

UVOD

Poznavanje osnovnih problema ledenih doba dovodi nas do zaključka da je glacijacija zacijelo jedan od najkompleksnijih procesa na našoj planeti. To proizlazi iz činjenice da vrijeme trajanja glacijacije, u relaciji s njenim dimenzijama i direktnim utjecajem na prirodnu sredinu u kojoj nastaje, daleko nadilazi sve poznate procese sličnog ili istog reda veličine. Naime, glacijacija kao proces kontinentskih ili čak planetarnih dimenzija u izrazitoj je disproporciji s vremenom u kojem nastaje, razvija se i nestaje. Kompleksnost glacijacije proizlazi i iz činjenice da ona unosi u prirodu goleme promjene koje su neuporedivo veće nego što su bile ikada prije u odgovarajućem ili čak i mnogo duljem vremenskom periodu. Glacijacija mijenja prostorni odnos kopna i mora; uzrokuje izdizanje i spuštanje kopna; regulira fluktuacije morske razine; temeljito mijenja fizička i kemijska svojstva svjetskog mora, a time i čitav niz komponenata uzročno-posljedično vezanih uz to; određuje sistem morskih struja; modificira ili stvara posebnu atmosfersku cirkulaciju i pri tome mijenja vrijednost, odnosno veličinu, svih meteoroloških elemenata; silno ubrzava ili usporuje sve geomorfološke procese. Za posljednju je glacijaciju bitno to da je unijela goleme promjene u organski svijet pa je u izvjesnoj mjeri utjecala i na evoluciju čovjeka.

Kao i kod svih drugih prirodnih procesa, praktički sve pojave povezane uz glacijacije, odnosno klimatske promjene, moraju se objasniti uzajamnim djelovanjem samo nekih, ali vrlo usko povezanih faktora. Otkrivanje i uzajamno djelovanje tih faktora dovodi do spoznaje osnovnih uzroka klimatskih promjena.

Glacijacija (napose kvartarna) vanredno je kompliciran prirodni proces. Usprkos tome, nastojat ćemo je shvatiti kao manje-više *pravilnu pulsaciju* čiji je tok, međutim, bio poremećen. Po očuvanim ili poznatim fragmentima pokušat ćemo rekonstruirati jedan *pravilan mehanizam* koji nastaje, pulsira i nestaje u skladu s dubokom zakonitošću i sa potpunom određenom tendencijom razvoja. Na temelju poznatih činjenica, očito je da glacijacije regulira zakon optimuma, tj. svi procesi uvjetovani glacijacijom — isto kao i sama glacijacija — određeni su maksimalnom i minimalnom granicom preko koje se ne može prijeći a da se pri tom bitno ne poremeti tok razvoja.

Proučavanje posljedica posljednje glacijacije započelo je u alpskim krajevima, odakle se kasnije proširilo i u ostale dijelove svijeta. Zato sav rad i sve pretpostavke do danas nose jak biljeg »alpocentrizma«, jer se gotovo sve promatra iz sjevernohemisferske perspektive. U skladu s aktu-

alizmom u pravom smislu riječi, sva razmatranja o mehanizmu glacijacija moraju se temeljiti i verificirati na današnjem stanju glacijacije Antarktike. Ako se zna da je u maksimumu kvartarne glacijacije na Antarktici led prekrivao samo oko 13% površine više nego danas¹, onda je jasno da je Antarktika »živi fosil« gdje su — iako glacijacija nije u maksimumu — očuvani svi glavni procesi vezani uz kontinentsku glacijaciju velikih dimenzija. Postojanje golemog kontinuiranog ledenog pokrova te specijalna morska i atmosferska cirkulacija navodi na zaključak da su procesi, vezani uza sve ledene pokrove u prošlosti, vjerojatno u suštini bili slični današnjim procesima na južnoj hemisferi.

Opće poznavanje prirode upućuje nas na zaključak da i glacijaciju moramo shvatiti i tretirati kao prostorno-vremenski dinamički sistem, odnosno kao proces u stalnom, neprekidnom stvaranju i nestajanju, proces gdje su sve komponente promjenljive. Zato, da bi se dublje shvatili procesi u vezi s glacijacijama, u promatranje se moraju unijeti dva bitno važna elementa. Naime, procesi, vezani uz glacijacije, nerazdvojno su povezani s *vremenom*, pa ćemo tu činjenicu neprestano imati na umu. Samo prostorno definiranje nije uvijek dovoljno; proces kao što je glacijacija mora se tačno vremenski odrediti. Na to će se misliti kad se spomene riječ inercija. Upravo će inercija biti bitno važna za objašnjenje nekih prividnih »neslaganja« u razvoju ledenih pokrova.

Drugi element, koji se mora imati na umu i na kojem se mora osnivati rad, jest — *led*. Značajno je da u većini pokušaja objašnjenja klimatskih promjena nalazimo malo nastojanja da se bitne promjene objasne samom fizičkom egzistencijom ledenih pokrova. Nestajanje ili bitne promjene ledenih pokrova s desecima milijuna kubnih kilometara leda uvijek su bili više-manje pasivna posljedica upravo neznatnih ekstraglacijskih promjena. Osim toga, rijetko se evolucija ledenih pokrova pokušavala dovesti u vezu s promjenama u njihovoj strukturi; mehanizam pulziranja ledenih pokrova nije se nikada ozbiljnije nastojao dovesti u vezu s procesima i svojstvima samih ledenih pokrova. U našem radu pošli smo od pretpostavke da većina poznatog materijala snažno podupire *terestrička naziranja* o uzrocima ledenih doba. U tom smislu sva kasnija izlaganja osnivati će se na toj pretpostavci.

UZROCI I GEOGRAFSKA STRUKTURA GLACIJACIJA

Uzroci i evolucija glacijacije. Glacijacija će nastupiti samo u onom slučaju kad na kopnu (ili kopnima) kontinentskih dimenzija — ili u početku razvoja ledenog pokrova barem na jednom dijelu kontinenta — fizički uvjeti (ili preciznije: odnos temperature i padalina) budu takvi da u stanovitom nizu godina jedan dio snijega ostane neotopljen. Cijela problematika uzroka ledenih doba svodi se zapravo na problem stvaranja geografske sredine koja će omogućiti najpovoljniju glaciogenu kombinaciju temperature i padalina.

¹ R. F. Flint, *Glacial and Pleistocene Geology*, New York — London 1957, str. 52.

U teoriji glacijacije treba razlikovati dva problema, odnosno dvije strane istog problema. Prvo je problem općeg, primarnog uzroka glacijacije, tj. problem pronalazjenja, utvrđivanja faktora koji direktno dovode do stvaranja ledenih štitova. To su tzv. geografski faktori. Drugi je problem vezan uz evoluciju već postojećih ledenih pokrova. Postavlja se pitanje: kako objasniti mehanizam pulsiranja i konačno nestanak glacijacije, kad se zna da se primarni geografski faktori ne mogu bitno promijeniti u toku relativno kratkog trajanja glacijacije. Budući da sve hipoteze o kauzalnom odnosu reljefa glacijacije ne mogu potpuno objasniti ovaj drugi problem, obično se pribjegavalo drugim faktorima, pretežno astronomskim. Po svemu sudeći, ovaj je problem — problem evolucije već postojeće glacijacije — čini se, mnogo kompliciraniji od problema samog postanka ledenih doba. U tom smislu težište našeg rada bit će na upoznavanju mehanizma pulsiranja i nestanka ledenih pokrova, polazeći od pretpostavke da se *osnovni regulator evolucije ledenih pokrova nalazi u njima samima*, a ne izvan njih.

Orogeneze i epirogeneze i glacijacije. Primarni uzrok — zapravo jedan od uzroka — ledenih doba jest, po mišljenju većine autora, prilično jasan. Kauzalna veza između visoko razvijenog reljefa i glacijacija jest činjenica koja je odavno poznata; vrijednost, odnosno istinitost, te spoznaje danas više nije potrebno dokazivati. Ide se daleko i tvrdi se da je problem konačnog uzroka klimatskih promjena problem uzroka orogeneza², jer one uzrokuju bitne promjene u horizontalnom i vertikalnom razmještanju kopna i mora. (Vidjet ćemo da je ovo tačno, ali je to samo jedan dio istine.) To se osniva na činjenici da je jedna od posljedica orogeneza i epirogenih pokreta bitan porast turbulentnosti atmosfere³. Osim toga, orogeneze i epirogeni pokreti mogu transformirati morsko dno, tj. u klimatološkom smislu morsku površinu, u pošumljene ravnice, planinske nizove i visoke platee. Time se znatno povećava prosječna visina kopna. Takve topografske, a s njima u vezi i klimatske, promjene (napose povećanje naoblake) izazivaju opće sniženje temperature, pa ako su planine dovoljno visoke, na njima se mogu razviti ledenjaci koji eventualno mogu prerasti i u ledene pokrove. Zato su najveće krize u geološkoj historiji Zemlje bile praćene ledenim razdobljima. To je primijećeno već u samom početku (C. Lyell i napose J. D. Dana, 1856), a do maksimuma je razvijena u poznatoj »reljefnoj hipotezi« o uzrocima klimatskih promjena (W. Ramsay, 1910 i 1924). U najegzaktnijem obliku, kvantitativno razrađena, ta je teorija povezana uz rad C. E. P. Brooks⁴. Iako se izdizanje kopna više ne smatra jedinim uzrokom klimatskih promjena, i dalje ostaje činjenica da je postojanje planina i visočja bitan uvjet za postanak ledenjaka i eventualno ledenih pokrova, ali nije uzrok klimatskih promjena kad led već postoji⁵. Treba naglasiti još jednu činjenicu. Nije stvarno pretpostavljanje orogeneza golemih horizontalnih dimenzija i iz-

² R. F. Flint, op. cit., str. 481.

³ C. E. P. Brooks, Geological and Historical Aspect of Climatic Change u zborniku Compendium of Meteorology, izdavač T. F. Malone, Boston 1951, str. 1115.

⁴ C. E. P. Brooks, Climate through the Ages, London 1950.

⁵ R. F. Flint, op. cit. str. 500.

dizanje čitavih kontinenata »en bloc« kao preduvjet za postanak glacijacije. Ali nisu svi tektonski i epirogeni pokreti bili važni za započinjanje glacijacije. Kad se smatra da su orogeneze i epirogeneze jedan od bitnih uzroka glacijacija, onda treba misliti na vremenski i prostorno ograničene procese: dolaze u obzir samo pokreti u visokim geografskim širinama, koji omogućuju stvaranje planinskih ledenjaka; ovi — ako postoje i drugi uvjeti — mogu prerasti u pijedmontske ledenjake, odnosno u ledene pokrove.

