoće; izotopska mjerena ne vrše se kontinuirano u cijeloj ledenoj jezri, nego samo u izoliranim, izabranim uzorcima s određenim dubinama. Važno je da pri odabiranju lokacije za buštinu iz koje se

vadi »jezgra« leda na grenlandskom i antarktičkom ledenom pokrovu treba poznavati topografiju podloge, koja mora biti takva da led u dubljim slojevima ne priteče iz susjednog hladnijeg područja. Ako to nije moguće, računskim se putem otklanja utjecaj tog faktora. Tako se konačno dobivaju grafovi koji prikazuju relativno odstupanje izotopa  $O^{18}$  u ledu od količine  $O^{18}$  u standardnoj vodi iz današnjeg mora ( $\delta O^{18}$ ), na raznim dubinama, koji odgovaraju raznim godinama. Tu se, dakle, dolazi do drugog važnog problema, do određivanja starosti leda. Osim radiometrijskih metoda upotrebljava se i određivanje starosti leda ekstrapolacijom na temelju današnje brzine akumulacije leda, odnosno snijega. Zato pouzdanost određivanja starosti leda opada s porastom dubine. Slijedeći je problem »preračunavanje«  $\delta O^{18}$  u stvarnu temperaturu. Budući da to nije jednostavna operacija, u svim dosadašnjim radovima prikazuje se samo  $\delta O^{18}$  u promilima. Usprkos tome, nas će posve zadovoljiti i ovakvi prikazi jer nas prije svega zanima opća zakonomjernost u razvoju ledenih pokrova, odnosno klime prošlosti.

Na sl. 373. prikazani su rezultati istraživanja pomoću spomenutih metoda u ledu iz dubokih bušotina na Antarktici i Grenlandu. Promotrimo najprije što je otkrila izotopska analiza kisika iz leda u bušotinu na Antarktici. (Svaka točka prikazuje rezultat izotopske analize iz pojedinih uzoraka leda određene debљine uzimanih u intervalima od 33–62 m; bliže dnu uzimani su samo tanki slojevi, pa otuda samo jedna točka, za razliku od nekoliko, točaka u gornjem dijelu, ali na razini koja ima istu starost.)

Spomenuti autori izvode zaključak da je obuhvaćen čitav posljednji glacijal, koji je — po ovim podacima — počeo otrpljike prije 75 000 godina, a

prestao prije nekih 11 000 godina. Najniža temperatura, tj. maksimum posljednjeg glacijala na Antarktici bio je otrplike prije 17 000 godina. Iz primjetnih promjena  $\delta O^{18}$  zaključuje se da su postojale smjene stadijala i interstadijala, ali je njihova temperatura uvek bila niža nego u postglacijskom, tj. u posljednjih 11 000 godina na Antarktici. Podjednake vrijednosti  $\delta O^{18}$  prije 75 000 godina upućuju na zaključak da je taj led stvoren u interglacijskom periodu posljednjeg glacijala, a temperatura je bila viša nego danas (i u posljednjim stoljećima) na Antarktici. Važan je zaključak da je u području antarktičke polarnе postojao Byrd Station razlika između srednje godišnje temperature danas i u maksimumu posljednjeg glacijala iznosila  $7-8^{\circ}$ , a



Sl. 373. Lijevo: izotopska analiza leda ( $\delta O^{18}$  u ‰) iz bušotine kod Byrd Station na Antarktici ( $80^{\circ}S$  i  $119^{\circ}W$ , nadmorska visina 1 530 m) od 1 050 do 2 162 m dubine (S. Epstein i dr., 1970); desno: isto za led iz bušotine Camp Century na sjevernom Grenlandu (dubina bušotine 1 390 m) (W. Dansgaard i dr., 1969).

razlika između stadijala i interstadijala u posljednjem glacijalu 2–3° ili možda nešto više. Očito je da su promjene klime u posljednjih stotinjak tisuća godina na Antarktici i na sjevernoj hemisferi bile *sin-krone*.

Istom metodom analiziran je i led iz jedne bušotine na sjevernom Grenlandu (sl. 373, desno), a došlo se do slijedećih rezultata. Maksimum posljednjeg glacijala bio je prije 13–17 tisuća godina, posljednji je glacijal počeo prije 73 000 godina, a prestao otprilike prije 10 000 godina. I na Grenlandu je bilo više stadijala i interstadijala s manjom amplitudom temperature. Očito je, dakle, da se po sačašnjem stanju znanja može smatrati definitivno dokazanom činjenicom da je posljednji glacijal bio opća, univerzalna pojava na cijelom našem planetu, da je maksimum bio u približno istom razdoblju, a isto tako je »istovremeno i prestao«.

Sada kad smo upoznali osnovne zakonitosti u razvoju ledenih pokrova u posljednjem glacijalu, možemo sumirati današnje znanje. Nema više nikakve sumnje da su ledeni pokrovi na sjevernoj hemisferi, evropski i sjevernoamerički, nastali, razvijali se i povlačili u biti u istim uvjetima, po istom mehanizmu. Grenlandski i antarktički ledeni pokrov su ekspanzionom brzo dolazili do obale, odnosno do dubokog mora, pa je njihov površinski razvoj bio strogo limitiran. Oba ledena pokrova povećavala su se i smanjivala kao i ledeni pokrovi u Sjevernoj Americi i Evropi (i Sibiru), ali su radialne promjene bile mnogo manje. *Cinjenica je da su sjevernoamerički i evropski (i sibirski) ledeni pokrovi nestali početkom holocena, dok su se antarktički i grenlandski ledeni pokrovi najvećim dijelom zadržali do danas.*

Iz dosadašnjeg razmatranja dolazi se do važnog zaključka da je evolucija ledenih pokrova tekla *nejednoliko*, tj. faza ekspanzije ledenih pokrova (odnosno faza njihove površinske ekspanzije) nije trajala koliko i faza recesije (povlačenja). Moglo bi se dakle prihvati da su ledeni pokrovi na sjevernoj hemisferi u maksimumu svog površinskog razvoja bili otprilike prije 20 000 godina. To znači da je ekspanzija ledenih pokrova trajala oko 50 000 godina (otprilike od prije 70 000 godina do prije 20 000 godina). Nakon maksimuma prije 20 000 godina počelo je povlačenje ledenih pokrova, ali je zanimljiva činjenica da je njihovo povlačenje bilo mnogo

brže nego njihova površinska ekspanzija. Ledenih je pokrova nestalo za oko 10 000 godina (osim antarktičkog i grenlandskog), tj. nestali su na prijelazu iz posljednjeg glacijala u holocen, tj. prije 10 000 godina. Ukratko, u vremenskom razvoju ledenih pokrova postoji izrazita razlika: *relativno lagana ekspanzija i vrlo naga nestanak*.

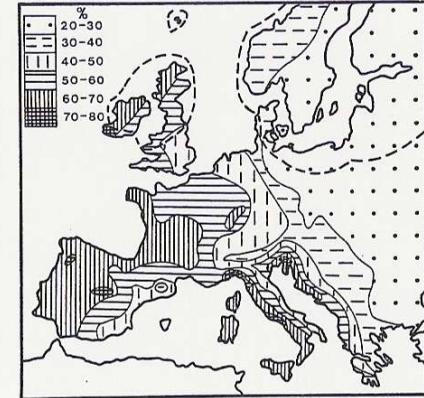
Ni ekspanzija ni recesija nestalih ledenih pokrova nisu bili kontinuirani procesi, tj. nisu neprekidno rasli niti su se neprekidno povlačili. Širenje i povlačenje ledenih pokrova bilo je isprekidano kraćim stojima, odnosno suprotnim razvojem od opće tendencije razvoja. Faze ekspanzije ledenih pokrova praćene padom temperature nazivaju se stadijalima, a faze povlačenja ledenog pokrova praćene porastom temperature nazivaju se interstadijalima. (Postoje i još manje, još kratkotrajnije pulsacije ledenih pokrova, ali terminologija, a još manje sinkronizacija, nisu ujednačeni.) Ledeni pokrovi su se, dakle, počeli širiti, došli su do jedne granice, zatim se malo povukli, da bi poslije opet, još jače, eksplandirali, još se više raširili nego u prethodnom slučaju, odnosno stadijalu. Tako je bilo u prvoj fazi, fazi opće širenja ledenog pokrova. Od trenutka kad je (prije 20 000 godina) počela faza općeg povlačenja ledenih pokrova, po pravilu u mlađem stadijalu, ledeni pokrov nije mogao dostići svoju južnu granicu iz prethodnog stadijala: ledeni pokrovi ritmički su nestajali i nisu se mogli vratiti u svoje prethodno stanje.

Klimatske promjene u posljednjem (i svakom starijem) glacijalu u biti su se podudarale s *površinskim* razvojem ledenih pokrova, odnosno zaledenih površina (zaledeno more, snijegom prekrivena prostoranstva), što je posljedica neposrednog utjecaja snijega i leda na bilancu radijacije (velik albedo leda i snijega). S ekspanzionom ledenih pokrova, s povećanjem njihovih površina, povećavao se gubitak topline u područjima pod neposrednim utjecajem ledenih pokrova, a posljedica je bila — pad temperature; svaku ekspanziju ledenih pokrova, svaki stadijal, pratio je pad temperature. Suprotno je bilo u interstadijalima; smanjenjem ledenе površine smanjivao se gubitak topline i tako je temperatura porasla, tj. svaki interstadijal karakterizira porast temperature. Sto je u biti uzrok, a što posljedica, problem je teorije o postanku ledenih pokrova.

Osim temperature, na mehanizam puliranja ledenih pokrova bitno utječe i količina padalina, odnosno evolucija ledenih pokrova posljedica je funkcionalnog odnosa temperature i padalina. Taj se odnos u toku evolucije ledenih pokrova *bitno mijenja*, a to je ostavilo duboke tragove i u klimi i u prostornom razvoju ledenih pokrova. Za posljednji je glacijal utvrđena slijedeća evolucija klime (sl. 370). U prvoj fazi posljednjeg glacijala, u ranom virmu, bila je relativno *svježa i vlažna klima* u umjerjenim geografskim širinama, tj. postojali su povoljni uvjeti za akumuliranje golemih količina snijega (firna, leda) koji je omogućio ekspanziju ledenih pokrova. Upozorit ćemo na vrlo važnu činjenicu da je akumuliranje leda u Evropi počelo u planinama Skandinavije, a u Sjevernoj Americi u planinskom dijelu Labadora. To su bile jezgre gdje su najprije nastajali planinski i pijedmontski ledenjaci kao »embrijoni« budućih ledenih pokrova. Tako smo došli do bitno važne činjenice: svako stvaranje ledenih pokrova počinjalo je u planinskim područjima, a kad se ledeni pokrov razvije preko izvjesne granice, postaje sam golema reljefna barijera koja dalje regulira svoj razvoj, odnosno akumulaciju čvrstih padalina i konačno — leda. Zatravši ledom spomenute planine, kao i sve druge planine na Antarktici, Grenlandu, Sibиру, ledeni pokrovi postali su nezavisni od njihova utjecaja. Ali, kad su ledeni pokrovi nestajali, najduže su se zadržali u istim planinama gdje su i nastali.