Geografski razmještaj kopna i mora. Drugi je bitni faktor za postanak glacijacije najpovoljniji prostorni razmještaj kopna i mora. *Pod povoljnim prostornim razmještajem kopna i mora*, kao o jednom od faktora koji dovodi do glacijacije, misli se na takav položaj koji će omogućiti dovoljno ohlađenje kopna u toku zimske polovice godine, a veličina i konfiguracija kopna bila bi takva da je moguće pritjecanje vlažnih *maritimnih masa*. Taj odnos mora biti optimalan ili vrlo bliz njemu. Prevelika kontinentska masa, odrezana od maritimnih zračnih masa visokom planinskom barijerom (npr. Azija), ne može biti povoljna za razvoj ledenog pokriva. Isto tako kopno premalene dimenzije, čak i uz najpovoljnije ostale uvjete (npr. Island), ne može biti osnova za razvoj glacijacije. Međutim, odnos kopno-more mnogo je širi pojam; pod njim se misli i na sistem morskih struja koje su vrlo važne za evoluciju ledenog (ledenih) pokriva.

Blizina pola. Treći faktor, bitno važan za postanak glacijacija, jest blizina pola, jer ona određuje veličinu jednog od najvažnijih glaciogenih elemenata — određuje veličinu temperature. To se osniva na činjenici da kopnena masa u nižim geografskim širinama bitno utječe na porast temperature, a u višim geografskim širinama utječe na sniženje temperature. Tako prostrana, kopnena masa u nižim geografskim širinama postaje puštinja a u blizini pola hladna tundra⁶.

O problemu kretanja polova već se dugo raspravlja u nauci. Kojom brzinom i kojim smjerom su se polovi kretali u geološkoj prošlosti, još nije tačno ustanovljeno, ali se poznavanjem dosadašnjih rezultata istraživanja ipak sa sigurnošću može pretpostaviti da je blizina pola morala biti jedan od glavnih uvjeta za nastup glacijacije, jer se prekvartarne glacijacije ne mogu ni zamisliti bez pretpostavke da se relativni položaj polova prema kontinentima bitno mijenjao. Primijećena uska povezanost između glacijacija i starih kontinentskih masa⁷ sigurno nije slučajna, nego upućuju na izvjesno relativno pravilno, možda čak i na kružno kretanje polova⁸. To bi bio jedan od uzroka da su se glacijacije uvijek javljale u višemane istim područjima.

Kretanje polova obično se povezivalo s poznatom pretpostavkom o promjeni međusobnog odnosa između kontinenata, odnosno s plutanjem kontinenata. Budući da je plutanje kontinenata neopisivo polagan, ono

⁶ C. E. P. Brooks, op. cit., str. 133.

⁷ J. Tricart i A. Cailleux, Cours de Géomorphologie. Modèle glaciaire et nival, Paris s. a., str. 81.

⁸ E. Irving i R. Green, Polar movement relative to Australia, Geophys. J. 1, 1958, 1, 64.

dolazi u obzir samo pri traženju primarnog uzroka glacijacija, jer utječe na geografski razmještaj kopna i mora. Plutanje je tako polagano da nije moglo utjecati na promjenu odnosa kopno-more u toku glacijacije i deglacijacije.

Periodičnost glacijacija. Ako su orogeneze i epirogeneze (a time indirektno i glacijacije) u najužoj genetskoj vezi s horizontalnim kretanjem kontinentskih blokova, onda bi se iz činjenice da su glacijacije oduvijek bile povezane s kontinentским štitovima i da — kao i orogeneze — vremenski sežu u nedoglednu geološku prošlost, mogao izvesti zaključak da je plutanje kontinentata primordijalna geotektonska sila koja djeluje već od trenutka konsolidacije Zemljine kore⁹. Periodičko, višestruko boranje geosinklinala na rubovima starih kontinentских štitova navodi na zaključak da je plutanje kontinentata zapravo osciliranje u prilično strogo određenim granicama, gdje bi geosinklinale određivale veličinu horizontalne promjene. Na ovaj zaključak upućuje i činjenica da su stari kontinentски štitovi postepeno »rasli«, tj. povećavali svoje površine poslije (odnosno u toku) svake orogeneze (E. Suess 1886), pa se i »slobodan prostor« između starih masa, prostor u kojem one mogu plutati, stalno smanjivao¹⁰.

Danas se općenito smatra da se orogeneze ciklički javljaju pa bi, prema tome, i razdoblja između sukcesivnih orogeneza bila manje-više jednaka. To bi u genetskom smislu značilo da je najdublji uzrok svih tih procesa neiscrpan kad može upravljati procesima koji bi, po takvom shvaćanju, bili pravi perpetuum mobile. Budući da izvor u skladu s prirodnim zakonima, nikako ne može biti neiscrpan, onda se u svakoj etapi (ili, kako se obično kaže, ciklusu) mora javljati određeni »deficit«, tj. horizontalne dimenzije plutanja u svakoj etapi (»ciklusu«) moraju biti sve manje, a vrijeme trajanja ciklusa — sve kraće. Iz toga bi se moglo zaključiti da bi vrijeme između dviju sukcesivnih orogeneza moralo biti sve kraće (polazeći od prve orogeneze prema današnjici). U tom smislu, suprotno općem mišljenju koje dovodi glacijacije u neposrednu vezu s orogenezama a kojim se smatra da je orogeneza gotovo jedini uzrok glacijacije, moglo bi se reći da se glacijacije (samo u slučaju kad bismo bez rezerve prihvatili pretpostavku o direktnoj uzročno-posljedičnoj vezi između glacijacija i orogeneza) ne pojavljuju ciklički svakih 250 (220 ili 230, ili bilo koliko milijuna godina, što u ovom slučaju nije ni važno) milijuna godina, kato to uzima većina autoriteta¹¹.

Definiranje geografskih uzroka glacijacija. Terestričkim se faktorima, dakle, može objasniti uzrok postanka glacijacija. Ali nikako se ne smiju odvajati pojedini faktori i samo u njima tražiti uzrok glacijacija; takvi

⁹ Irving i R. Green, op. cit. str. 71.

¹⁰ R. Bemmelen, Mountain Building, The Hague 1954, str. 14: »Mobilističke« geotektonske teorije prihvaćaju plutanje kontinentata u većem ili manjem opsegu, isto kao i sužavanje mobilnog, geosinklinalnog pojasa.

¹¹ R. Bowen, The Exploration of Time, London 1958, str. 15: Procesi u unutrašnjosti Zemlje, koji upravljaju orogenezama u posljednjih 500 milijuna godina, postali su znatno intenzivniji. Zato ne iznenađuje činjenica da su se 3 posljednje glacijacije javile u spomenutom periodu, u poređenju sa 6 glacijacija u prethodnih 1 500 milijuna godina.

su pokušaji uvijek dovodili do nepremostivih teškoća. *Ledeni pokrovi mogu se razviti samo onda kad se kombinacijom svih triju spomenutih faktora stvore optimalni uvjeti.* Budući da takva kombinacija može nastati vrlo rijetko, glacijacije su vanredno rijetki prirodni procesi. Idealno zamišljen sistem, »pripremljen« (W. Meinardus govori o »Eiszeitbereitschaft« Zemlje za glacijaciju) za nastup ledenog doba, izgledao bi po priliči ovako:

Kopnena masa kontinentskih dimenzija prvi je uvjet za ekspanziju ledenog pokrova. Najidealniji bi bio kružni oblik, tj. kontinent sa svih strana opkoljen oceanom, izvorom vlage. (Kopno slično Antarktici ili Australiji bilo bi vrlo blisko idealnom kontinentu s najpovoljnijim dimenzijama za nastup glacijacije.) Udaljenost od pola je s vremenom sve manja (Mora se pretpostaviti promjena položaja u odnosu na pol.), pa nakon izvjesnog vremena jedan dio hipotetskog kontinenta u toku zime uđe u područje polarne noći, tj. temperatura padne prilično nisko, cijeli kontinent počinje se hladiti i postaje izvor sve hladnijih kontinentskih zračnih masa.

Postepeno zahlađenje pred nastup kvartarne glacijacije u nekim je slučajevima i kvantitativno određeno, a utvrđeno je u svim dijelovima svijeta. Do postepenog pada temperature došlo je neopisivo polaganim približavanjem Južnog i Sjevernog geografskog pola prostorima gdje se oni danas nalaze. U mezozoiku oba su pola još bila prilično daleko od današnjeg položaja. Sjeverni pol je bio negdje u zapadnom dijelu Tihog oceana, ili u sjeveroistočnoj Aziji (ili u tom graničnom području), a Južni pol se nalazio u južnom Atlantiku, ili Indijskom oceanu, ili negdje u graničnom prostoru između tih oceana.

Na početku tercijara Južni pol se već jako približio Antarktici¹²; u eocenu i oligocenu već je bio u blizini njene obale. Antarktika postaje subpolarni kontinent: duga polarna noć u toku zime bitno počinje utjecati na pad temperature, što se nije osjećalo sve dok je Južni pol bio u oceanu, daleko od kontinenta.

Nešto slično se dogodilo i na sjevernoj hemisferi. Početkom kenozoika Sjeverni pol ulazi u basen Sjevernog ledenog mora^{13,14} i kopno na njegovim obalama, kao i more, počinje se postepeno ohlađivati. Dakle, isti proces je započeo istovremeno na obje hemisfere. Zato je pad temperature u kenozoiku bio u pravom smislu riječi opći. Očito je da je *opće zahlađenje u kenozoiku bila posljedica približavanja polova evroazijskom, američkom i antarktičkom kontinentu.*

Izotopskom analizom bentoskih foraminifera u ekvatorijalnom dijelu Tihog oceana ustanovljen je pad temperature za oko 8° C od srednjeg oligocena do kraja pliocena^{15,16}; to bi, po priliči, odgovaralo ohlađenju vode na antarktičkom jugu odakle dolaze dubokomorske struje.

Sličan pad temperature ustanovljen je i na sjevernoj hemisferi. Od maksimuma u eocenu temperatura je postepeno opadala sve do kraja pliocena kad je nastupio daljnji vrlo nagli pad uzrokovan samim postojanjem leda. Tako je za

¹² E. Irving i R. Green, op. cit., str. 64.

¹³ S. Runcorn, Rock magnetism, Science 129, 1959, str. 1002.

¹⁴ L. B. Ruhn, Problema proishozdenija materikovyh oledenjenij, Izv. Vsesoj. geograf. obščestva 90, 1958, 1, 25.

¹⁵ C. Emiliani i G. Edwards, Tertiary ocean bottom temperatures, Nature 171, 1953, str. 888.

¹⁶ C. Emiliani, Temperatures of Pacific bottom waters and polar superficial waters during the Tertiary, Science 119, 1954, str. 853.

Sjevernu Ameriku i za Evropu u umjerenom pojasu ustanovljen pad temperature od oko 8—10° C u toku cijelog tercijara.¹⁷⁻¹⁹

Kvartarnoj je glacijaciji prethodio opći pad temperature u toku posljednjih 40 milijuna godina. Prema tome, u genetskom smislu glacijacija nije neki nagli i neočekivani proces. Opći pad temperature, kao jedan od bitnih uvjeta za nastup glacijacije, počeo je davno prije neposrednog postanka kvartarnih ledenih pokrova. Očito je da temperatura u srednjem tercijaru nije bila dovoljno niska da bi započela glacijacija. To je osnovni uzrok da je kvartarna glacijacija u »zakašnjenju«²⁰ za prvim fazama alpske orogeneze; sama alpska orogeneza — uz visoku temperaturu svjetskog mora — nije bila dovoljna da se pokrene mehanizam glacijacije. Kvartarna glacijacija je nastupila tek onda kad je temperatura pala na dovoljno nisku razinu; prelaskom te kritične granice, uz postojanje drugih uvjeta, ledeni pokrovi su se počeli širiti.

Atmosferska cirkulacija se, zbog povećanja termičkog gradijenta, jako razvija, intenzivira, pa na obalne i više dijelove kontinenta padne prilična količina padalina, zimi uglavnom snijega, koji u toplom dijelu godine okopni. Ako u trenutku kad se cijeli sistem, pripreman za glacijaciju, bude nalazio blizu pola, nastane orogeneza (ili jedna faza orogeneze) i epirogeneza, pa se čak i samo u jednom relativno malenom dijelu hipotetskog kopna pojave planine (koje ne moraju biti jako visoke), onda postoje sva tri bitna geografska uzroka za postanak ledenog pokrova. Na planinama se isprva razvijaju planinski ledenjaci koji uskoro prerastu u pijedmontske ledenjake, odnosno u ledeni pokrov koji prekrije cijeli kontinent. Prema tome, *glacijacija nastaje onda kad se kopnena masa (ili mase) kontinentskih dimenzija u momentu orogeneze i epirogeneze nalazi u visokim geografskim širinama*. Očito je da se ovakva kombinacija može postići vrlo rijetko. Osim toga, iz ovoga se vidi da je potrebno izdizanje kopna, ali izdizanje u pravo vrijeme i na pravom mjestu. Glacijacija neće nastati: a) na kontinentu koji se u toku orogeneze i epirogeneze nalazi daleko od pola, b) na zaravnjenom kontinentu koji se nalazi u blizini pola, ali se nije pojavila orogeneza i epirogeneza. U oba slučaja može se pojaviti određeno zahlađenje, ali bez dubljih i duljih posljedica. (Poznati su brojni slučajevi iz tercijara iz svih dijelova svijeta.) Dakle, sve epirogeneze i orogeneze, odnosno orogene faze, ne izazivaju glacijaciju: orogeneza i epirogeneza same za sebe ne rješavaju i ne mogu riješiti problem postanka ledenih doba.

Na osnovu spomenute definicije nije teško shvatiti zašto kaledonska orogeneza, usprkos svom intenzitetu, nije pokrenula glacijaciju, dok je variscijska orogeneza bila praćena glacijacijom samo na južnoj hemisferi. (Na sjevernoj hemisferi nije bilo glacijacije sve od donjeg kambrija, tj. oko 500 milijuna god.) Zato nije sasvim tačna tvrdnja da je problem glacijacije u biti problem uzroka orogeneza²⁰; ona sadržava samo dio istine.

Orogeneze takvih prostorno-vremenskih dimenzija, kao što su orogeneze koje su prethodile permo-karbonskoj i kvartarnoj glacijaciji, nisu

¹⁷ J. Durham, Cenozoic marine climates of the Pacific coast, *Bull. Geol. Soc. America* 61, 1950, str. 1243.

¹⁸ P. Woldstedt, Die Klimakurve des Tertiärs und Quartärs in Mitteleuropa, *Eiszeitalter u. Gegenwart* 4—5, 1954, str. 5.

¹⁹ M. Schwarzbach, *The Climatic History of Europa and North America u kompendiju Descriptive Palaeoclimatology*, izd. A. Nairn, New York—London 1961, str. 274.

²⁰ R. F. Flint, *op. cit.*, str. 481.

istovremeno zahvatile cijelu Zemlju. Jedni su dijelovi geosinklinala nabirani prije a drugi mnogo kasnije; cijeli su nabrani sistemi u toku iste orogeneze kompletno razarani i ponovo stvarani. Jedna orogeneza svjetskih dimenzija sastoji se od niza orogenih faza koje su u raznim dijelovima svijeta nastupile u razno vrijeme. Ako orogeneza u prvoj fazi tektonske revolucije »slučajno« započne baš u visokim geografskim širinama, to ipak nije dovoljno za počinjanje glacijacije, ako ni drugi glaciogeni faktori nisu dotad evoluirali u istom smjeru. U najboljem slučaju mogu nastati planinski ledenjaci, ali ledeni pokrov se neće razviti. Prva faza orogeneze ne može pokrenuti glacijaciju, ukoliko za nju još ne postoje opći uvjeti (nedovoljno zahlađenje)²¹.

Klasični geografski faktori mogu biti uzrok glavnih klimatskih promjena, odnosno glacijacija. Oni stvaraju ledene pokrove, goleme sisteme koji se — kad već postoje — dalje razvijaju u skladu s procesima koje će oni sami stvoriti, dok istovremeno početni geografski uzroci definitivno gube vrijednost; stvaranjem ledenog pokrova oni su »odigrali svoju ulogu«.²²

Geografija i struktura glacijacija. Iz kombinacije geografskih uzroka glacijacija dolazi se do zaključka kako se može očitovati glacijacija. Glacijacija može biti:

a) **monopolarna**, ako uvjeti za razvoj ledenog pokrova (ili ledenih pokrova) postoje samo oko jednog pola (pola u širem smislu riječi), odnosno na jednoj hemisferi. U tom je slučaju riječ o glacijaciji samo sjeverne hemisfere (uz istovremenu nezaleđenost južne hemisfere), ili o glacijaciji samo južne hemisfere (uz istodobnu nezaleđenost sjeverne hemisfere; takva je bila permo-karbonska glacijacija). Glacijacija je golem proces, pa će ledeni pokrov (pokrovi) zaleđene hemisfere donekle utjecati na klimu nezaleđene hemisfere;

b) **bipolarna**, ako se ledeni pokrovi istovremeno razvijaju na obje hemisfere (primjer su kvartarna, a vjerojatno i donjokambrijska glacijacija); i oni u izvjesnoj mjeri utječu jedan na drugi, ali će zbog prirode takve glacijacije klimatska kolebanja biti znatno kompliciranija nego u prethodnom slučaju.

Kad se danas misli na glacijacije, onda se automatski smatra da je jedino moguć oblik bipolarni tip glacijacije, što je posljedica dugotrajnog dominantnog utjecaja Milankovićeve teorije. Iz opisanog mehani-

²¹ Nalaz srednjotercijarnih glacijalnih tragova na Antarktici (C. S. Wright i R. E. Priestley, *Glaciology, British Terra Nova Antarctic Expedition, 1910—13, 1922*) ni u kojem slučaju nije dokaz da antarktički ledeni pokrov postoji već od tog vremena. Može se pretpostaviti da su već tada postojali planinski ledenjaci ali, zbog nepostojanja povoljnih uvjeta, oni nisu mogli prerasti u ledeni pokrov; do toga je došlo mnogo kasnije.

²² To je u skladu s Milankovićevom tvrdnjom (*Astronomische Mittel zur Erforschung der erdgeschichtlichen Klimate, Hdb. Geophys. 9, Berlin 1938, str. 688*) da kretanje Zemljinih polova uopće nije utjecalo na tok kvartarne glacijacije. Ne samo to. Na opći tok glacijacije nisu utjecale ni horizontalne promjene položaja kontinenata, ni orogene faze pri kraju glacijacije. Ni jedan proces nije dovoljno intenzivan da bi utjecao na evoluciju ledenog pokrova od onog momenta kad on postane fizičko-geografski faktor.

zma i poznatih činjenica slijedi da taj izvod nije ispravan. Glacijacija jedne hemisfere uz istodobnu nezaleđenost druge hemisfere nije problem ili paradoks nego je, nasuprot, samo jedan od mogućih oblika pojave glacijacije. Permo-karbonska glacijacija je dokaz da golemi ledeni pokrov na jednoj hemisferi ne isključuje mogućnost postojanja aridne i tropske klime na drugoj hemisferi.

Veličina i geografski razmještaj zaleđenih kontinenata, te njihov odnos prema moru, određuje strukturu glacijacije. Po strukturi, glacijacija može biti:

a) antarktičkog ili kontinuiranog tipa, ako je zaleđeni kontinent više ili manje jedinstvena kopnena masa gotovo kružnog oblika, sa svih strana okružena morem. U tom slučaju ledeni pokrov je kontinuiran, tj. prekriva cijeli kontinent i pulzira kao jedinstvena cjelina;

b) arktičkog, diskontinuiranog ili celularnog tipa, ako su zaleđeni kontinenti, odnosno ledeni pokrovi odijeljeni oceanom. On se u toku glacijacije zaleđuje, pa su sve celule jedno vrijeme — u klimatološkom smislu riječi — spojene u jedinstven sistem golemih dimenzija. U toku deglacijacije cijeli se sistem raspada, i to svaka celula za sebe, ali ipak manje-više sinhrono kao jedna cjelina.

Najkomplikiraniji procesi bit će onda kad je glacijacija bipolarna, a struktura obiju glacijacija različita. Takva je upravo kvartarna glacijacija.

MEHANIZAM HIPOTETIČKE GLACIJACIJE

Pojam hipotetičke glacijacije. Idealna teorija glacijacije mora udovoljiti slijedećim uvjetima, odnosno mora objasniti i naći rješenje za slijedeće probleme: a) ona mora utvrditi inicijalni faktor, odnosno početno stanje, b) mehanizam ponavljanja ili oscilacija u toku same glacijacije, c) stanje ili faktor koji dovodi do likvidacije ledenog pokrova.

Za faktore b i c može se reći da se većina ne slaže ni s jednim prijedlogom, pa se mišljenja prilično razilaze. Pulsiranje ledenih pokrova i velike promjene uzrokovane time, a napose vanredno nagao nestanak glacijacije, bio je i ostaje glavni problem.