U srednjem virmu klima se, pod utjecajem postojanja ledenih pokrova, postupno počinje mijenjati. Sve je *hladnija*, a pod utjecajem manjeg isparivanja (kao posljedica pada temperature) i potiskivanja polarne fronte u niže geografske širine *količina padalina postaje sve manja*. Slična je klima bila i u kasnom virmu, samo se došlo još dalje u tom smjeru. Temperatura je pala na najnižu razinu, a količina padalina u području ledenih pokrova i u široj zoni uz njih prema ekuatoru znatno se smanjila. *Posljednji je glacijal počeo sa svježom i vlažnom, a završio s vrlo hladnom i suhom klimom*. Zato nema smisla generalizirati i govoriti kako je bila klima posljednjeg glacijala. Uvijek treba precizirati vremenski, treba reći o kojem je dijelu posljednjeg glacijala riječ.

Količina padalina je toliko važna za



Sl. 374. Raspodjela padalina u maksimumu posljednjeg glacijala u Evropi; postotak od današnje količine (A. M. Klein, 1953)

razvoj i postojanje ledenih pokrova da ćemo taj problem još razmotriti. Analizirat ćemo kakva je bila raspodjela padalina u maksimumu posljednjeg glacijala u Evropi (sl. 374). Nema sumnje da je relativno velik evropski ledeni pokrov u maksimumu posljednjeg glacijala bio izvorišno područje vrlo hladnih zračnih masa koje nisu omogućavale pritjecanje vlage s Atlantika i Sredozemlja na sam ledeni pokrov. Danas se općenito uzima da je u tome i ključno rješenje zagonek zašto su nestali ledeni pokrovi u umjerjenim širinama ako je postojao osnovni uvjet, a to je niska temperatura u njihovu području. Jer, ledeni pokrovi u umjerjenim širinama počeli su se povlačiti onda kad je temperatura pala na *najnižu* razinu! Očito je da je temperatura postala *preniska* za daljnje postojanje spomenutih ledenih pokrova. Presudno značenje u tom času počela je imati količina padalina, a nje je bilo *premalo!* I najniže temperature same po sebi ne mogu održati ledeni pokrov ako nema dovoljno padalina. (Zato je sibirski ledeni pokrov bio manji i tanji od sjevernoameričkog i evropskog iako je temperatura u Sibiru bila *niža* nego u Evropi i Sjevernoj Americi. Polazeći od te činjenice, bolje je reći *upravo zato* što je temperatura bila preniska, a ne iako je bila niža.) Tako će posebno važna biti činjenica za koliko je postotaka bilo manje padalina u maksimumu posljednjeg glacijala u Evropi prema današnjoj količini

padalina ili, obratno, koliko je bilo padalina u postocima od današnje količine. Tako je A. M. Klein izračunala da je u maksimumu posljednjeg glacijala u Evropi bilo 20–80% manje padalina nego danas. U zapadnoj Francuskoj i na Britanskim otocima padalo je 50–70% od današnje količine padalina; to isto vrijedi za veći dio Pirenejskog poluotoka. Bitno je važna činjenica da se količina padalina relativno smanjivala prema istoku; tako je istočno od Labe padalo samo 20–30% od današnje količine padalina. Za nas je potrebno posebno istaći zanimljivu činjenicu da je i u našim krajevima u maksimumu posljednjeg glacijala bilo manje padalina nego danas, ali je relativno smanjenje bilo veće u unutrašnjosti (gdje je padalo 20–40% od današnje količine padalina) nego u planinskim pojascima i na obali (50–80% od današnje količine padalina). Za morfološke procese bitno je važna činjenica da je relativni udio snijega u ukupnim padalinama bio mnogo veći nego danas.

Sličan slijed klime, samo u manjem rasponu, bio je i u samom posljednjem glacijalu. Svi stadijal imao je sušu i hladniju klimu, a interstadijal nešto topiju i vlažniju, ali ne »sušu i hladniju« ili »topiju i vlažniju« nego danas, nego te oznake vrijede u odnosu prema *prethodnom* razdoblju. Zato je u glavnim hladnim fazama posljednjeg glacijala (virm u Evropi) bio taložen les (ili prapor), eolski sediment, dok su u topilim i vlažnijim interstadijalima nastajale smeđe zone, fosilna tla. Ipak, odnos između klimatskih promjena i faza taloženja lesa nije tako shematičan i jednostavan.

Les je toliko važan eolski sediment (prije svega iz posljednjeg glacijala, dok ga je iz starijih glacijala preostalo malo) da je potrebno nešto malo više reći o njemu, odnosno o njegovu postanku. Golema prostranstva na Zemlji prekrivena su lesom, pa je logično da iz toga moraju proizići regionalne razlike u mineralnom sastavu, debljini, starosti i načinu postanka. Po postanku les može biti: a) »hladni« i b) »toplji. »Hladni les« nastao je deflacijskom, otpuhivanjem finijeg materijala u suhoj periglacijskoj klimi u šrem pojasa bez vegetacije u blizini nekadašnjih ledenih pokrova. Tako je nastao les u umjerenom, subarktičkom i arktičkom pojasa, a samo u Sjevernoj Americi nalazi se i u suptropskom pojusu (jer je sjevernoamer-

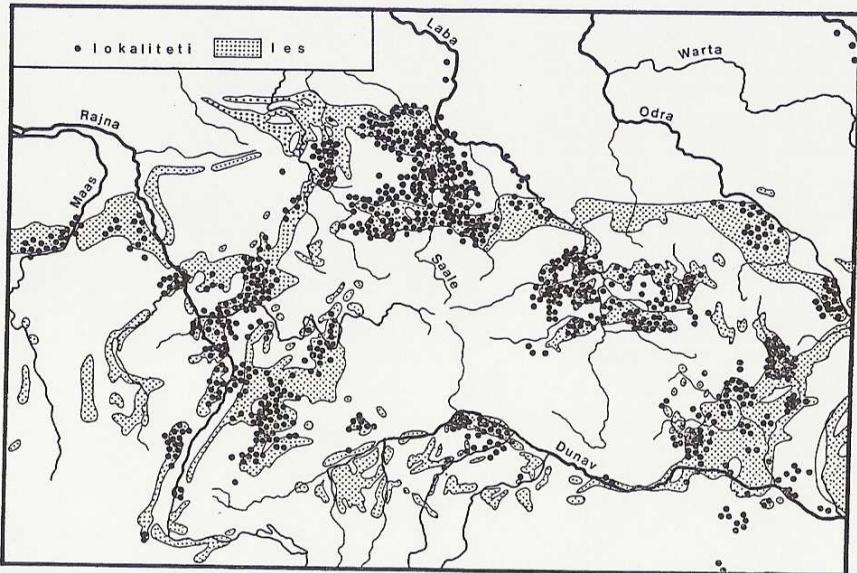
rički ledeni pokrov prodiraо mnogo dalje na jug od bilo kojeg drugog ledenog pokrova). Uvjeti za postanak lesa postojali su u najhladnijim razdobljima posljednjeg glacijala, u najhladnijim stadijalima, kad su jaki, hladni i suhi vjetrovi s ledenih pokrova puhal preko periglacijske zone, gdje su iz podloge otpuhivali najfiniji materijal, a ondje gdje je njihova transportna moć slabila, ondje se taj materijal taložio i od njega je nastao les. Les se mogao pretaložiti u vodenim sredinama. Dio lesa nastao je poplavama riječka, poslije čega je ostao sloj finog rastresitog materijala koji je vjetar mogao lako raznijeti.

Uzima se da u Evropi postoje dva ili tri glavna horizonta lesa iz posljednjeg glacijala a još nekoliko horizontata lesa taložilo se u starijim glacijalima. Međutim, intenzitet i trajanje sedimentiranja lesa mijenja se u posljednjem glacijalu. Intenzivnost sedimentiranja naglo je porasla u drugom dijelu posljednjeg glacijala, napose u njegovu maksimumu. Svi pokazatelji dovode do zaključka da veliko intenziviranje taloženja lesa treba pripisati aridizaciji i silnom zahlađenju klime u maksimumu posljednjeg glacijala.

»Topli les« taložio se u suptropskom (izuzetak je Sjeverna Amerika, gdje se u suptropsku taložio pretežno »hladni les«) i tropskom pojusu objiu hemisferu, a genetski nije vezan uz hladne periglacijske uvjete. Ima ga u Kini, u sovjetskoj srednjoj Aziji (Fergana) itd., a nastao je otpuhivanjem materijala sa suhe podloge. I u njemu postoje zone fosilnog tla, ali njih nije moguće sinkronizirati sa sličnim slojevima u »hladnom lesu« jer je razvoj tekao u drukčijim klimatskim uvjetima.

O lesu smo govorili zato što se poslije posljednjeg glacijala na njemu razvio debeli sloj vrlo plodnog tla; ta su lagana i porozna tla koja su kasnije, u neolitiku, kad se počela razvijati poljoprivreda, bila vrlo povoljna za razvoj agrarne proizvodnje. Na sl. 375. prikazan je odnos između rasprostranjenja lesa i neolitske poljoprivrede.

Budući da je agrarna proizvodnja postala osnova ekonomije neolitskih zajednica, izravno je utjecala i na geografsku raspodjelu stanovništva i naselja. Nije potrebno dugo analizirati sl. 375. da se uvidi kako je neolitska poljoprivreda, koja je zbog nerazvijenosti tehnike bitno ovisila o prirodnoj osnovi, bila najrazvijenija u lesnim područjima s plodnim tlom.



Sl. 375. Neolitska poljoprivredna središta (točke) i rasprostranjenje lesa (sitne točkice) u srednjoj Evropi (J. G. D. Clark, 1952)

Neolitsko agrarno stanovništvo koje je naseljavalo srednju Evropu prakticiralo je selilačku poljoprivodu i to, ako je iako bilo moguće, na tlu koje se razvilo na lesu, jer je obrada bila najlakša za ondašnju tehniku, a tlo je uz to bilo vrlo plodno. Budući da je neolitska poljoprivreda bila selilačka, geografska raspodjela lesa bitno je utjecala na migracijske puteve neolitskih poljoprivrednika. Čini se da je najstarija neolitska poljoprivreda počela u Moravskoj, odatle se proširila na istok do Galicije, a preko Poljske sve do donje Visle, zatim na zapad i sjever uz Odru do Sleske, Labom do Saske i Dunavom do Bavarske da bi konačno došla do lesnih područja uz Neckar, Main i Rajnu, te dolinom Meuse u današnju Francusku. Da je poljoprivreda bila selilačka, potvrđuje činjenica da je migracija bila, za one uvjetne, vrlo dinamična. Preseljenje u novi kraj značio je napuštanje starijih naselja, a na nekadašnjoj agrarnoj površini brzo se razvio prirodni biljni pokrov. Paleobotanička istraživanja pokazuju da se ciklus ponovo više puta, tj. nakon izvjesnog vremena izrasla je šuma, koju su novi doseljenici

spalili, ali su i oni nakon nekog vremena (poslije iscrpljenja tla) otisli. Šuma je opet izrasla, pa su mogli doći novi doseljenici. I tako redom više puta.

Glacijsku cirkulaciju atmosfere karakterizira potiskivanje zone glavnih zapadnih vjetrova prema ekuatoru, naijače u atlantskom sektoru, dok je u pacifičkom sektoru došlo do manjih promjena. Potiskivanjem ciklona, odnosno polarne fronte, u niže geografske širine, količina padalina smanjila se u širokom pojusu oko južne periferije ledenih pokrova, ali se istovremeno povećala količina padalina u današnjim suhim suptropima i tropima (u odnosu prema današnjoj količini padalina). Ovo vlažnije razdoblje u danas suhim zonama zove se pluvijal, a bio je »istovremen« s glacijalom u višim geografskim širinama. Međutim, pluvijal nije bio razdoblje neprekidno veće vlažnosti i niže temperature. Posljednji je pluvijal bio isprekidan kraćim suhim i toplijim razdobljima, između kojih su se nalazile kraće svježije i vlažnije faze. Slabljenjem suptropskog pojasa visokog tlaka nastale su mogućnosti za proširenje ekvatorskog po-

jasa niskog tlaka, pa je pustinjski pojaz bio sužen i na ekvatorskoj strani.