Priroda je beskrajno raznolika, a odnos glaciogenih faktora je vrlo kompliciran, jer se neprekidno mijenja u prostoru i vremenu. Zato ni jedan konkretan slučaj nije dovoljno »tipičan« da bi mogao poslužiti kao klasičan primjer u kome bi se idealno manifestirali svi procesi. U prikazu hipotetičke, tj. idealno zamišljene, glacijacije moraju se eliminirati svi sekundarni elementi, odnosno lokalne pojave koje modificiraju ili »maskiraju« osnovne procese i često ih toliko mijenjaju da koji put gotovo nije moguće u njima nazreti bilo kakvu pravilnost. Hipotetička glacijacija mora prikazati »životni« mehanizam karakterističan za sve ledene pokrove, bez izuzetka.

Vertikalna i horizontalna raspodjela padalina. Poznato je da količina padalina raste s visinom reljefa. Ako je planina dovoljno visoka, onda količina padalina raste samo do određene visine, a nakon toga opada. Za

nas je najinteresantnija vertikalna raspodjela snijega. Količina snijega raste do stanovite visine, a onda postepeno opada. Ako je planina vrlo visoka, onda na izvjesnoj visini snijega nestaje, pa su najviši vrhovi goli (A. Heim 1885; J. Tyndall 1860). Prema tome bi postojale donja i gornja snježna granica (E. Brückner 1913); u toj se zoni snježni pokrov, odnosno firn i led, održi cijelu godinu. Ovu zonu ili sloj u atmosferi A. Dobrowojski (1923) je nazvao kriosfera.

Opadanje količine padalina s povećanjem udaljenosti od izvora vlage odavno je poznato, a vrijedi i za ledene pokrove. Maksimalne padaline padaju na rubu ledenih pokrova, a opadaju prema unutrašnjosti. Ako je ledeni pokrov dovoljno velik, količina padalina u unutrašnjosti može biti minimalna, gotovo nikakva. Ovakva zakonomjernost je veoma važna za razvoj ledenih pokrova.²³

Prema tome odnos temperature i padalina mora biti približan optimalnoj vrijednosti da bi se snijeg održao cijele godine. Maritimna klima je bitan uvjet za razvoj ledenog pokrova: što je ona »maritimnija«, to ledeni pokrov intenzivnije raste. Međutim, ta maritimnost mora imati granicu, jer prevelika količina vlažnog, toplog zraka može uzrokovati prejaku ablaciju. Kad se dostigne ta granica, svaki daljnji porast maritimnosti može dovesti u pitanje daljnji opstanak leda. Prema tome, održanje leda ne ovisi samo o vlažnosti zraka, tj. o količini padalina; isto je tako važna i temperatura. Za temperaturu vrijedi isto pravilo kao i za vlagu. Preniska temperatura, kao posljedica goleme ekspanzije ledenog pokrova, izaziva klimatske promjene koje su nakon prelaska određene granice nepovoljne za daljnji razvoj ledenog pokrova.²⁴ Ovo je vanredno važno za egzistenciju ledenih pokrova, jer *poremećaj optimalnog odnosa temperature i vlažnosti i u jednom i u drugom slučaju dovode do likvidacije glacijacije*. Ovaj je zakon nadasve važan za objašnjenje mehanizma pulsiranja i evolucije ledenih pokrova.

Stanje ravnoteže ledenog pokrova. Oblik ledenog pokrova je posljedica fizičkih svojstava leda, količine padalina, veličine ablacije, postojanja planina u rubnom pojasu i djelovanja anticiklonalnih vjetrova. Ovome bi se još morao dodati i *smjer vjetra koji donosi padaline; to bi, čini se, bio jedan od najvažnijih faktora, jer su svi ledeni pokrovi uvijek rasli u susret vjetru koji donosi padaline.*

Fizika toka leda još nije poznata, pa ni jedna od desetak predloženih hipoteza o mehanizmu toka leda nije stekla opće priznanje.²⁵ Nas interesira samo morfologija ledenih pokrova, pa ćemo deskriptivnom metodom pokušati prikazati samo vanjske manifestacije kompliciranih fizičkih procesa u samom ledenom pokrovu, kako se oni odražavaju na morfologiji ledenih pokrova. Radovi M. Demoresta i R. F. Flinta najsličniji

²³ J. Leighly, On continentality and glaciation, Geografiska Annaler 31, 1949, str. 133.

²⁴ H. W. Ahlmann i S. Thorarinsson, The Vatnajökull Glacier, Geograph. R. 28, 1938, str. 437.

²⁵ J. K. Charlesworth, The Quaternary Era I i II, London 1957, str. 122: Sve se hipoteze slažu u tome da je težina leda glavni uzrok kretanja današnjih ledenjaka.

su takvom prikazu evolucije ledenih pokrova.^{26,27} M. Demorest polazi od činjenice da led u ledenom pokrovu teče pod djelovanjem svoje vlastite težine u centralnoj zoni, a teče sve dotle dok ne postane posve tanak. Ako se apstrahiraju akumulacija i ablacija, površina leda će postati posve ravna. S povećanjem radijusa ledenog pokrova brzina kretanja je sve manja; u jednom trenutku led prestane teći. »Tok leda u ledenom pokrovu... koji je posljedica tlaka u centru... analogan je toku tekućine na horizontalnoj plohi« (26, str. 372).

U stvari, ablacija je najveća na rubu ledenog pokrova; da bi se održala ravnoteža, tok leda mora biti najveći na rubu ledenog pokrova; posljedica toga je konveksnost ruba leda. Led će se dalje širiti ako se akumulacijom snijega, koji pada najviše na rubu, poremeti postignuta ravnoteža. Zbog takve orografske raspodjele snijega, na rubu će nastati ispupčenje (greben) koje uzrokuje centripetalni tok leda. U centru ledenog pokreta nastao je plitak basen okružen povišenim rubom, pa će led teći prema centru i konačan će rezultat biti — izjednačenje visine cijelog ledenog pokrova koji će opet biti ravan, a radijus će se povećati za odgovarajuću veličinu.

Kako je rečeno, »tok leda u ledenom pokrovu... analogan je toku tekućine na horizontalnoj plohi«. Treba započeti s drukčijom pretpostavkom; led kao čvrsto tijelo sigurno ne teče kao tekućina; to je nužan zaključak kad se ima na umu činjenica da su to tijela sa bitno različitom molekularnom strukturom.²⁸ Prema tome, idealni ledeni pokrov u stanju ravnoteže ne bi bio ravna ploča, jer u ledu, kao i u svakom čvrstom tijelu, postoji trenje, odnosno kohezija koju treba nadvladati. Masa leda konveksnog presjeka u početku će polako, a onda relativno brzo teći, ali što dalje, tok će biti sve sporiji. Kritičan tlak, potreban za kretanje leda — on ovisi o relaciji radijusa i visine ledenog pokrova — dostigne minimalnu vrijednost prije nego što površina hipotetskog ledenog pokrova postane horizontalna. Hipotetički ledeni pokrov s jednakom akumulacijom sa svih strana, u stanju kvazistatičke ravnoteže, bio bi dakle *konveksno*, a ne ravno tijelo. Hipotetički ledeni pokrov kružnog oblika s podjednakom alimentacijom sa svih strana (Dimenzije moraju biti takve da je moguća akumulacija snijega i u samom centru ledenog pokrova, a to bi bio relativno maleni ledeni pokrov.), imao bi kompleksan profil, koji ne bi bio sličan ni jednom od poznatih jednostavnih likova. Periferijski dio hipotetičkog ledenog pokrova u presjeku bi bio dio poluparabole, a centralni dio bio bi dio elipse (sl. 1). Ledeni pokrov bi se dobio rotiranjem takve kombinirane krivulje.

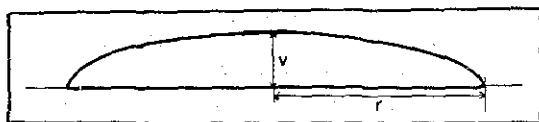
Vidjet ćemo da je ovaj zaključak samo djelomično tačan; takav profil bi bio presjek ledene mase na ravnoj podlozi s jednakom ablacijom i alimentacijom sa svih strana. U stvarnosti, taj je profil samo specijalan

²⁶ M. Demorest, Ice sheets, Bull. Geol. Soc. America 54, 1943, 3, str. 363.

²⁷ R. F. Flint i M. Demorest, Glacier thinning during deglaciation, Am. J. Sci. 240, 1942, 1, str. 29 i 2, str. 113.

²⁸ M. F. Perutz, J. Glaciology 1, 1949, str. 231: Teorije o viskoznom toku leda ne mogu se više održati; pokazalo se da se led ne ponaša kao tekućina s konstantnim viskozitetom. Kao sva čvrsta tijela s kristalnom strukturom, led nije viskoznan nego je plastičan.

line sa svih strana podjednako, a to je moguće samo u početnoj i završnoj fazi evolucije takvog ledenog pokrova. Budući da padaline zapravo nikada neće biti pravilno raspoređene na svim stranama ledenog pokrova, ovakav hipotetički profil će vrlo rijetko moći nastati; on je izuzetak, posebni slučaj, a ne pravilo. W. Meinardus²⁹ je zaključio da je »normalni oblik« slučaj koji vrijedi za ledeni pokrov u sasvim određenoj, početnoj i završnoj fazi evolucije. Tako bi izgledao profil kvazi-statičkog ledenog pokrova antarktičkog tipa glacijacije, tj. ledenog pokrova koji prima pada-



Sl. 1. Idealan profil hipotetičkog ledenog pokrova manjih dimenzija s podjednakom alimentacijom sa svih strana. Krivulja je kombinacija krakova dviju poluparabola i elipse

Fig. 1. A hypothetical profile of a small ice sheet resting on a horizontal base with an equal accumulation of snow. The profile is formed from parts of two half-parabolas and a part of an ellipse

ledenog pokrova rotacioni elipsoid. U smislu dinamičkog shvatanja evolucije ledenih pokrova, to ne bi bilo ispravno, jer ne postoji »normalni« oblik ledenog pokrova. Ispravno je samo reći kakav je oblik ili profil ledenog pokrova u početnoj ili završnoj fazi ekspanzije, u maksimumu, ili u početnoj ili završnoj fazi recesije, a treba uvijek navesti da li je riječ o arktičkom ili antarktičkom tipu ledenog pokrova. Kod dovoljno velikih ledenih pokrova uvijek se mora reći u kojoj se fazi razvoja nalazi. Profil ledenog pokrova u svakoj spomenutoj fazi bit će drukčiji. Može se, dakle, govoriti samo o »normalnom« obliku u stanovitoj fazi razvoja, ali ni u kojem slučaju o »normalnom« obliku ledenog štita uopće.

Ekspanzija ledenog pokrova

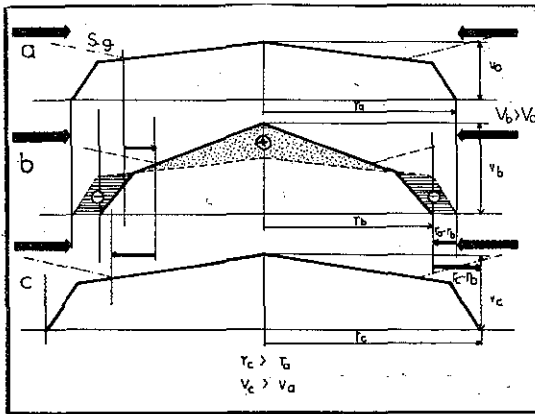
Statički model ledenog pokrova antarktičkog tipa. Mehanizam rasta hipotetičkog ledenog pokrova antarktičkog tipa u biti je jednostavan, ali ga treba dobro razumjeti, jer je sav kasniji rast i raspadanje ledenih pokrova i celularnog i kontinuiranog tipa zapravo višestruko ponavljanje istog procesa, ali — ovo je bitno! — ne procesa u istim uvjetima.

Stvaranjem povoljnih uvjeta formirat će se (sl. 2) embrionalni ledeni pokrov, koji nakon izvjesnog vremena postigne kratkotrajno stanje ravnoteže (a).³⁰ Dio ledenog pokrova iznad snježne granice nalazi se u zoni akumulacije, a dio ispod snježne granice u zoni ablacije; upravo zbog tih bitno različitih uvjeta ledeni pokrov ne može ostati dugo u stanju ravno-

²⁹ W. Meinardus, Die hypsographische Kurven Grönlands und der Antarktis und die Normalform der Inlandeisoberfläche, Pett. Mitt. 72, 1926, str. 97.

³⁰ Radi jednostavnosti prikaza i lakšeg crtanja, svi su profili »geometrizirani«; umjesto sferoidnih krivulja, nacrtane su ravne ili izlomljene linije.

teže. U akumulacionoj zoni, u području iznad snježne granice (b), nakon izvjesnog vremena nagomilat će se stanovita količina snijega koji će poznatim procesom uskoro prijeći u firn i led (+), dok će se istovremeno led u rubnoj zoni — zbog ablacije (Rub leda je uvijek izložen ablaciji bez obzira na geografsku širinu, jer je ablacija faktor koji neprekidno djeluje.) i smanjenog pritjecanja leda iz centralne zone ledenog pokrova — početi postepeno povlačiti (—). Ovaj se mehanizam osniva na poznatoj činjenici da ledenjaci ne reagiraju smjesta na promjene akumulacije. Već se u početku smatralo (L. Agassiz 1843) da moraju proći deceniji, ili čak stoljeća, da se te promjene opaze na kraju ledenjaka. F. E. Mat-



Sl. 2. Evolucija ekspanzivnog hipotetičkog ledenog pokrova između dva stanja privremene ravnoteže. Podjednaka alimentacija sa svih strana (strelice). S. g., snježna granica

Fig. 2. The evolution of an expanding hypothetical ice sheet between two states of quasi-static equilibrium. There is equal accumulation of snow on all sides (arrows). S. g., snow line

thes³¹ je ustanovio da led ostaje inertan pod utjecajem naglo povećanog tlaka sve dotle dok se ne prijede izvjesna granica; tek tada počne led teći, i to isprva polagano, a zatim sve brže, i onda kad tlak ostane isti ili čak opada. Tek nakon nekog vremena led teče sve sporije i konačno postane inertan. Zato je pulziranje ledenjaka gotovo autonomno, manje ili više »neovisno« o klimatskim promjenama. Nakon dugog vremena u akumulacionoj zoni akumulira se led, dok se istovremeno niži dio ledenjaka povlači. To traje sve dotle dok se ne postigne granica kad led počne kliziti naprijed (O. Liestöl).³²

Tek kumulativni učinak čitavog niza manjih promjena dovoljan je da promijeni to stanje. Ledena masa reagira na vanjske promjene s izvje-

³¹ F. E. Matthes, *Glaciers*, u kompendiju *Physics of the Earth IX*, izd. O. E. Meinzer, New York 1942.

³² Cit. H. W. Ahlmann, *Glacier Variations and Climatic Fluctuations*, New York 1953, str. 11.

snim zakašnjenjem i samo onda kad zbroj svih infinitezimalnih (godišnjih) promjena stanja prijeđe izvjesnu kritičnu granicu. Tek u tom trenutku ledena masa reagira na već promijenjene uvjete. Akumulacijom snijega visina ledenog pokrova u fazi *b* znatno se povećala prema prethodnom stanju, dok je istovremeno radijus ledenog pokrova u fazi *b* nešto smanjen prema početnom stanju. Budući da je tlak u ledenom pokrovu funkcija visine i radijusa, opisanom promjenom taj se odnos promijenio u pozitivnom smislu: ledeni pokrov dobiva novi impuls za kretanje.³³ Ledeni pokrov počinje se širiti, ali se nakon nekog vremena postiže novo stanje ravnoteže, stanje *c*, u kojem su sve njegove dimenzije veće od dimenzija u stanju *a*. Postizanjem stanja *c* isti se proces ponavlja, tj. poslije novog povlačenja ledene fronte i nove akumulacije snijega ponovo će se širiti ledeni pokrov.

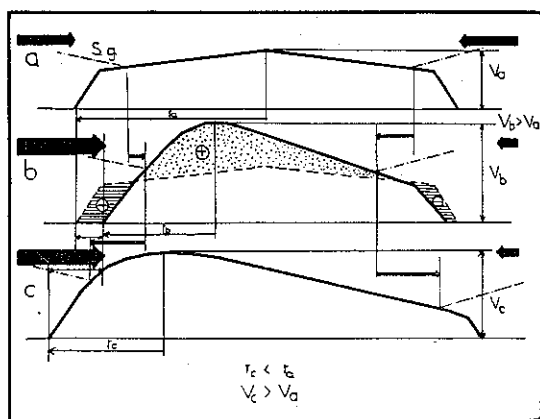
Ako se pažljivije razmotri mehanizam ove elementarne, osnovne pulsacije ledenog pokrova, dolazi se do zaključka da *ledeni pokrov može pulzirati, ritmički se povlačiti (recesija) i napredovati (ekspanzija), bez ikakve bitne promjene vanjskih uvjeta: osnovna pulsacija ledenog pokrova zapravo je posljedica promjene njegove strukture, reakcija na poremećaj ravnoteže ablacije i akumulacije. Da se led povuče, nije potreban neki posebni porast temperature (»otopljavanje« klime), kao što za njegovo napredovanje nije potreban posebno uzrokovan pad temperature (»zahlađenje« klime). Upravo je obratno: i pad i porast temperature, tj. zahlađenje i otopljavanje klime jest posljedica pulsiranja ledenog pokrova. Sve ovo će se ponoviti i u kasnijim slučajevima.*

Statički model ledenog pokrova celularnog tipa. Podjednaka alimentacija ledenog pokrova sa svih strana vrlo je rijedak slučaj. Najvjerojatniji, tj. u stvarnosti najčešći slučaj bit će baš obratan: alimentacija ledenog pokrova neće biti jednaka sa svih strana. Zato će najveći dio snijega koji će »hraniti« ledeni pokrov dolaziti iz jednog smjera, iz jednog kvadranta, pa će ledeni pokrov morati rasti u susret vjetru koji donosi snijeg. Ovakva neobično važna eksterna činjenica ne može ostati bez posljedica pa će se to brzo odraziti na morfologiju ledenog pokrova. Ekspanzija ledenog pokrova u ovom slučaju bit će nešto drukčija; tkaav mehanizam bitno je važan posebno za celularni tip (a zapravo — kako ćemo vidjeti — i za antarktički tip glacijacije, bez obzira na dimenzije).

Opet ćemo, kao i u prethodnom slučaju, započeti s istim stanjem. Ledeni pokrov u fazi ekspanzije privremeno je postigao stanje ravnoteže (*a* u sl. 3). Njegove dimenzije su tolike da je on počeo utjecati na atmosfersku cirkulaciju, a na njegovu alimentaciju će utjecati i drugi, susjedni ledeni pokrovi, odnosno razmjestaž kopna i mora. Sve će se to prije svega odraziti na smjeru glavnog vjetra koji donosi padaline (*b*). Dalje će proces teći kao i u prethodnom slučaju. Snijeg će se akumulirati

³³ Da ne bismo morali stalno opisivati taj omjer, odnosno upotrebljavati termin »tlak leda«, mogli bismo predložiti termin »glaciobarički tlak«. Glaciobarički tlak je sila koja uzrokuje kretanje leda u ledenom pokrovu i ledenjaku. On ovisi o visini i radijusu ledenog pokrova, odnosno o duljini ledenjaka, i to: upravo je proporcionalan s visinom, a nepravilno proporcionalan s radijusom ledenog pokrova, odnosno duljinom ledenjaka.

uglavnom u frontalnom dijelu ledenog pokrova (privjetrina), što je posljedica orografskog učina ledenog štita (+). Istovremeno će se rub ledenog pokrova ispod snježne granice, zbog djelovanja ablacije, nešto povući (—). Konačno se visina ledenog pokrova nešto povećala, a radijus se smanjio. Tako je stvoren impuls za novi nalet. Bitno je važno da je — kao i u prethodnom slučaju — volumen leda koji se akumulirao iznad snježne granice veći od volumena leda koji je nestao djelovanjem ablacije, pa će u narednom stanju ravnoteže (c) visina biti veća, a glavni radijus će biti nešto manji od istih veličina u fazi a; ledena celula ekspandira. U slijedećoj fazi neće se ponoviti isti proces, jer sada u početnoj fazi ledeni pokrov ima drukčiji profil nego u početnoj fazi a prethodnog slučaja: sada je početni profil, profil c iz prve faze. Rast ledenog pokrova nastavit će se samo u susret glavnom vjetru.