U evropskom Mediteranu u maksimumu posljednjeg glacijala klima je bila hladna, a padalina je bilo manje nego danas, dok je u sjevernoj Africi količina padalina *porasla*. (U Atlasu su postojali ledjenaci, stepa oko Sahare veoma se proširila prema njenoj unutrašnjosti, tako da je pustinja bila vrlo sužena.) Krajem posljednjeg glacijala virmska glacijalna fauna sisavaca sjeverne Afrike imala je mnogo evropskih elemenata.

Razina Mrtvog mora u posljednjem pluvijalu porasla je na —220 m (danasa je na —399 m), pa mu je površina bila tri puta veća nego danas.

Velike paleogeografske promjene nastale su i u sjevernom dijelu Kaspijskog mora. Godine 1930. površina ovog mora iznosila je 424 300 km<sup>2</sup>, 1952. god. 393 200 km<sup>2</sup>, a 1957. god. već 371 000 km<sup>2</sup>. Međutim, u doba donjohvalinske transgresije (raniji dio posljednjeg glacijala) njegova je površina iznosila 946 000 km<sup>2</sup>, a razina mu je bila 100 m viša od današnje. Uzrok je te transgresije povećanje količine padalina i smanjenje evapotracije, dok je pritjecanje vode rijekama bilo manje nego danas.

Pluvijal je postojao i na ekvatorskim rubovima sjevernohemferskih pustinja, pa se to odrazilo u pomicanju na sjever tropske šume i savane. Ali, to bi bio »toplik« pluvijal za razliku od »hladnog« dalje na sjeveru. Po analogiji, nešto slično, iako u manjim dimenzijama, trebalo je da bude i na južnoj hemisferi.

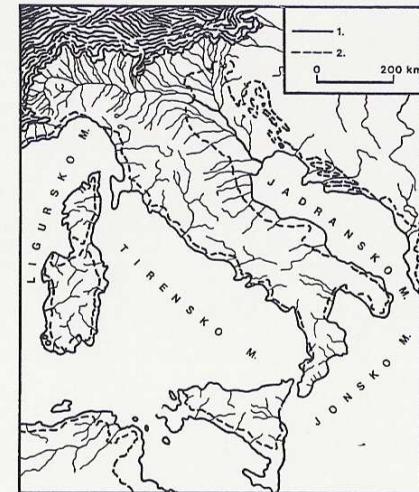
Kvantitativni podaci o promjenama klimatskih elemenata u posljednjem glacijalu vrlo se teško mogu utvrditi. U niskim geografskim širinama u maksimumu posljednjeg glacijala srednja godišnja temperatura bila je za 4° niža. Cesta antiklonska stanja, osobito zimi, kad je veliko značenje imala inverzija, uzrokovali su mnogo veći pad temperature u umjerenim širinama; u srednjoj Evropi je srednja godišnja temperatura bila za 8—12° niža od današnje. Da je potrebna geografska diferencijacija, pokazuju podaci C. Emilijanija (1970), koji uzima da je srednja godišnja temperatura u Karipskom moru bila 7—8° niža nego danas, u ekvatorskom Atlantiku 5—6°, u ekvatorskom Pacifiku 3—4°, a na Antarktici (S. Epstein i dr., 1970) 7—8° niža nego danas. Pojas glavnih zapadnih vjetrova bio je prosječno 10—15° bliži ekvatoru.

Glacijacija Antarktike u posljednjem glacijalu bitno se razlikovala od glacijacije sjeverne hemisfere. Ta razlika proizlazi iz jedne geografske činjenice: Antarktika je kopno okruženo oceanima, a Arktik je more koje je najvećim dijelom okruženo kopnom. Ta je činjenica bitno utjecala i na oblik i na veličinu ledenih pokrova, kao i na mehanizam njihova pulsiranja. Antarktički ledeni pokrov je kružnog oblika, prekriva gotovo cijeli kontinent i ne može biti veći od antarktičkog kopna i šelfa. Zato udara u oči činjenica da su ledeni pokrovi na sjevernoj hemisferi — osim grenlandskega — potpuno nestali, dok je antarktički ledeni pokrov danas (12,6 mil. km<sup>2</sup>) tek nešto manji nego u maksimumu posljednjeg glacijala (13,2 mil. km<sup>2</sup>). Budući da je odnos opće cirkulacije atmosfere i zaledene površine direktan, cirkulacija atmosfere oko Antarktika u maksimumu posljednjeg glacijala neznatno se razlikovala od sadašnje cirkulacije. Zato bi se moglo zaključiti da kvartarna ili kenozojska glacijacija na južnoj hemisferi nije prestala. Na Antarktiku se nalazi 24 mil. km<sup>2</sup> leda, tj. 90% leda koji danas postoji na Zemlji.

Akumulacijom goleme količine leda na kopnu u posljednjem glacijalu moralо je doći do pada morske razine. U razdoblju najnižeg položaja morske razine ona je bila oko 100 m niža nego danas. Za nas su posebno zanimljive paleogeografske promjene u srednjem Mediteranu, odnosno u Jadranskom moru (J. Roglić, 1962) u maksimumu posljednjeg glacijala (sl. 376). U fazi niskog položaja morske razine sjeverni je Jadranski bio kopno po kojem su tekle rijeke iz sjeverne Italije (led je prekrivao veći dio Alpa, a po dolinama su se spuštali planinski ledjenaci daleko na jug prema Pou), iz našeg primorja (Raša je bila ponornica) i s Apeninskog poluotoka. (Na sl. 376. nisu prikazani manji ledjenaci na Apeninskem poluotoku i u našoj zemlji.) Rijeke iz Padske nizine i s Apeninskog poluotoka donosile su rastresit materijal, iz kojeg je suhi i hladni vjetar otpuhivao najsitnije čestice koje su se taložile ondje gdje je oslabila transportna moć vjetra; tako je nastao les, koji se do danas održao na Susku, ponegdje na obali Istre, u okolicama Zadra, na nekim otocima sve do Lumbarde na Korčuli i do Mljetu. Upravo je les dokaz o postojanju kopna na mjestu današnjeg sjevernog Jadrana. Osim toga, to dokazuju i intenzivne migraci-

je životinja i biljaka, osobito sisavaca (I. Rakovec, 1960), koji su po kopnu dospjeli na današnje otoke, pa i to dokazuje povezanost naših otoka s kopnom u fazi najnižeg položaja morske razine. Izdizanje morske razine u kasnom vrimu bilo je tako naglo da abrazija nije bitno utjecala na oblikovanje našeg obalnog reljefa. Svadje se dobiva dojam da su kopneni oblici reljefa samo preplavljeni naglim izdizanjem morske razine koje se nastavilo i u holocenu. (Riječna ušća prelaze u zaljeve, drage ili kopnene udoline, a rebrasti reljef prelazi u isturene poluotoke.) Tako postoje brojni dokazi da je i podmorski reljef isto tako živ i reljef na kopnu.

Budući da je naše i talijansko primorje geološki mlado, istovremeno je dolazilo i do diferenciranih vertikalnih gibanja kopna neovisno o glacioeustatičkim gibanjima morske razine. Zato je i najmlađe glacioeustatičko izdizanje morske razine bilo nejednako u raznim dijelovima jadranske obale. Ti su procesi imali i sasvim praktične posljedice, pa je poznato da su mnoge antičke građevine na našoj obali (npr. Dioklecijanova palača u Splitu) djelomično poplavljene; pri tome ne treba zaboraviti ni mogućnost usjedanja teških građevina na laporovitoj podlozi. Obala Apeninskog poluotoka i sjeverne Italije do Trsta drukčije je građena nego naša (izuzetak je ušće Neretve, Cetine i Raše), pa preteže vrlo jaka akumulacija apeninskih, a osobito alpskih rijeka, tako da je u relativno novijem razdoblju poništen utjecaj glacioeustatičkog izdizanja morske razine, tj. količina riječnih sedimentata tako je



Sl. 376. Paleogeografske promjene u srednjem Mediteranu krajem pleistocena; 1. obala u razdoblju najnižeg položaja morske razine u posljednjem glacijalu, 2. današnja obala (Atlante Fisico Economico d'Italia, Milano, 1940)

velika da akumulacijska obala raste, odnosno proširuje se. Tako je poznato da se nekadašnje velike i važne luke Adria, Aquileja i Ravenna nalaze duboko u kopnu, odnosno zasipavanjem luka onemogućen je njihov ekonomski razvoj, jedino ako nije intervinirao čovjek. To isto dogodilo bi se i Veneciji da čovjek nije sprječio nasipavanje Venecijanske lagune.

### 3.5. KLIMA PREVIRMSKE KENOZOJSKE GLACIJACIJE

Istraživanje još starijih tragova pokazuje da je kenozojska glacijacija bila vrlo kompleksna. Virmski glacijal i bitna promjena klime u tom razdoblju samo je jedno od hladnih razdoblja u nizu od nekoliko sličnih promjena klime u posljednjih više stotina tisuća godina. U pleistocenu je klima bila nekoliko puta bitno izmijenjena. Dugotrajna hladna razdoblja u kojima su nastajali, razvijali se i nestajali veliki ledeni pokrovi u umjerenim geografskim širinama na sjevernoj hemisferi, odnosno razdoblja u kojima je antarktički

HIPOTETSKA SINKRONIZACIJA GLACIJALA (kurziv) I INTERGLACIJALA (PREMA RAZNIM AUTORIMA)			
Alpe	Sjeverna Njemačka i Nizozemska	Sjeverna Amerika	Evropski dio SSSR-a
Würm (virm)	Visla, Weichsel	Wisconsin	Valdajski glacijal Dnjeparsko-valdajski int.
Riss/Würm Riss (ris)	Eem Saale i Warthe	Sangamon Illinoian	Dnjeparski glacijal Lihvinsko-dnjeparski int.
Mindel/Riss Mindel (mindel) Günz/Mindel Günz (ginc) Danubij/Günz Danubij (dunav)	Holstein Elster Cromer Menap, Waal, Eburon Tegelen Pretegelen	Yarmouth Kansan Aftonian Nebraskan	Lihvinski gl.

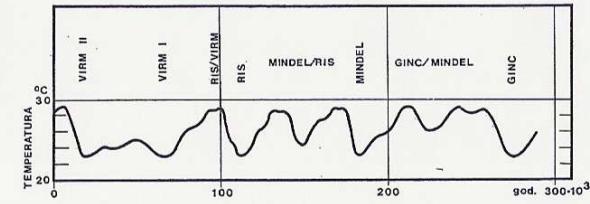
Tabl. 6.

današnjoj, s tom razlikom što je bila nešto toplijia (dakle, slično kao i u atlantiku). Pretpostavlja se da je u maksimumima interglacijskog perioda potpuno nestajao led sa sjevernog ledenog mora, a grenlandski ledeni pokrov bio je znatno smanjen, ali nikada nije posve nestao. To je uzrokovalo velike promjene u općoj cirkulaciji atmosfere. Bitno su ojačale supropske antiklone, glacijalne antiklone su slabije, pa je pojas glavnih zapadnih vjetrova (odnosno ciklone s polarnim frontama) bio potisnut u više geografske širine. I ekvatorska granica supropskih antiklona pomakla se bliže ekuatoru. Dakle, prije posljednjeg glacijala, prije virma, bio je interglacijski ris/virm koji je trajao oko 40 000 godina, tj. otprilike od 110 000—70 000 godina prije sadašnjosti.