Sl. 3. Evolucija ekspanzivnog ledenog pokrova između dva stanja privremene ravnoteže. Padaline dolaze pretežno iz jednog smjera; ledeni pokrov raste u susret tom vjetru

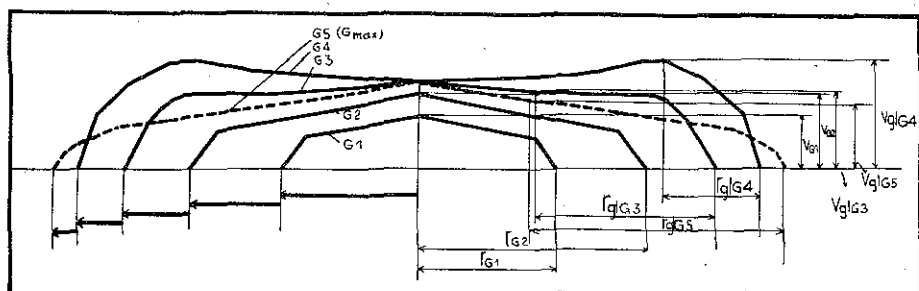
Fig. 3. The evolution of an expanding hypothetical ice sheet. Precipitation comes mainly from one side; the ice sheet expands in the direction of the snowbearing wind

Kako se vidi, postoji znatna formalna razlika između ekspanzije kontinuiranog i celularnog tipa ledenih pokrova. Morfologija ledenog pokrova u potonjem slučaju bitno se promijenila, jer se ledeni pokrov širi pretežno u jednom smjeru, u susret glavnom vjetru. Zato će profil celularnog ledenog pokrova biti drukčiji od presjeka kontinuiranog ledenog pokrova u istoj fazi evolucije. U fazi c ledeni pokrov celularnog tipa glacijacije ima presjek sličan balističkoj krivulji. (Takav je presjek, dakako, samo u pravcu paralelnom sa smjerom glavnog vjetra.) Osim toga, stražnji dio ledene celule nije se proširio ili će se proširiti vrlo malo; on je ostao na istom mjestu kao i u fazi a, ili se tek neznatno pomakao. Taj je oblik posljedica male količine padalina (Stražnja strana je okrenuta prema geometrijskom centru celularne glacijacije, prema zaleđenom sredoze-

mnom moru otkuda ne dolaze padaline.) i niskih temperatura, mnogo nižih nego u frontalnom dijelu, pa je led manje plastičan.

Dinamički model ledenog pokriva antarktičkog tipa. Čitav mehanizam pulsiranja hipotetskog ledenog pokriva antarktičkog tipa izgledao bi ovako:

Stvaranjem povoljnih uvjeta razvije se embrionalni ledeni pokrov, koji je u početku malenih dimenzija. Prvo stanje ravnoteže (sl. 4) prikazuje ledeni pokrov G 1. Daljnji razvoj teći će tačno onako kako je već opisano za statički model (Dinamički model se sastoji od niza statičkih modela, samo se mijenja jedan faktor — eksterni uvjeti, tj. padaline i temperatura, što ne može ostati bez posljedica za razvoj ledenog pokriva); ledeni pokrov će se nešto povući, a na nj će napadati izvjesna količina snijega. (To nije prikazano na dijagramu, jer bi slika u tom slučaju bila prenatrpana detaljima i potpuno nejasna.) Tada će početi novi nalet ledenog pokriva, čiji će profil na kraju naleta biti G 2. Nakon nekog vremena



Sl. 4. Evolucija ekspanzivnog ledenog pokriva antarktičkog tipa. Alimentacija podjednaka sa svih strana, ali se u raspodjeli padalina očituje reljefni utjecaj ledenog pokriva

Fig. 4. The evolution of an expanding ice sheet of Antarctic type. Equal accumulation from all sides, but the influence of a relief barrier on the ice sheet is evident

— u skladu sa već opisanim mehanizmom — ledeni pokrov će se povući do novog stanja privremene ravnoteže odakle će započeti novi nalet, kojim će se postići slijedeća faza privremene ravnoteže.

U toku opisane diskontinuirane ekspanzije ledeni pokrov nije ostao homogen, a i sredina u kojoj se širi postepeno se mijenjala pod njegovim utjecajem. Glavne bi promjene bile slijedeće. Prvo, ledeni pokrov je postao tijelo kontinentskih dimenzija; on je postao stalan izvor hladnih zračnih masa, koje su ohladile i područja daleko od ruba ledenog pokriva (ocean), pa se najveći dio ledenog pokriva nalazi u zoni stalno niskih temperatura. Hlađenjem oceana smanjilo se isparavanje, a istovremeno je otežano prodiranje maritimnih zračnih masa (koje su sve manje maritimne) zbog orografske zapreke, nastale prostornim povećanjem ledenog pokriva, te zbog sve češćih anticiklonalnih stanja u atmosferi iznad ledenog pokriva.

Drugo, ledeni pokrov sve sporije i teže raste u visinu, jer količina padalina u centralnom dijelu ledenog pokriva stalno opada, dok se istovremeno ekspanzijom ledenog pokriva snježna granica postepeno spuštala,

a zajedno s njom i pojas maksimalne akumulacije snijega. Centralna zona ledenog pokriva prima sve manje padalina koje — zbog orografskog učina ledenog pokriva — sve više padaju na rubu, u zoni (donje) snježne granice. U ovoj fazi (G 3) ledeni pokrov postiže maksimalnu visinu, tj. zonu s vrlo malo padalina, i prestaje dalje rasti u visinu; on stagnira.

Treće, silno zahlađenje prije svega pogađa centralni dio ledenog pokriva. Naime, plastičnost leda je funkcija temperature i glaciobaričkog tlaka; budući da se tlak postizanjem maksimalne visine više ne povećava, a temperatura leda je sve niža, to je jasno da će plastičnost leda znatno opasti: led sve teže i sporije teče. Osim toga, zbog znatno više temperature na rubu ledenog pokriva, led u rubnoj zoni je mnogo plastičniji, odnosno mobilniji, nego u centru, pa će se nakon prelaska izvjesnih dimenzija dogoditi da led iz centra — iako bi, zadržavši određenu plastičnost, možda još mogao teći — ne teče, jer mu rubni led pruža preveliki otpor. Ta imobilna centralna zona u početku je malena, ali s porastom radijusa ledenog pokriva povećava se i njen radijus.

Četvrto, iz činjenice da je glaciobarički tlak funkcija visine i radijusa slijedilo bi da u fazi G 3 (ili čak i nešto prije nje) mora prestati ekspanzija ledenog pokriva; to bi imala biti maksimalna faza u ekspanziji ledenog pokriva; ali nije tako. Faza G 3 je maksimalna faza razvoja kojom završava samo prva etapa u evoluciji ledenog pokriva. Kraj prve etape (faza G 3) istovremeno je početak, prva faza u drugoj etapi evolucije ledenog pokriva. Usprikos izvjesnoj promjeni, mehanizam rasta isti je kao i dosada, s tom razlikom da su svi procesi »disanja« ledenog pokriva ograničeni isključivo na rubnu zonu, dok centralna zona više ne sudjeluje u razvoju ledenog pokriva. Najveći je dio padalina na rubu i ledeni pokrov u tom dijelu — osim daljnje horizontalne ekspanzije — počne rasti i u visinu.³⁴ I u ovoj etapi izmijeni se nekoliko naleta s nekoliko povlačenja. Bitno je da *visina ruba u izvjesnom trenutku postane viša od centra ledenog štita*. Tako unutrašnjost ledenog pokriva postaje plitak basen.

Od momenta kad greben ledenog pokriva postane viši od centra, bitno se mijenja profil ledenog pokriva, a najljepše je razvijen u fazi G 4. Ledeni pokrov antarktičkog tipa u najrazvijenijim fazama razvoja ima profil sličan prignječenim dvjema poluparabolama (odnosno prignječenoj krivulji, nastaloj kombinacijom dviju poluparabola i elipsa), a cijeli ledeni pokrov kao tijelo, sličan je prignječenom rotacionom paraboloidu (ili elipsoidu).³⁵

³⁴ Interesantna je evolucija ledenog pokriva u ovoj etapi razvoja; već nešto prije faze G 3 ledeni pokrov antarktičkog tipa počinje se širiti kao ledeni pokrov celularnog tipa. Iz toga bi se moglo zaključiti da je u biti osnovni oblik ledenog pokriva ledeni pokrov s »balističkim« profilom, odnosno krivulja koja bi se dobila spajanjem dvaju »balističkih« profila. Parabolično-eliptični profil bio bi samo poseban slučaj, nerazvijen, početni i završni oblik ledenog pokriva.

³⁵ Iz profila antarktičkog ledenog pokriva na potezu Mirnyj-Južni pol (V. A. Bugaev i E. I. Tolstikov, Profil poverhnosti Antarktīdy po liniji Mirnyj-Južnyj Poljus-Mak -Mērdō- Mirnyj, Izv. AN SSSR serija geograf. 1959, 3, str. 72) vidi se da je najveća visina (3745 m) na 1633-em km. Od te tačke prema polu visina ledenog pokriva postepeno opada, pa se Južni pol nalazi na visini od oko 2800 m. Ovo upućuje na zaključak da je idealni profil antarktičkog ledenog pokriva (kad ne bi bilo rubnih planina) vrlo sličan prignječenim dvjema poluparabolama, ili prignječenoj elipsi, ili kombinaciji tih dviju krivulja.

Sve opisane promjene izazvale su bitne promjene i u strukturi ledenog pokrova. Došlo je do diferencijacije dvaju dijelova: prvo, u centru je nastao i »fossilizirao« se *pasivni*, imobilni dio, koji više ne sudjeluje aktivno u evoluciji ledenog pokrova kao cjeline; drugo, *aktivan*, mobilan dio ledenog pokrova ostao je samo njegov rubni dio (rubni u širem smislu). To je u skladu s već poznatom činjenicom da kretanje leda kontrolira pojas uz rub ledenog pokrova, a ne led u njegovu geografskom centru. To ni u kojem slučaju nije u suprotnosti s poznatom činjenicom da su eratički blokovi bili transportirani i 2 000 km daleko. Ta činjenica nije nepremostiva teškoća, jer led u rubnom dijelu ledenog pokrova koji se širi može prenijeti eratičke blokove sve do periferije ledenog pokrova u maksimumu razvoja.³⁶

Svaki dinamički sistem stvara svoje vlastite zakone i ravna se po njima. U skladu s tim mora se izvesti slijedeći zaključak: visina centralnog, pasivnog dijela ledenog pokrova (tj. geometrijska visina), kao glaciološki parametar, gubi važnost. Ali tu važnost ona nije izgubila u jednom momentu; već prije izdizanja rubnog dijela ledenog pokrova glaciobarička visina ledenog pokrova (Tako bi se mogla nazvati visina koja u zajednici s glaciobaričkim radijusom, odnosno širinom samo aktivnog rubnog leda, određuje glaciobarički tlak.) polako se »selila« od centra prema rubu paralelno s ekspanzijom ledenog pokrova (u fazi G 4 glaciobarička visina je $v_{gl} G 4$). Glaciobarička visina ledenog pokrova prestaje biti samo spojnica dviju tačaka; ona je odsada sferna ploha koja povezuje najviše tačke na grebenu ledenog pokrova — to je zapravo najviša izohipsa na ledenom pokrovu — s horizontalnim projekcijama tih tačaka. Zato u vertikalnom presjeku ledeni pokrov ima sada dvije a ne jednu visinu.

Isto tako i radijus cijelog ledenog pokrova (geometrijski radijus) gubi važnost kao glaciološki parametar. Odsada je važan samo glaciobarički radijus koji nije istovetan s geometrijskim radijusom cijelog ledenog pokrova. (To je zapravo jedan njegov dio.) On je vektor kojem je ishodište projekcija najviše tačke na rubu ledenog pokrova, a veličina mu je spojnica te projekcije i same fronte ledenog pokrova.³⁷ Prema tome, aktivni je dio kontinuiranog ledenog pokrova u tlocrtu kružni vijenac.

Iz svega ovoga moraju se izvesti dva zaključka. Prvo, da se glaciobarička visina povećala, a glaciobarički radijus se smanjio u odnosu na geometrijski radijus te bi iz njihova promijenjenog odnosa rezultiralo povećanje glaciobaričkog tlaka; *nastaje novi impuls za daljnju ekspanziju ledenog pokrova*. Time bi se ujedno mogao riješiti težak problem kako može teći led u ledenom pokrovu golemih dimenzija kad se zna da se njegova visina uopće ne može uporediti s horizontalnim dimenzijama. To nikako ne znači da i rub ledenog pokrova zato mora brže teći nego dosad. (Moramo diferencirati brzinu toka leda od brzine kretanja fronte ledenog

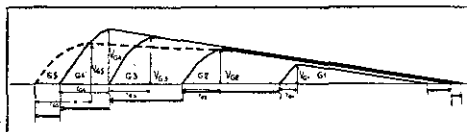
³⁶ J. K. Charlesworth, op. cit., str. 123.

³⁷ Što je rečeno za visinu, mora se reći i za radijus. Glaciobarički radijus počeo se »seliti« prema periferiji zajedno s glaciobaričkom visinom, pa svaka faza (G 3, G 4...) ima svoj glaciobarički radijus, kao što sve one imaju i svoje glaciobaričke visine.

pokrova.) Ablacija — ona je u ovoj etapi razvoja vrlo jaka, jer je ledeni pokrov prodro daleko prema ekvatoru — jest faktor koji regulira uzajaman odnos ovih dviju veličina. Zato, usprkos promijenjenim uvjetima i dalje vrijedi pravilo da ledeni pokrov sve sporije pulsira, što se više približava maksimumu svog površinskog razvoja. Glaciobarički tlak, dakle, poništava negativni »paralizirajući« utjecaj silno povećanih dimenzija ledenog pokrova. Zato ledeni pokrov u maksimumu svog razvoja (ili tačnije: u najvećem dijelu maksimalnog površinskog razvoja) kao cjelina nije imobilna masa; on nije »mrtvi« led, koji se raspada »in situ«. Led i dalje teče, ali fronta stagnira, tj. led erodira i akumulira i u maksimalnoj fazi razvoja. To će trajati sve dotle dok se ne iscrpe rezerva u neposrednoj unutrašnjosti, sve dok ne nestane »leden val« (greben). Tek tada, na kraju površinskog razvoja kad je znatna masa leda već nestala, ledeni pokrov gubi kinetičku energiju. U ovoj fazi povlačenje ledenog pokrova donekle zadržava (ali još dugo neće moći zaustavljati) novi snijeg koji stalno svake godine pada na ledeni pokrov.

Drugo, ako ledeni pokrov ima infinitezimalan broj visina i radijusa, to znači da prostorno dovoljno razvijeni ledeni pokrov postaje vanredno senzitiv; on vrlo teško može zadržati svoj kružni oblik; što je veći, to teže. Zato i najmanja promjena alimentacije ili ablacije u bilo kojem dijelu periferije ledenog pokrova, ili neznatne reljefne zapreke, mogu imati velike posljedice u morfologiji ledenog pokrova, i to u svakom njegovu dijelu. To bi se moglo nazvati *diferenciranim reagiranjem ledenog pokrova*. Zato u rubnoj zoni ledenog pokrova ne postoje dva jednako velika ledenjaka, ni dva ledenja koji bi tekli istom brzinom. Čak i reagiranje na vanjske promjene može biti različito, tj. u fazi opće ekspanzije ledenog pokrova moguće je da se neki ledenjaci jedno vrijeme povlače dok se svi šire, isto kao što u fazi opće recesije neki ledenjaci jedno vrijeme mogu se širiti. To je pokazalo dosadašnje iskustvo.

Dinamički model ledenog pokrova celularnog tipa. Kao i kod prikaza pulsiranja antarktičkog tipa ledenog pokrova, i ovom prilikom može se reći da se dinamički model ekspanzivnog ledenog pokrova celularnog tipa (sl. 5) sastoji od niza statičkih modela. Bitna je



Sl. 5. Dinamički model ekspanzivnog ledenog pokrova celularnog tipa; alimentacija samo iz jednog smjera

Fig. 5. Dynamic model of an expanding ice sheet of cellular type. By far the greatest part of the precipitation comes from one quadrant

razlika u tome da u razmatranje ulazi novi element — promjena ekster-nih faktora, padalina i temperature, što mora utjecati na tok razvoja. Osim toga, orografski utjecaj ledenog pokrova postaje sve evidentniji i sve više utječe na morfologiju ledenog pokrova.

U toku ekspanzije ledenog pokrova celularnog tipa mogu se diferencirati dvije glavne etape. U prvoj etapi (faze G 1, G 2, G 3) ledeni pokrov širi se u svim smjerovima, iako mnogo više u susret glavnom vjetru nego u suprotnom smjeru. Na taj način unutrašnji dio ledenog pokrova postaje sve udaljeniji od putanja depresija, koje fronta ledenog pokrova postepeno potiskuje prema ekvatoru. U stanovitom momentu ledeni pokrov prestaje rasti u zavjetrini: on u tom dijelu stagnira. Sav budući razvoj ledenog pokrova ograničen je isključivo na privjetrinu.³⁸

I u ovom slučaju u centralnom dijelu nastaje imobilna jezgra, a glaciobarički radijus pomiče se prema periferiji (fronti) zajedno s glaciobaričkom visinom ledenog pokrova. Ipak bi postojala neka razlika prema dinamičkom modelu ledenog pokrova antarktičkog tipa. Upravo zbog posebnog mehanizma ekspanzije ledenog pokrova glaciobarička visina je uvijek identična (poklapa se) geometrijskoj visini ledenog pokrova, ali i ona oscilira u vezi s povremenim naletima i recesijama. Sve ostalo je slično kao i u prethodnom slučaju.

Recesija ledenog pokrova

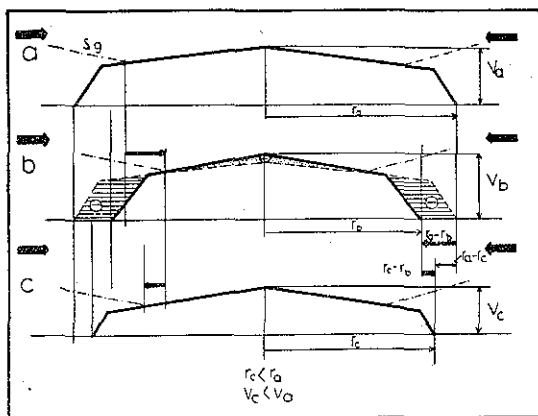
Statički model ledenog pokrova antarktičkog tipa. Opisani diskontinuirani porast ledenog pokrova neće se nastaviti do ekvatora. Razlog je tome promjena ekstraglacijskih uvjeta, odnosno sredine, u kojoj se ledeni pokrov širi, a to je bitno smanjenje padalina uz istovremeno povećanje ablacije, jer se ledena fronta znatno približila ekvatoru. Disproporcija između sve manje mase novog leda koji se neprekidno stvara i sve jače ablacije nije mogla dugo ostati bez vidnih posljedica: ledena fronta se mora zaustaviti. Ledeni pokrov jedno vrijeme stagnira i »troši«
led iz »rezerve«
u neposrednoj unutrašnjosti (iz aktivnog rubnog dijela); nakon izvjesnog vremena on se iscrpe (ne sav), pa se ledena fronta mora početi povlačiti. Ledeni pokrov se nalazi u bitno izmijenjenoj prirodnoj sredini; temperatura je vanredno nisko pala, pa se jako smanjilo isparavanje iz svjetskog mora. Time se i količina padalina automatski smanjila u području ledenog pokrova. Od momenta maksimalnog razvoja pa sve do definitivne likvidacije, ledeni pokrov nikako ne može akumulacijom nadoknaditi gubitak nastao ablacijom; u njegovu režimu

³⁸ Ovakav mehanizam rasta dokazan je za pleistocenske ledene pokrove Sjeverne Amerike (R. F. Flint, op. cit., 319; W. F. Tanner, North-South asymmetry of the Pleistocene Ice Sheet, Science 122, 1955, str. 643; R. F. Flint, The Ice Age in the North American Arctic, Arctic 5, 1952, str. 135) i sjeverne Evrope. Sjevernoamerički ledeni pokrov bio je vrlo tanak i gotovo nepokretan na kanadskom sjeveru, a vrlo debeo i dinamičan na južnom rubu. Isto tako i skandinavski ledeni pokrov bio je najdeblji u Skandinaviji i na jugu, a postepeno se stanjivao prema istoku, sjeveroistoku i sjeveru. Zato se može pretpostaviti da je profil pleistocenskih ledenih pokrova na sjevernoj hemisferi u smjeru glavnog radijusa bio sličan balističkoj krivulji.

Iako za rekonstrukciju izgleda permo-karbonskih ledenih pokrova postoje krajnje oskudni podaci, interesantno je da se iz hipotetičkog presjeka južnoafričkog ledenog pokrova (A. Du Toit, vidi: E. Krenkel, Geologie Afrikas II, Berlin 1928, str. 815) vidi da je i taj pokrov imao »balistički«
profil; ledeni pokrov bio je najdeblji na sjeveroistoku u Zoutpansbergu, a debljina leda postepeno je opadala prema jugozapadu (»isklinjavanje«
); u Kaplandu je nestajao u moru.

se javlja stalni deficit. To je uzrok zašto ledeni pokrov progresivno, uz povremene sve kraće nalete, nestaje i ne može postići svoju prijašnju veličinu.