U biti se sada ponavlja sve ono što je već rečeno za posljednji glacijal, za virm. Prije virma i prije interglacijskog ris/virma postojao je glacijalni ris (i njegovi ekvivalenti u ostalim dijelovima svijeta). Kao i u posljednjem glacijalu (virm), tako je i u pretposljednjem glacijalu (ris) nastao golem ledeni pokrov koji je ledom zatrpan do Skandinavskog poluotoka, Finsku, sjeverni i sjeverozapadni dio evropskog SSSR-a, praktički čitavu Poljsku, sjevernu Njemačku, Nizozemsку i Britaniju do Temze i Severne, čitavu Irsku, Baltičko i Sjeverno more. Definitivno je utvrđeno da je riski ledeni pokrov u Evropi bio znatno veći nego u virmu. Kao i u virmu, limitirajući faktori su bili klimatski. Na području današnjeg Sovjetskog Saveza klima je u fazi maksimalnog površinskog razvoja ledenog pokrova bila previše hladna i

suhu da bi ledeni pokrov mogao prodrijeti dalje na jug. Riski ledeni pokrov u srednjoj i zapadnoj Evropi bio je pod jakim utjecajem advekcije topline s Atlantika, tako da se evropski ledeni pokrov ni u ovom glacijalu nije spojio sa zaledenim Alpama; između njih je ostao kopneni koridor. Značajno je da su goleme mase leda u ledenim pokrovima na sjevernoj hemisferi u glacijalu ris (isto kao i u virmu) bile koncentrirane u umjerenoj geografskim širinama, dok je debljina leda u evropskom, sjevernoameričkom, grenlandskom i sibirskom ledenom pokrovu opadala prema hladnom sjeveru, a rasla prema toplijem i vlažnijem jugu. Da je takva raspodjela, odnosno koncentracija kopnenog leda samo djelomično posljedica raspodjele kopna i mora (npr. grenlandski ledeni pokrov ne može biti znatno veći nego što je površina tog otoka jer je oko Grenlanda relativno duboko more), a većim dijelom posljedica limitirajućeg utjecaja prenlike temperature i suhosti zraka u arktičkim širinama, vidi se iz činjenice što znatan dio otoka u Kanadskom arktičkom arhipelagu nije bio prekriven ledom (postojali su samo prilično »pasivni« planinski ledenjaci). Isto tako, evropski ledeni pokrov nije prekrivao golemi šelf u području Barentsova mora, Novaje zemlje i arktičkih otoka (Svalbard, Zemlja Franje Josipa), nego mu se središte nalazilo mnogo dalje na jugu. Laurentijski ledeni pokrov rastao je prema jugu, prema Meksičkom zaljevu, prema izvoru vlage, dok su Kordiljeri bili zatrpani ledom koji je nastao od vlage s Tihog oceana. Međutim, vrlo hladna i pla-

Sl. 377. Generalizirana krivulja promjene temperature morske vode ekvatorskog Atlantika i Karipskog mora; datiranje i korelacija s klimatskim promjenama nije sigurna, osobito ne prije od 100 000 godina (C. Emiliani, 1955)



ninama izolirana sjeverna Aljaska nije bila prekrivena ledom.

Slična situacija bila je i u Aziji. Kao i danas zimi, Sibir je u svakom glacijalu, pa tako i u risu, morao biti strahovito hladan (ali ne samo zimi, nego i ljeti) i vrlo suh. Zato ni u risu, kao ni u virmu, nije postojao velik i debeo ledeni pokrov koji bi se po veličini, a još manje po volumenu leda mogao usporediti s evropskim, a osobito ne sa sjevernoameričkim ledenim pokrovom. Sibirski ledeni pokrov sa stajao se zapravo od nekoliko nepovezanih ledenih »kapaca« u većim planinskim sistemima, pa se zapravo i ne bi moglo govoriti o jedinstvenom ledenom pokrovu u evropskom i američkom smislu riječi.

Da bi se lakše dobila prava slika o razmjerima glacijacije, korisno će biti ako spomenemo da je u riskom glacijalu bilo na Zemlji ledom prekriveno 45 mil. km² kopna, ili 30% površine kontinenta na našem planetu. Osim toga, led je prekrivao 25 mil. km² mora u Arktiku i oko Antarktike, a to iznosi 4% površine svjetskog mora. Da bi se shvatila golema razlika između promjena zaledenosti sjeverne i južne hemisfere, treba spomenuti da je danas ledom prekriveno 16 199 000 km² kopna, a u riskom glacijalu bilo je prekriveno 45 mil. km². To znači da su goleme razlike između zaledenosti u glacijalima i interglacijskim bili samo na sjevernoj hemisferi, dok je na južnoj hemisferi, specijalno na Antarktiku, razlika između glacijala i interglacijsala bila nebitna.

Slijed klimatskih promjena, odnosno promjena temperature, utvrđen je izotopskom analizom kisika iz dubokomorskih sedimenata. Odnos  $O^{18}/O^{16}$  ovisi o temperaturi površine mora u doba taloženja sedimenata, odnosno za životu, analiziranih foraminifera; na toj osnovi (i na nekim drugim pretpostavkama) konstruiran je »termogram« jednog dijela pleistocen-

ske glacijacije (sl. 377), na kojem se jasno vidi smjena glacijala i interglacijsala, ali i temperaturne promjene nižeg reda, stadijali i interstadijali. Postoje, međutim, bitna različanja u datiranju tih temperaturnih promjena, napose u starijem dijelu krivulje, a čini se da su i prevelike amplitude klimatskih promjena nižeg reda, što proizlazi iz već opisanih teškoća izotopske analize paleotemperature i radiometrijskih metoda mjerjenja vremena. Ovom je analizom utvrđeno da je temperatura površinske vode tropskog Atlantika i Karipskog mora varirala u obuhvaćenom dijelu kvartara za oko 6°. Jasno se vide razdoblja s izrazito nižim temperaturama (zato je uzeo da se radi o glacijalima) i razdoblja s višom temperaturom (pa se smatra da se radi o interglacijsima). Je li temperatura svih glacijala, odnosno interglacijsala, bila jednakna, teško je reći, jer to nadilazi mogućnosti upotrijebljene tehnike. (Posebno je zanimljivo da je i ovom metodom utvrđeno postojanje holocenskog klimatskog optimuma kad je temperatura bila viša nego danas. Estrapolacija dopušta mogućnost pretpostavke da mi živimo u jednom interglacijsalu, tj. u izvjesnom je smislu opravdana pretpostavka da će u budućnosti nastupiti novi glacijal, novo »ledeno doba«, ako se ponoće uzroci koji su i do sada uzrokovali ritmičku smjenu glacijala i interglacijsala. Međutim, do toga bi moglo doći tek na mnogo tisuća godina.)

Goleme su teškoće istraživanja klimatskih promjena u prošlosti (koja se najčešće svode na proučavanje temperaturnih promjena) zbog njihove silne kompleksnosti i fragmentarnosti podataka. Novija istraživanja pokazuju da su one bile mnogo komplikirane nego što se u početku mislilo. Prema sadašnjem stanju znanja, klimatske promjene u toku kenozojske glacijacije bi se mogle ovako rezimirati.

Kao i svi procesi u prirodi, kenozojska glacijacija nije bila neočekivana i nagla pojava. Izotopskom analizom kisika iz bentoskih foraminifera sa dna istočnog Pacifika 6–15° N (sl. 378) pokazalo se da je temperatura vode na 4 000–5 000 m dubine od gornje krede do gornjeg pliocena pala za oko 12°, da bi neposredno prije početka pleistocena bila nešto malo toplijija od današnje vode. Naime, pridnena voda u niskim geografskim širinama antarktičkog je i arktičkog porijekla, tj. dolazi iz visokih geografskih širina, gdje tone zato što je hladna i teška. Kad se radi samo o Pacifiku, znači da je hladna voda dolazila s Antarktika. Niska temperatura vode već *duboko u pliocenu* navodi na zaključak da je antarktički ledeni pokrov morao ranije postojati i da je već tada »proizvodio« goleme količine hladne vode koja je postupno hladila svjetsko more u dubljim slojevima.

Do sličnog rezultata došlo se klasičnom analizom kopnenih fosila. Na sl. 379. prikazana je srednja godišnja temperatura u srednjoj Evropi od eocena do kvartara. Već početkom oligocena jasno su se počeli nazirati znaci postupnog zahlađenja, koje je trajalo oko 40 milijuna godina. Ovaj pad temperature u srednjoj Evropi (srednja godišnja temperatura u eocenu iznosila je 20–22°, u oligocenu oko 20°, u miocenu 17–19°, u pliocenu 10–14°) nije bio linearan. Neprekidno su se izmjenjivali relativno kraći periodi nešto toplijih i hladnije klime (odnosno razdoblja veće vlažnosti ili aridnosti). Ovo sveopće zahlađenje nije nastupilo samo na sjevernoj hemisferi. Ono je utvrđeno i na južnoj hemisferi, pa je postupno zahlađenje klime, dakle, *planetarni proces*. Na ovaj proces upućuju fosilni ostaci i na kopnu i na

moru. O konačnom uzroku ovog vrlo sporog općeg zahlađenja našeg planeta u kenozoiku danas više nema dileme; ono je posljedica isto tako sporog približavanja polova njihovim današnjim položajima. Tako su se Antarktik i Arktik, a posebno Grenland, »našli« u visokim geografskim širinama, i to više milijuna godina, a već znamo da kopno u visokim geografskim širinama dovodi do *zahlađenja* klime u području pod njegovim utjecajem.

Opća tendencija razvoja klime (odnosno temperature) krajem pliocena i u pleistocenu — kad se zanemari utjecaj glacijala i interglacijala — pomalo postaje sve jasnija. Rezultati istraživanja s južne hemisfere prilično su određeni. Očita je opća tendencija postupnog pada temperature u cijelom pleistocenu kao nastavak pada temperature u pliocenu (i ranije). Pad temperature mora imati jednu granicu; ta je granica — čini se — dostignuta na južnoj hemisferi u mlađem dijelu pleistocena. Zbog golemih površinskih promjena zaledene površine na sjevernoj hemisferi u smjeni glacijala i interglacijala opću tendenciju hoda temperature na sjevernoj hemisferi mnogo je teže odrediti, jer razlike između najnižih temperatura u sukcesivnim glacijalima i razlike između najviših temperatura u sukcesivnim interglacijalima nisu bile tako velike da bi se moglo lako numerički odrediti. (Zato je, npr., na sl. 377. prikazano da su svi glacijali na sjevernoj hemisferi bili jednakо hladni, a svi interglacijali jednakо topli. Sudeći po novijim istraživanjima, te se pretpostavke moraju korigirati, pa se na toj osnovi dolazi do istog rezultata kao i na južnoj hemisferi. Paleobotanička i paleozoološka istraživanja su pokazala da je posljednji glacijal, virm, bez sumnje bio

*najhladniji* pleistocenski glacijal, a svaki je stariji glacijal bio nešto *toplijiji* od mlađeg. Slično vrijedi i za interglacijale: stariji su bili *toplijiji* od mlađih. Tako bi i na sjevernoj hemisferi vrijedilo pravilo da je pleistocensku glacijaciju karakterizira opći pad temperature, usprkos povremenim jakim promjenama temperaturi.

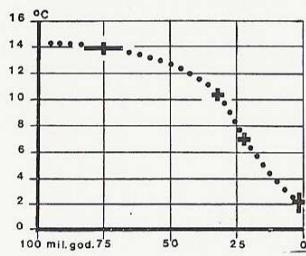
Pad temperature na Zemlji kao cjeline nalazio bi se negdje između jakog pada temperature u višim geografskim širinama na južnoj hemisferi (jer je Antarktik stalno zaleden) i slabijeg zahlađenja sjeverne hemisfere na kojoj su se glacijali smjenjivali s bitno toplijim interglacijalima. (Usprkos krajnjoj shematsnosti prikaza, ta se tendencija zahlađenja klime opaža u dijelu krivulje na sl. 379. koji se odnosi na pleistocen. Svako jako zahlađenje višeg reda veličine bilo je jače od prethodnog, tako da je najniža temperatura bila u posljednjem glacijalu. Isto tako porast temperature u svakom toplog razdoblju nije dostizao razinu iz prethodnog toplog razdoblja, tj. svaki mlađi interglacijal bio je hladniji od prethodnog interglacijala.) Ne može se reći da li je temperatura u posljednjem glacijalu dosegla donju granicu ili će u eventualnom slijedećem glacijalu još više pasti nego u virmu. (To zapravo ovisi o činjenici u kojoj se fazi kenozojske glacijacije upravo nalazimo, a to nije poznato.)

U drugoj polovici pliocena temperatura je već veoma pala i približila se optimalnoj granici za nastup glacijacije. Iako ledenih pokrova u umjerjenim geografskim širinama na sjevernoj hemisferi još nema, vidi se da su promjene temperature mnogo izrazitije nego u prijašnjim fazama. Krajem pliocena i u pleistocenu varijacije temperature postale su neusporedivo intenzivnije nego u »pripremnoj fazi« kenozojske glacijacije. To nedvosmisleno upućuje na zaključak da su na krivulju općeg pada temperature, koji je započeo već u oligocenu, superponirane varijacije temperature, do kojih je došlo u samom pleistocenu. To znači da su ledeni pokrovi (i zaledeno more), kad su jednom već nastali, bitno pridonosili dalnjem *zahlađenju klime*, jer su temeljito poremetili energetsku bilancu u visokim geografskim širinama (veliki albedo snijegom i ledu, povećana noablasta, tj. veliki albedo u području glavnih zapadnih vjetrova i sputropskog pojasa visokog tlaka kao posljedica potiskivanja ciklona u niže geo-

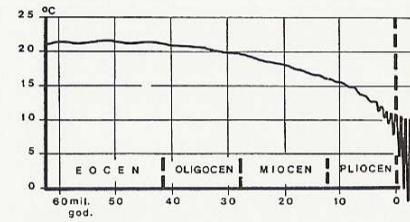
grafske širine). S nestankom najvećeg dijela leda na sjevernoj hemisferi u interglacijalima, temperatura je nekoliko puta bitno porasla. Upada u oči činjenica da su pleistocenske varijacije temperature u poređenju s pretpleistocenskim varijacijama bile mnogo intenzivnije (velika amplituda) i relativno kratkotrajne (uzmimo u obzir da je horizontalno mjerilo u pleistocenu četiri puta krupnije nego u razdoblju prije pleistocena). Ledeni pokrovi nisu bili samo pasivna posljedica klime; oni su samim svojim postojanjem, kad su prešli neku kritičnu granicu, bitno *utjecali* na klimu, oni su »*hladili*« klimu daleko ispod granice do koje je ona pala samo pod utjecajem faktora koji su uzrokovali opći pad temperature u kenozoiku. Iz sl. 379. dolazi se do zaključka da se varijacije temperature u posljednjih 40-ak milijuna godina sastoje od dva dijela: a) dijela prije postanka velikih ledenih pokrova i b) dijela poslije postanka ledenih pokrova.

Za paleoklimatologiju<sup>139</sup>, znanost o klimi prošlosti, važan je problem sinkronosti, istovremeno razvoja pleistocenske glacijacije na obje hemisfere. Postoje prilično jaki dokazi za pretpostavku da je posljednji glacijal bio istovremen na Antarktiku i na Grenlandu, odnosno na sjevernoj hemisferi. Kako je bilo u ranijim glacijalima, za sada se ne može zaključiti ništa posve pouzdano. Ipak, intenzivno proučavanje morskih sedimenata pokazuju da je kenozojska glacijacija bila mnogo kompleksnija nego što se u početku mislio. (Tome nešto pridonosi i prilična konfuzija do koje je došlo primjenom raznih geokronometrijskih metoda, doduše teorijski egzaktnih, ali su mogućnosti kontaminacije tako velike da se rezultati raznih metoda bitno razilaze; dovoljno je samo spomenuti da se procjena trajanja pleistocene od prvog glacijala, ginca, do danas kreću u rasponu od 300 000 godina pa sve do 2 milijuna godina, a to prelazi granicu dopustive razlike do koje obično dolazi upotrebo raznih metoda.) Izgleda da je njenja evoluciju tekla zacijelo ovako.

Približavanjem Sjevernog i Južnog pola njihovu današnjem položaju dolazi do postupnog *ohlađivanja* Zemlje, ali je ono najjače bilo u visokim geografskim širinama, gdje će najpovoljniji uvjeti za pos-



Sl. 378. Temperatura pridnene vode u ekvatorskim širinama Tihog oceana u posljednjih 75 milijuna godina (C. Emiliani, 1954)



Sl. 379. Shematsizirana krivulja temperature tercijara i kvartara u srednjoj Evropi. (Trajanje kvartara prikazano je četiri puta dulje nego što odgovara mjerilu za tercijar.) (P. Woldstedt, 1954)

<sup>139</sup> grč. *palaios* — star; paleoklimatologija — klimatologija geološke prošlosti

tanak ledenih pokrova najprije nastati na velikim otocima (ili otočjima) okruženima morem, tj. ondje gdje postoji *najpovoljnija kombinacija niske temperature i obilne vlage*. Tako su nastajali uvjeti za postanak ledenih pokrova na Antarktici i Grenlandu. Međutim, prema dosadašnjim istraživanjima lako se može zaključiti da postanak ledenih pokrova na Antarktici i Grenlandu ni u kom slučaju nije bio »eksplozivan«, proces, u oba slučaja ledeni su pokrovi nastali tek nakon vrlo dugog vremena, najprije stvaranjem planinskih ledenjaka na najvišim planinama, koji su nakon čitavog niza povlačenja i ekspanzija prerasli u ledene pokrove. Budući da je antarktički ledeni pokrov vrlo velik, njegova je evolucija bila kompleksnija od razvoja grenlandskeg ledenog pokrova. Najprije je nastao ledeni pokrov na Istočnoj Antarktici, zatim na Zapadnoj Antarktici, a tek poslije toga oni su se spojili u jedinstveni ledeni pokrov (J. H. Mercer, 1968). Kopneni led u gorju Jones Mountains na Eights Coast (Zapadni Antarktik) nastao je na prijelazu miocena u pliocen, tj. stariji je od 10 milijuna godina (R. H. Rutherford i dr., 1968), dok je ledeni pokrov postojao prije 5 milijuna godina (H. G. Goodell i dr., 1968), odnosno najmanje prije 4 milijuna godina (J. D. Hays i dr., 1967). Bazalt iz doline Taylor na zapadnoj strani McMurdo Sounda je sinkron s glacijalom starijem od 2,7 milijuna godina, tj. led je tada dopirao do obale (R. L. Armstrong i dr., 1968). Ledenjaci su erodirali stjenovitu podlogu, pa je taj rastresiti materijal koji je ostao u ledu plutozajedno s ledenim bregovima u niže geografske širine; kopnjnjem ledenih bregova taj rastresiti materijal, taložio se na dno okolnih mora kao glacio-marinski sediment. Led (i hladne zračne mase) je ohladio vodu, pa je prije 2,35—3,35 milijuna godina nulta izoterma površinske vode oko Antarktike bila  $5^{\circ}$  sjevernije nego danas. Baza glacio-marinskih sedimenata iz sondi izvadenih oko Antarktike stara je 2 do više od 4 milijuna godina (J. D. Hays i dr., 1967). Glacijalni sedimenti u Kordillerama južne Argentine u Cerro del Fraile stari su više od 2 milijuna godina. (J. H. Mercer, 1969).

Uzorci morskog sedimenta iz Sjevernog ledenog mora sadrže glacio-marinske sedimente stare 6 milijuna godina; faunističke i litološke osobine upućuju na smjeđu brojnih toplijih i hladnijih perioda, ali

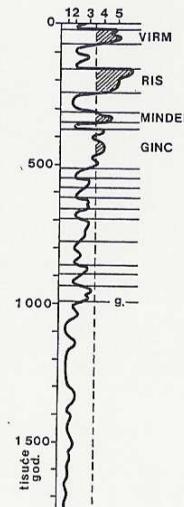
centralni dio Sjevernog ledenog mora *nije* bio zaleđen do prije 700 000 godina. Tek od tada, tj. tek u posljednjih 700 000 godina, postoje dokazi o vrlo intenzivnim varijacijama temperature (Y. Herman, 1970). Očito je da je u najvećem dijelu prošlosti glacijacija Arktika bila ograničena samo na najviše *planine*, a glacio-marinski sediment dobrim dijelom potječe od materijala koji su donosile ledene sante s rijeka što utječe u Sjeverno ledeno more. Iz tog razdoblja, prije 2,5 milijuna godina, potjeće glacijalni sediment s Islanda (I. McDougall i dr., 1966), dok je na Sierra Nevadi star 3 milijuna godina (R. R. Curry, 1966).

Iz svega toga može se zaključiti da je antarktički ledeni pokrov *mnogo stariji* od grenlandskeg ledenog pokrova, tj. glacijacija Antarktike počela je mnogo prije nego na sjevernoj hemisferi, gdje još dugo neće postojati nikakvi ledeni pokrovi. To znači da je posljednja glacijacija na našem planetu počela krajem tercijara, pa sve više autora smatra da je najispravnije reći kenozojska glacijacija (a ne pleistocene ili pak kvartarna glacijacija). Vrlo dugo vremena posljednja glacijacija velikih razmjera bila je *samo* na Antarktici (u ostalim dijelovima svijeta ponedje su postojali samo planinski ledenjaci), a tek mnogo *kasnije* nastaje grenlandski ledeni pokrov. Tek u trećoj fazi, vjerojatno u mindelu, nastaju golemi ledeni pokrovi u umjerjenim geografskim širinama na sjevernoj hemisferi (Sjeverna Amerika, Evropa, Sibir). Bitno je važna činjenica da su ledeni pokrovi u Sjevernoj Americi, Evropi i Sibиру, u mindelu, kao i u oba kasnija glacijala nastali relativno vrlo naglo, neusporedivo brže nego antarktički ledeni pokrov. Osim toga, antarktički i grenlandski ledeni pokrovi *stalno* su postojali od momenta njihova postanka pa sve do danas; njihova se površina nije bitno smanjivala nastupom interglacijala, dok su ledeni pokrovi u Sjevernoj Americi, Evropi i Sibiru barem tri puta nastali i poslije toga su, u geološkom smislu, katastrofalnom brzinom nestajali.

Budući da je antarktički ledeni pokrov ravnomerno pulsirao, tj. da se površina ledenog pokrova u glacijalima i interglacijalima nije bitno mijenjala, klimatske varijacije (odnosno varijacije temperature), uzrokovane smjenom antarktičkih glacijala i interglacijala, nisu bile velike, odnosno bile su velike za antarktičke

uvjete, ali ne tako velike kao na sjevernoj hemisferi. Na taj zaključak upućuju i podaci o intenzitetu atmosferske cirkulacije u tropskom Pacifiku (sl. 380). Intenzitet te cirkulacije konačna je posljedica temperaturnog gradijenta između visokih i niskih geografskih širina. Budući da se horizontalni termički gradijent — zbog ravnomernog pulsiranja antarktičkog ledenog pokrova — nije bitno mijenjan, atmosferska cirkulacija u starijem dijelu pleistocena i mlađim dijelu pliocena nije tako jako varirala (malena amplituda) kao u drugoj polovici pleistocena. Intenzitet atmosferske cirkulacije ovisio je i o temperaturnom gradijentu između ekvatora i Arktika. Vrlo izrazito intenziviranje atmosferske cirkulacije od gincia nadalje (a osobito u mindelu) moglo bi uputiti na zaključak da su na sjevernoj hemisferi nastupili bitno novi uvjeti; odnosno tek u gincu, a još više u mindelu, dolazi do velikog povećanja zaleđene površine na sjevernoj hemisferi. Intenzitet atmosferske

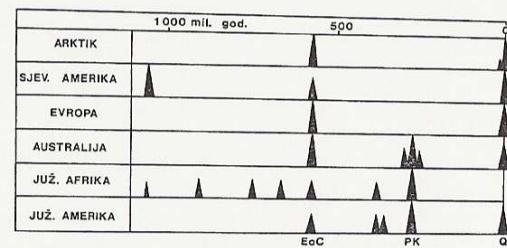
Sl. 380. Intenzitet atmosferske cirkulacije u niskim geografskim širinama Tihog oceana izведен iz brzine taloženja karbonatnih sedimenata; g. — granica pliocena i pleistocena (G. Arrhenius, 1952)



cirkulacije naglo je opadao u interglacijalima. Glacijalima na južnoj hemisferi prije gincia (ili mindela) na sjevernoj hemisferi odgovarala su povremena zahlađenja, ali su ona bila bitno slabija nego što su bila u kasnijim glacijalima.

### 3.6. KLIMA DALEKE GEOLOŠKE PROŠLOSTI

Bitne promjene klime nisu karakteristika samo posljednjeg ledenog doba; klima se neprestano mijenjala sve od momenta postanka Zemljine kore. Pokazalo se da postoje zapravo dva glavna tipa klimatskih razdoblja: a) topla razdoblja i b) hladna razdoblja, glacijacije ili ledena doba. Topla su razdoblja trajala mnogo dulje od glacijacija, pa je »normalno« stanje Zemlje nepostojanje ledenih pokrova u visokim geografskim širinama. Između dugotrajnih toplih razdoblja nalaze se hladna razdoblja, hladna doba, kad su postojali klimatski uvjeti (obilne padaline, niska temperatura) za postanak golemlih ledenih pokrova. Sa sigurnošću se može uzeti da su dosad postojale tri glacijacije (sl. 381): eokambrijska (na prijelazu algonkija u kambriju, prije 600 milijuna godina), permo-karbonska (na prijelazu karbona u perm, prije 275 milijuna godina) i u kvartaru (odnosno pliocenu i kvar-taru), dok o još starijim glacijacijama postoje samo fragmentarni podaci. Glacijacije se javljaju, po svemu sudeći, dosta pravilno, periodički, samo u slučaju kad na dotičnoj hemisferi za to postoje svi uvjeti.



Sl. 381. Pojava glacijacija u prostoru i vremenu; EoC — eokambrij, PK — permo-karbon i Q — kvarter (M. Schwarzbach, 1961)

briju, permo-karbonu i kvartaru, tj. ponovila se svakih 250—300 milijuna godina, dok je na sjevernoj hemisferi ledenih pokrova bilo samo u eokambriju i kvartaru, tj. izostala je permo-karbonska glacijacija, pa je toplo razdoblje neprekidno trajalo 500—600 milijuna godina. Glacijacije, dakle, mogu biti na obje hemisfere, ili samo na jednoj hemisferi. Da glacijacija ne mora biti univerzalna, globalna pojava, najbolje se vidi iz činjenice da je u permo-karbonu na južnoj hemisferi bio ledeni pokrov kontinentskih dimenzija, klima je bila vrlo hladna, organski svijet oskudan, dok je istovremeno u nekim dijelovima sjeverne hemisfere, u vrućoj i vlažnoj tropskoj klimi, nataložena golema ma-

sa organskih ostataka od kojih je nastao kameni ugljen. Klime je općenito bila topla na sjevernoj hemisferi, ali to nikako ne znači da nije postojala razlika između klime viših i nižih geografskih širina. Kao što je u glacijacijama dolazilo do relativno kraćih intenzivnih klimatskih promjena nižeg reda veličine, tako je i u toplim razdobljima dolazilo do povremenih zahlađenja koja su u većini slučajeva ostala bez dubljih tragova; u rijetkim slučajevima iz tih toplih faza potječe i glacijalni sedimenti, ali su oni isključivo lokalne prirode (npr. tragovi glacijacije manjih dimenzija između eokambrija i permo-karbona u južnoj Africi i Južnoj Americi itd.).

### 3.7. UZROCI KLIMATSKIH PROMJENA

Glacijacije ili ledena doba su krize, najmarkantnija razdoblja u razvoju klime. Ali, sve klimatske promjene ne moraju konačno dovesti do ledenih doba (odnosno do stvaranja velikih ledenih pokrova), isto kao što uzrok postanka ledenih doba ne mora biti uzrok klimatskih promjena svih mogućih redova veličine. (Na primjer, izdizanje jedne planine, ili planinskog sistema, može utjecati na aridizaciju klime njene zavjetrine; poznati su brojni primjeri ovakve lokalne ili regionalne promjene klime.) Konačni uzrok postanka ledenih doba, odnosno uzrok klimatskih promjena najvišeg reda veličine, čiji je krajnji rezultat glacijacija — nije poznat. Malo ima slučajeva u kojima s takо malo fragmentarnih podataka (jer erozija sistematski i neprekidno briše tragove iz geološke prošlosti) treba rekonstruirati doista silno komplikiran mehanizam. Već u samom početku razvoja paleoklimatologije opazilo se kako velik utjecaj na klimu ima veličina kontinenata i oceana, geografska raspodjela mora i kopna, nadmorska visina kopna, dimenzije i pružanje velikih planinskih sistema, tok morskog struja, vulkanska aktivnost, naoblaka, količina ugljičnog dioksida i vodene pare u atmosferi i njihov utjecaj na radijaciju, pa su poznati rezultati iz današnjice primjenjivani i na eventualno slične primjere u prošlosti.

Već iz dosadašnjeg materijala intuitivno se može doći do zaključka što bi sve moglo utjecati na promjenu klime. Već smo vidjeli što sve može utjecati na višegodišnje hodove pojedinih klimatskih elemenata. Treba »samo« (»samo« jer, kako smo vidjeli, to je neriješen problem) odrediti granicu između interanualne varijacije nekog klimatskog elementa oko nekog srednjaka, te početka sve učestalije, sistematske promjene u jednom smjeru, čiji je konačni rezultat — promjena klime. Iz dosadašnjeg izlaganja došli smo do zaključka da promjena svakog klimatskog elementa uzrokuje, prije ili kasnije, promjenu svakog drugog klimatskog elementa. Prema tome, promjena klime u pravom smislu riječi, odnosno u smislu same definicije klime, bila bi odraz sistematske, istovremene promjene svih klimatskih elemenata. Osim toga, dosadašnja istraživanja ukazuju na to da se klimatske promjene sastoje od niza klimatskih promjena raznog trajanja i intenziteta, ili ako bismo klimatske promjene prikazali grafički, onda bismo rekli da postoji niz klimatskih promjena razne valne duljine i amplitude; postojao bi čitav spektar klimatskih promjena od nekoliko desetaka ili stotina milijuna godina! Kompleksnost proizlazi iz mogućnosti interferencije (ili superpozicije) klimatskih promjena razne valne duljine, raznog trajanja. Iz čitavog

kompleksa izdvojiti ćemo samo nekoliko primjera, ali ćemo prije toga upozoriti na činjenicu da su se uzroci klimatskih promjena tražili i na Zemlji i u kozmosu, pa se otuda sve teorije klimatskih promjena mogu svesti na dvije skupine: terestričke i kozmičke. (Kao i u vijek u sličnim okolnostima, postaje i kombinacija terestričkih i kozmičkih uzroka, napose kad se radi o klimatskim promjenama višeg reda veličine.)

Već smo vidjeli da je u posljednjim desetljećima došlo do općeg povlačenja planinskih ledenjaka (osim nekoliko izuzetaka), svi mareografi bilježe izdizanje razine svjetskog mora, a u mnogim dijelovima svijeta je dokazano sistematsko otopljanje. Jedan od mogućih uzroka svih tih promjena je trend slabljenja direktnе Sunčeve radijacije kao posljedica promjene koncentracije prašine u atmosferi, a to bi bila posljedica djelovanja čovjeka, iako ima i drugih izvora prašine. Atmosferska prašina  $P$  sastoje se od sljedećih komponenata: kozmičke prašine,  $P_k$ , vulkanske prašine  $P_v$ , morske prašine u obliku raznih soli  $P_m$ , eolske prašine koju vjetar podiže s površine Zemlje  $P_e$  i industrijske prašine  $P_i$ .

$$P = (P_k + P_v + P_m) + (P_e + P_i).$$

Oko 70—75% atmosferske prašine čini eolska prašina, a od ostalih izvora prašine jak je udio industrijske prašine. Osim toga, njen je udio u neprekidnom porastu. Porast količine prašine u zraku do izvjesne granice dovodi do povišenja temperature (F. F. Davitaja, 1965. i 1971) jer čestice prašine apsorbiraju kratkovalnu radijaciju pa se tako zagrijavaju, a s druge strane smanjuju gubitak terestričke radijacije i pojačavaju turbulentno miješanje zraka u nižim slojevima atmosfere. Ako koncentracija prašine prijeđe kritičnu granicu, ona djeluje suprotno nego što je rečeno gore, jer dugotrajnom izolacijom podloge od kratkovalne radijacije temperatura počinje padati, tj. prisutnost velike količine prašine u zraku u duljem razdoblju trebao bi biti uzrok hlađenja klime. U ovu bi skupinu spadao utjecaj vulkanske prašine u duljim razdobljima u geološkoj prošlosti, poznatim po intenzivnoj vulkanskoj aktivnosti. Dakle, između količine prašine i direktnе Sunčeve radijacije postoji obrnuta proporcija; međutim, istovremeno jača (iako ne u istoj mjeri) difuzna radijacija, pa je taj problem

kompleksniji nego što bi se pomislilo u prvi čas. Poznato je da brojne faze intenzivne vulkanske aktivnosti u prošlosti nisu bile praćene zahlađenjem klime.

Ovdje bismo spomenuli i utjecaj ugljičnog dioksida na bilancu radijacije, jer  $\text{CO}_2$  efikasno apsorbira dugovalnu radijaciju u nekim dijelovima spektra. G. N. Plass (1956) je izračunao da bi smanjenjem sadašnje količine  $\text{CO}_2$  u atmosferi na polovicu srednja godišnja temperatura pala za 3,8°. Budući da je isti autor utvrdio sistematsko povećanje količine  $\text{CO}_2$  u posljednjem stoljeću, suvremeno otopljanje klime u većem dijelu svijeta spomenuti autor objašnjava povećanjem emisije  $\text{CO}_2$  u industrijskoj eri. Ovdje vrijedi isti prigorov kao i u prethodnom slučaju. Količina  $\text{CO}_2$  i dalje raste, a otopljanje izgleda da je prestalo oko 1940. godine.

Ta dva procesa mogu se promatrati zajednički u duljim razdobljima. Poznato je da je vulkanska aktivnost povremeno silno jačala u geološkoj prošlosti. Konačna bi posljedica morao biti dugotrajni pad temperature, tj. periodi intenzivne vulkanske aktivnosti s pojačanom ekshalacijom  $\text{CO}_2$  u orogenom fazama trebali su biti praćeni općim zahlađenjem klime. Međutim, povećanje količine  $\text{CO}_2$  u atmosferi moralo bi djelovati u suprotnom smjeru, više  $\text{CO}_2$  u atmosferi, jača apsorpcija dugovalne radijacije, a posljedica bi trebala biti viša temperatura. Koji će od tih procesa imati veću važnost, nije lako utvrditi, to više što golema količina ugljena i karbonatnih stijena iz nekih geoloških razdoblja upućuje na zaključak da je otapanje  $\text{CO}_2$  u morskoj vodi i njegovo vezanje u biljkama i životinjama, od kojih su ostale karbonatne stijene, sigurno utjecalo na količinu  $\text{CO}_2$  u atmosferi. Cini se da se ipak ne bi moglo očekivati neko veće i dugotrajnije povećanje količine  $\text{CO}_2$  i vulkanske prašine u atmosferi. Tako je poznato da je alpska orogeniza bila praćena vrlo živahnim vulkanskim aktivnošću u starijem tercijaru, a ipak njega karakterizira topla klima, dakle suprotno nego što bi trebalo biti po toj teoriji. Geološki profili iz pleistocena nemaju veće količine vulkanske prašine u razdobljima kad je dolazilo do jakog zahlađenja u glacijalima. Tako se i pad temperature u »majom ledenom dobu« nastojao objasniti djelovanjem veće količine vulkanske prašine u atmosferi, dok bi se otopljanje

poslijе njega shvatio kao posljedica izvjesnog »pročišćavanja« atmosfere. (Dakle, suprotno mišljenju nekih autora koji smatraju da u atmosferi ima više prašine.) U tom je smislu interesantan zaključak J. Gentillija (1948), koji je analizirao anomaliju temperature u svijetu 1913. god., u godini poslijе kolosalne erupcije vulkana Katmai (lipanj 1912): U nekim dijelovima svijeta temperatura je bila viša od srednjaka, a u drugim dijelovima svijeta bila je — niža.

Budući da je Sunčeva radijacija konačni pokretač atmosferske cirkulacije, a raspodjela te energije uzrok klimatske diferencijacije, logično je da je uzrok klimatskih promjena tražen u promjeni količine primljene radijacije pretpostavljajući da se bitno mijenjala količina energije koja je dolazila sa Sunca, ili je količina energije bila konstantna, ali se mijenjala nje na raspodjelu na Zemlji.

Uloženo je mnogo truda da se utvrdi kauzalna veza između pješa na Suncu i kratkoperiodskih promjena Sunčeve radijacije s jedne strane, te promjene temperature i padalina. Mnogi smatraju da ta veza postoji, ali su rezultati iz cijelog svijeta (a ne samo iz jednog njegova dijela) obično kontradiktorni. Vodeći autoritet na tom području B. L. Dzerzhevskii (1962) smatra: „...pokušaj da se utvrdi direktna ovisnost klimatskih fluktuacija u nekoj točki o Sunčevu aktivnosti nije dala, niti može dati, pozitivne rezultate jer se time zanemario snažan faktor — opća cirkulacija atmosfere. Genetska veza Sunce-klimatskih promjena nižeg reda vrlo je kompleksna i indirektna jer se između njih nalazi opća cirkulacija atmosfere. To znači da za klimatske promjene nižeg reda veličine treba utvrditi lokaciju akcionih centara. R. V. Abramov (1966) je analizom morfometrijskih karakteristika islandskog minimuma utvrdio da je njegov centar od 1900. do 1950. god. pokazivao opću tendenciju spuštanja u niže geografske širine. Suprotno tome, u istom razdoblju centar azorskog maksimuma pokazao je tendenciju premještanja u više geografske širine; zapravo, centar azorskog maksimuma sve se više premještalo na sjeveroistok. U spomenutom razdoblju centar azorskog maksimuma pomakao se sa  $32^{\circ}$  N na  $34^{\circ}$  N, a njegova geografska duljina smanjila se sa  $36^{\circ}$  W na  $30^{\circ}$  W. Očito je da se, kao posljedica toga, morala promjeniti i cirkulacija koja je vezana uz azorski maksi-

mum. Nisu potrebni dokazi za svaki drugi akcioni centar, jer i oni pokazuju odgovarajuću tendenciju premještanja.

Može se pretpostaviti i druga mogućnost, a to je da je emisija Sunca varirala, ali s vrlo dugim periodom. G. Simpson (1934) pretpostavlja da je Sunce dugoperiodska promjenljiva zvijezda, tj. da se intenzitet njegove radijacije mijenja u geološkoj prošlosti. U periodima jačeg zračenja Sunca rasla je temperatura, a time se povećavala evaporacija iz svjetskog mora. Posljedica je bila povećanje količine padalina, a to je jedan od uzroka povećanja akumulacije snijega i leda, jedan od uvjeta za postanak ledenih pokrova. Odnos između promjene radijacije Sunca i količine padalina postavljen je prilično komplikiran, ali ostaje paradoks da su, po ovoj hipotezi, neki glacijali bili posljedica pada temperature, a drugi su nastali površnjem temperature (zapravo dva glacijala uzrokovana su porastom temperature, a dva glacijala padom temperature).

Vrlo veliku popularnost svojevremeno je stekla teorija M. Milankovića (1930; 1948), koji je pošao od pretpostavke da se ukupna količina Sunčeve radijacije koja je dolazila do Zemlje nije mijenjala, ali se mijenjala raspodjela te energije na pojedine dijelove Zemlje. Uzrok je te nejednakosti raspodjele zračenja astronomiske prirode, odnosno posljedica je periodske promjene elemenata Zemljine putanje. Nagib ravnine ekliptike mijenja se od  $21^{\circ}39'$  do  $24^{\circ}36'$  u periodu oko 45 000 godina. Kad je nagib bio velik, godišnja su doba bila veoma izražena. Osim toga, zimi se razlika temperature između ekvatora i polova povećavala. Ekscentricitet elipse Zemljine putanje mijenja se gotovo od 0 (kružnica) do 0,068 (izdužena elipsa). Ta promjena ekscentriciteta vrši se u periodu otprilike od 92 000 godina. Kod najvećeg ekscentriciteta količina primljene radijacije u afelu razlikuje se od primljene radijacije u perihelu za oko 30%. Zemlja je danas najbliža Suncu početkom siječnja (perihel), no perihel se pomiče; to je precesija ekvinokcija, čiji period iznosi 21 000 godina. Ovo je važno zato što je godišnje doba u koje pada perihelni položaj Zemlje kraće od drugog dijela godine. Tako je zima u naše doba na sjevernoj hemisferi kraća od ljeta.

Sam M. Milanković ističe da sve te varijacije elemenata Zemljine putanje vrlo malo mijenjaju ukupnu godišnju količinu

energije koju prima Zemlja od Sunca. Ali, on smatra da su dovoljno velike razlike u raspodjeli te energije po godišnjim dobitima i na različitim geografskim širinama. Mukotrpnim proračunima M. Milanković je došao do poznate »krivulje osunčanja«, koju su drugi autori (prije svega W. Köppen) sinkronizirali s pojmom glacijsala i interglacijsala po Penck-Brücknerovoj shemi.

Usprkos svoj egzaktnosti Milankovićeva teorija nije mogla objasniti mnoge bitne činjenice, a to su:

Promjene elemenata Zemljine putanje postojale su i prije kvartara, u cijelom tercijaru i ranije, ali glacijacije nije bilo; Milankovićeva teorija ne može objasniti postupni pad temperature u većem dijelu kenozoika (sl. 379). Kvartarna glacijacija nije nastupila istovremeno na obje hemisfere. Danas se s velikom sigurnošću može uzeti da je ledeni pokrov na Antarktici nastao davno prije postanka ledenih pokrova na sjevernoj hemisferi u umjerjenim širinama (vjerojatno je izuzetak grenlandski ledeni pokrov koji je možda nastao poslije antarktičkog ledenog pokrova, a prije sjevernoameričkog, evropskog i sibirskog ledenog pokrova u gincu ili mindelu). Prema Milankovićevim proračunima posljednji glacijal, virm, trajao je od 144 000 do 21 000 godina prije današnjice, dok se radiokarbonskom i drugim metodama utvrdilo da je počeo prije oko 70 000 godina, a prestao je prije 10 000 godina. To je prevelika razlika, a da bi se nekako mogla prihvati. Prema Milankoviću, zahlađenje u višim geografskim širinama bilo je praćeno istovremenim porastom temperature u nižim geografskim širinama.

Danas je definitivno dokazana činjenica da je u glacijalima pala temperatura i u tropima, iako manje nego u višim geografskim širinama, tj. glacijali su bila razdoblja općeg zahlađenja Zemlje od jednog do drugog pola. D. M. Shaw i W. L. Donn (1968) su pomoću Ademova termodinamičkog modela izračunali promjene temperature na površini Zemlje do koje je došlo varijacijama insolacije, kako je izračunao Milanković. (Naime, Milanković je izračunao varijacije insolacije do kojih dolazi promjenom astronomskih elemenata Zemljine putanje, ali ih nije »preračunao« u promjene temperature na površini Zemlje, odnosno nije izračunao kolike bi temperaturne promjene nastale na temelju

izračunatih varijacija insolacije.) Izračunato je da su u ekstremnim uvjetima na  $25^{\circ}$  N moguća zahlađenja za  $3.1^{\circ}$ , a na  $65^{\circ}$  N samo za  $2.7^{\circ}$  u toku Milankovićevih ciklusa. Na kritičnoj paraleli  $65^{\circ}$  N, u epohama minimalne radijacije, srednje zahlađenje iznosilo je samo  $1.4^{\circ}$ . Nema sumnje da su to premalene promjene, a da bi mogle pokrenuti stvaranje golemih ledenih pokrova. Zahlađenje za  $1.4^{\circ}$  je istog reda veličine kao i pad temperature u »malom ledenom dobu«, a poslijе toga, po svemu sudeći, nije počelo stvaranje ledenih pokrova izvan Antarktike i Grenlanda, nego je počeo suprotan proces, povlačenje ledenjaka u planinama i otopljavaњe sjeverne hemisfere.

Da bi se izbjegle navedene teškoće, neki su autori skloni tzv. solarno-topografskoj teoriji, po kojoj bi glavni uzrok postanka ledenih doba bio na površini Zemlje, u raspodjeli kopna i mora, visini reljefa, udaljenosti kopna od pola, a varijacije insolacije bile bi uzrok smjene toplih i hladnih faza onda kada ledeni pokrovi već postoje.

Uzrok glavnih klimatskih promjena, odnosno uzrok ledenih doba, tražen je i izvan Zemlje, u svemiru. Interstelarna materija, tamni oblaci fine prašine, djelomično ili potpuno slabe svjetlosti koja prolazi kroz njih. Tako bi mogla oslabiti i Sunčeva radijacija koja dolazi na Zemlju u onim razdobljima kad Sunce, zajedno sa Zemljom, prolazi kroz relativno gušće dijelove tamnih oblaka. Pokazalo se da je interstelarna materija tako rijetka da udaljenost Sunce-Zemlja, koja je u odnosu prema galaktičkim dimenzijama vrlo mala, nije dovoljna da bi došlo do slabljenja Sunčeve radijacije u tolikoj mjeri da bi se ono primijetilo na Zemlji.

Činjenica da se u svim višim planinama na svijetu nalaze planinski ledenjaci, iako današnji uvjeti za njihovo održavanje nisu ni približno povoljni kao u nekim prijašnjim razdobljima, davno je navela na zaključak kako mora postojati uska genetska veza između visokog reljefa i klimatskih promjena koje mogu dovesti do stvaranja velikih planinskih ledenjaka, a oni eventualno mogu »prerasti« čak u ledeni pokrove (tzv. reljefna hipoteza). Zato su se glacijacije dovodile u vezu s orogenezama: glacijacije su bila razdoblja visokog reljefa. Ali, višestruko nastajanje i nestajanje ledenih pokrova na sjevernoj hemisferi u pleistocenu teško

se može objasniti samo utjecajem reljefa; visoki reljef čini se da je bio samo jedan od uzroka za opće inicijalno zahlađenje i pružio je mogućnost za početno akumuliranje snijega, firna i leda onda kada je temperatura bila dovoljno niska da dođe do zahlađenja. Klimatske promjene nižeg reda treba tražiti u drugim uzrocima, zato i u samom mehanizmu pulsiranja ledenih pokrova. U miocenu, plicencu i pleistocenu srednja visina reljefa na kontinentima povećala se za 500 m, tako da danas iznosi 875 m. To je dovelo do pada temperature na kontinentima za  $3^{\circ}$  (K. K. Markov i dr., 1968), a znatno više od toga na višim nadmorskim visinama, dok je na svijetu kao cjelini taj pad temperature iznosio samo oko  $1^{\circ}$  (R. F. Flint, 1971). Utjecaj reljefa osobito je važan zato što visoki reljef povećava naoblaku. S većom naoblakom raste albedo Zemlje. Izdizanje planina u pleistocenu bilo je koncentrirano u nekim dijelovima svijeta. Veliki Kavkaz izdignut je 2–3 km, Pamir 5 km, Istočni Sajan 1 km, Himalaja 2,5 km, Coast Ranges 1,5 km, Ande u Peruu 1,6 km itd. To se izdizanje negdje nastavilo i u holocenu. Alaj se izdigao 310 m, Trans-

alaj 770 m, Sjeverni Pamir 840 m itd. Tačko je »jedan od najviših planinskih sistema na svijetu dobrim dijelom nastao — doslovno rečeno — pred očima čovjeka« (E. V. Maksimov, 1969).

Klima prošlosti nastojala se objasniti i paleogeografskim promjenama, većim ili manjim promjenama geografske raspodjele kopna i mora. Pod geografskom raspodjelom kopna i mora, koja eventualno može dovesti do postanka ledenih pokrova, misli se takva raspodjela kopna i mora koja omogućuje transport vodenе pare na relativno hladniji kontinent, u čijem se barem jednom dijelu nalazi viši reljef. U tome je, npr., golema važnost sjevernog dijela Atlantskog oceana, Sredozemnog mora i Meksičkog zaljeva za postanak pleistocenskih ledenih pokrova na sjevernoj hemisferi, odnosno južnog Atlantika, Pacifika i Indijskog oceana za glacijaciju Antarktike. Položaj kontinenata u višim geografskim širinama omogućuje inicijalno zahlađenje kao pripremu za nastup glacijacije, jer se kontinent u višim geografskim širinama zimi jako ohlađi. Oko 40 milijuna godina dugo postupno ohlađivanje klime prije nastupa kenozojske glacijacije može se objasniti samo približavanjem Sjevernoga pola bazenu Sjevernog ledenog mora (sl. 382), odnosno Južnog pola Antarktice. Nastupao je proces postupne termičke izolacije Arktika i Antarktika. Neospredni povod postanka ledenih pokrova uzima se da je bilo oživljavanje orogene aktivnosti i epirogenih pokreta (u okviru alpske orogeneze), odnosno bilo je potrebno postojanje planina. To je omogućilo postanak planinskih ledenjaka koji su u povoljnim uvjetima prerasli u jedmontske ledenjake i konačno u ledene pokrove. Mnogo je veći problem uzrok smjene glacijske i interglacijske u toku jedne glacijske; ovaj problem još nije riješen.

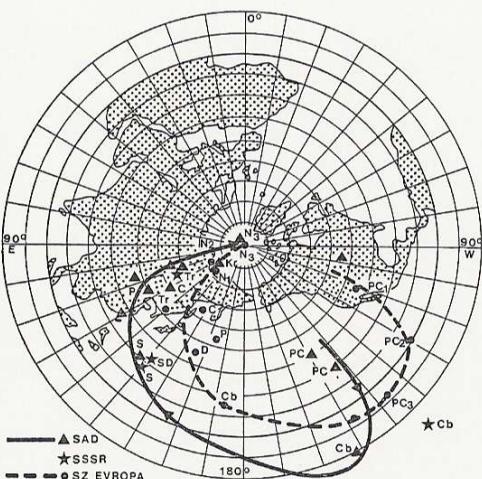
Budući da su svi pleistocenski, odnosno kenozojski ledeni pokrovi na obje hemisfere bili razvijeni u visokim i osobito u umjerenim geografskim širinama, moralo se zaključiti da je blizina pola jedan od bitnih faktora za postanak ledenih pokrova, jer je samo tako moguć pad temperature do potrebne granice. Zato se danas općenito uzima da mora postojati kauzalna veza između postanka ledenih pokrova i odnosa kontinenta prema polu. Tako se već u samom početku razvoja paleoklimatologije došlo do zaključka da se geogra-

ski položaj (i konture) kontinenata bitno mijenja. Nas u ovom slučaju neće podrobniye zanimati problem je li Zemljin os bila fiksna, a kontinenti su mijenjali svoj međusobni položaj i položaj prema polovima, ili je i Zemljin os (odnosno polovi) mijenjala svoj položaj. Danas je definitivno usvojena činjenica da kontinenti plutaju, tj. u geološkoj prošlosti su stalno mijenjali ne samo svoje konture (tj. veličinu), nego se neprekidno mijenjala i međusobna udaljenost između kontinenata, te udaljenost kontinenata od polova; to je glasovita Wegenerova teorija o plutaju kontinenata. Većina istraživača smatra da je Wegenerova teorija u biti točna, a osim klasičnim metodama potvrđena je i paleomagnetskom metodom.

Svaka magnetična stijena ako se zagrijava izgubi magnetizam. Ako se takva stijena izlijevanjem na površinu Zemlje ili u litosferu ohlađi, ona opet poprima magnetizam nađe li se u magnetskom polju. To je tzv. termoremanentni ili remanentni magnetizam, koji se najbolje očuva u skrivenoj lavi. Kad se lava ohlađi ispod izvjesne temperature (Curriejeva točka), onda se ferromagnetski minerali ponovo magnetiziraju u postojećem magnetskom polju Zemlje i ujedno se usmjeri prema Zemljinim magnetskim polovima u času ohlađivanja lave. Tako se očuvaju »fossilni« magnetizam ili paleomagnetizam. (Ta je metoda kasnije uspješno primijenjena i kod sedimentnih stijena.) Posebnim metodama mogu se izračunati magnetska inklinacija i deklinacija u momentu skručivanja lave. Na taj način uspjela se utvrditi putanja sjevernog magnetskog pola od proterozoika do danas (sl. 382) na sjevernoj hemisferi (te putanja Južnog pola na južnoj hemisferi). Pretpostavlji se da su magnetski i geografski polovi uvek bili povezani kao što su danas, može se doći i do promjene položaja geografskih polova, a time i do promjene položaja svih klimatskih zona. Osim toga, određivanje položaja polova u raznim geološkim razdobljima pomoći remanentnog magnetizma iz stijena s raznih kontinenata dalo je

različite rezultate. To se uzima kao dokaz da se nije mijenjao samo položaj polova, nego se to ujedno smatra dokazom da se međusobni odnos kontinenata s vremenom mijenja, tj. paleomagnetska istraživanja istovremeno su potvrdila da se mijenjao odnos između polova i kontinenata. S druge strane dokazano je da su i kontinenti plutali raznom brzinom u raznim smjerovima, tj. mijenjao se odnos između pojedinih kontinenata. Paleomagnetska su istraživanja uskoro toliko usavršena da je dokazano i »rotiranje« plutajućih kontinenata, a i polovi se, čini se, nisu gibaljno jednolik nego u »skokovima«.

Tako je riješen i stari problem raspodjele glacijsnih tragova permo-karbonske glacijacije na južnoj hemisferi. Naime, glacijsni sedimenti permo-karbonske stariosti otkriveni su u današnjoj tropskoj Africi, u Brazilu, Indiji i drugdje. Kako spojiti današnju vruću klimu tih krajeva s postojanjem golemog ledenog pokrova, odnosno ledenog doba, u permo-karbonu. Izgleda da se taj problem ne može riješiti drukčije, nego na slijedeći način. Današnji kontinenti na južnoj hemisferi, zajedno s Madagaskarom i Indijskim oceanom, u permo-karbonu bili su okupljeni u jedinstven prakontinent Gondvanu, koja je bila opkoljena oceanom. A upravo u permo-karbonu negdje u području Gondvane bio je Južni pol. Tako je nastala idealna situacija za postanak golemog ledenog pokrova. To je kopno u blizini pola (ili oko njega), a oko kopna je bilo more. Permo-karbonska glacijacija južne hemisfere čini se da je bila istog tipa kao glacijacija Antarktike u kenozoiku, samo što je površina Gondvane bila veća od površine Antarktike danas. Istodobno na sjevernoj hemisferi nije bilo ledenih pokrova. Poslije toga Gondvana se raspala na dijelove, koji su se međusobno udaljili, da bi se konačno našli u svom današnjem položaju i u različitom odnosu prema današnjem Južnom polu. Otuda tragovi glacijacije npr. u tropskoj Africi, koja je u permo-karbonu bila u visokim geografskim širinama.



Sl. 382. Premještanje sjevernog magnetskog pola u geološkoj prošlosti prema paleomagnetskim podacima iz SAD, sjeverozapadne Evrope i SSSR-a. PC, PC<sub>1</sub>, PC<sub>2</sub> i PC<sub>3</sub> — proterozoik; Cb — kambrij; S — ordovicij i silur; D — devon; C — karbon; P — perm; Tr — trijas; Kr — kreda; Ni — eocen; Nz — oligocen i N<sub>3</sub> — gornji tercijar i kvartar (A. G. Komarov; izvor: M. Schwarzbach, 1961)