Mehanizam recesije hipotetičkog ledenog štita antarktičkog tipa formalno je jako sličan mehanizmu ekspanzivnog ledenog pokrova; postoji »samo« razlika u akumulaciji. Hipotetički ledeni pokrov antarktičkog tipa povlači se i nestaje na slijedeći način (sl. 6): faza *a* je stanje privremene ravnoteže. Ledeni pokrov je izložen jakoj ablaciji, pa u rubnoj zoni (*b*) ispod snježne granice, nestaje jedan dio leda (—). (Zbog inercije, ledeni pokrov ne reagira momentano na nastalu promjenu, tj. smanjenje radijusa.) Povlačenjem ledene fronte nastaje mogućnost da zračne mase — koje su mnogo manje maritimne nego u prethodnoj fazi ekspanzije ledenog pokrova — prodru dublje u unutrašnjost nego u fazi *a*, pa one donesu određenu količinu padalina centralnom dijelu, gdje se akumulira stanovita količina snijega (+). To znači da će visina ledenog štita u fazi



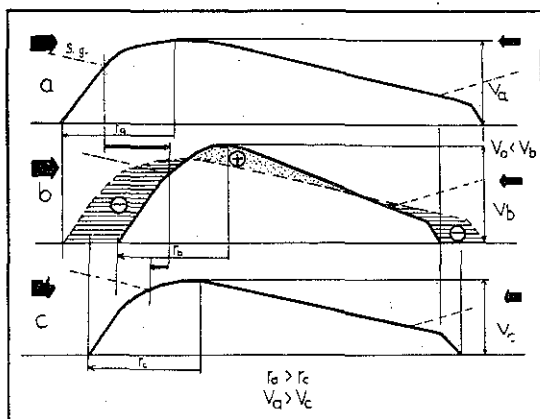
Sl. 6. Statički model recesionog ledenog pokrova antarktičkog tipa. Podjednaka alimentacija sa svih strana, ali je količina padalina jako smanjena

Fig. 6. Static model of a recessional ice sheet of Antarctic type. Equal accumulation from all sides, but the amount of precipitation is considerably smaller than in the expansion phase.

b privremeno malo porasti, vrlo malo, ali u svakom slučaju manje nego u odgovarajućoj fazi ekspanzije; to, uz smanjeni radijus, uzrokuje povećanje glaciobaričkog tlaka, pa u stanovitom trenutku prestaje povlačenje i ledeni pokrov poslije kratkotrajnog zastoja ponovo se počinje širiti. Međutim, led koji je nastao od malene količine snijega, nije dovoljan da se nadoknadi gubitak nastao djelovanjem ablacije (—), pa se ledeni pokrov ne može povratiti u stanje *a*. On se za neko vrijeme »smiruje« u stanju *c*, gdje su i radijus i visina manji od istih veličina u stanju *a*.

Statički model ledenog pokrova celularnog tipa. Statički model recesionog ledenog pokrova celularnog tipa u biti je sličan statičkom modelu ekspanzivnog ledenog pokrova; bitna je razlika opet

samo u veličini vanjskih faktora. Temperatura je znatno pala a, što je još mnogo važnije, količina padalina je mnogo manja nego u odgovarajućoj fazi ekspanzije ledenog pokrova. I u ovom slučaju bitna je činjenica: prevelika disproporcija između jako smanjene akumulacije i ablacije, i to na štetu prve. Ledeni pokrov nikako ne može nadoknaditi taj gubitak. Stanje privremene ravnoteže (a na sl. 7) kod takvog poremećaja odnosa ekstraglacijalnih faktora ne može se dugo održati. Jakom ablacijom nestaje veliki volumen leda (— u profilu b), koji je znatno veći od volumena leda akumuliranog u istom periodu iznad snježne granice (+). Poremećeni odnos visine i radijusa izaziva novu ekspanziju, ali u tom novom naletu ledeni pokrov ne može postići prethodno stanje. U novom stanju ravnoteže (c) i radijus i visina i volumen leda i površina ledenog pokrova *manji* su nego u fazi a. Ledeni pokrov progresivno nestaje.



Sl. 7. Statički model recesionog ledenog pokrova celularnog tipa. Padaline su jako smanjene, a najveći dio dolazi pretežno iz jednog smjera

Fig. 7. Static model of the recessional ice sheet of cellular type. Note the diminution of precipitation which comes mainly from one direction

Dinamički model ledenog pokrova antarktičkog tipa. Cijeli mehanizam recesije ledenog pokrova, od maksimalne faze u toku ekspanzije do definitivne likvidacije, sličan je opisanom statičkom modelu recesionog ledenog pokreta. U početku povlačenja događa se obratno nego pri kraju etape ekspanzije. Glaciobarički radijus povlači se paralelno s povlačenjem glaciobaričke visine, tj. paralelno s frontom ledenog pokrova. Za razumijevanje mehanizma recesije bitno je naglasiti da je količina padalina u svakoj fazi povlačenja manja od količine padalina u odgovarajućoj fazi ekspanzije ledenog pokrova. Posebno značenje u evoluciji ledenog pokrova ima faza kad se reaktivira centralni, dotada imobilni, dio ledenog pokrova, njegova pasivna jezgra. U jednom trenutku se glaciobarički radijus i glaciobarička visina poklope sa stvarnim, geometrijskim radijusom i visinom ledenog pokrova. Ovaj proces reaktiviranja jezgre ne može proći neopaženo, pa bi on — ako je ova pretpostavka

ispravna — privremeno usporio »odumiranje« glacijacije. U podmakloj fazi evolucije, kad je egzistencija ledenog pokrova ozbiljno ugrožena, reaktivirana jezgra daje materijal za jedan nalet, koji će možda biti čak i jači od prethodnog naleta.

Dinamički model ledenog pokrova celularnog tipa. I dinamički model recesionog ledenog pokrova celularnog tipa sličan je dinamičkom modelu ekspanzivnog ledenog pokrova; i on se sastoji od niza statičkih modela recesionog ledenog pokrova. I u ovom slučaju *količina padalina toliko se smanjila da se ne može nadoknaditi gubitak nastao ablacijom*. Celularni ledeni pokrov nestaje mnogo brže nego što je nastao. Izrazita je disproporcija između radijalnih i volumenskih promjena. Za ovaj tip glacijacije karakterističan je posebni način pulsiranja u kasnijoj fazi recesije. Tada se reaktivira imobilna jezgra što, uz određenu količinu snijega koji donose depresije, uzrokuje ekspanziju ledenog pokrova u zavjetrini. Istodobna su dva procesa: u privjetrini ledena fronta se povlači dok se istovremeno širi ledeni pokrov u zavjetrini. Veličina tih procesa je neproporcionalno različita, pa će uskoro prestati i ta slaba i kratkotrajna ekspanzija ledenog pokrova u zavjetrini: ledeni pokrov postaje imobilan, i posljednji ostaci se raspadaju »in situ«.

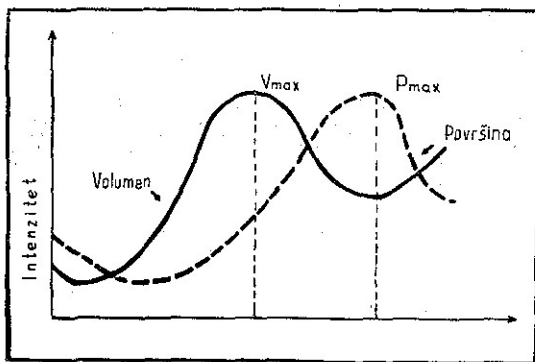
Posljedice promjene strukture ledenog pokrova

Asinhronost površinskog razvoja ledenog pokrova i volumena leda. Iz statičkog modela i ekspanzivnog i recesionog ledenog pokrova vidi se da površina ledenog štita ne raste paralelno s volumenom njegova leda.³⁹ To je direktna posljedica inercije, jer ledeni pokrov ne reagira momentano na eksterne promjene, tj. ni povećanje — kao ni smanjenje — volumena leda neće se smjesta odraziti na površini ledenog pokrova, nego tek s izvjesnim zakašnjenjem. Vidjeli smo da se neposredno poslije postizanja stanja privremene ravnoteže volumen leda, kao i površina ledenog pokrova, neko vrijeme čak smanjuju. Uskoro zatim povećanom alimentacijom počinje se povećavati volumen leda, ali se ledeni pokrov još povlači. Tek nakon određenog vremena povećanje volumena leda počinje se odražavati na površinskom razvoju ledenog pokrova. Počinje postepena ekspanzija ledenog pokrova. Dakle, razvoj nije jednak, jer volumen leda raste brže od površine, pa će ledeni pokrov sadržavati maksimalnu količinu leda (V_{max}) prije nego se postigne odnosna maksimalna površina ledenog pokrova (sl. 8). Od tog momenta volumen leda počinje se smanjivati, ali ledeni pokrov se i dalje površinski širi dok se ne postigne maksimalna površina (P_{max}). Tek od ovog momenta ledeni pokrov reagira na smanjenje volumena leda.⁴⁰ Suprotno tome, u toku recesije površina ledenog pokrova se smanjuje brže nego volumen leda. Ovo pravilo vrijedi za sve faze u razvoju ledenog pokrova, za pulsacije višeg i nižeg reda; postojat će samo razlike u dimenzijama. Razlika između vremena postizanja maksimalne površine i volumena veća je u toku

³⁹ Potrebno je oštro diferencirati maksimum volumena leda od maksimalnog površinskog razvoja. Tu je distinkciju prvi uočio H. Hess (1904).

⁴⁰ R. F. Flint i M. Demorest, op. cit., str. 63.

ekspanzije nego u etapi recesije; osim toga, ona je veća pri kraju ekspanzije nego na njenom početku, veća je u početku recesije nego pri njenom kraju. Isto tako je ta razlika najveća kod ledenih pokrova optimalnih dimenzija, a manja je od ledenih pokrova, manjih ili većih od optimalnih dimenzija. Te razlike u poređenju s trajanjem jako razvijenih glacijacija nisu velike, ali se suvremenim metodama ipak dađu ustanoviti.⁴¹ Iz krivulje se vidi da je ekspanzija leda mnogo polaganija od recesije, pa krivulja glacijala i interglacijala, isto kao i krivulja cijele glacijacije, nije sinusoida nego je asimetrična krivulja.



Sl. 8. Asinhronost površinskog i volumenskog razvoja ledenog pokrova. Ledeni pokrov ima najveći volumen (V_{max}) prije postizanja maksimalne površine (P_{max})

Fig. 8. The volume of the ice and the area of the ice sheet do not grow synchronously. The ice sheet has its maximum volume (V_{max}) long before it attains its maximum surface (P_{max})

Danas postoje pouzdan podaci o trajanju posljednjeg glacijala (v. str. 95). Iz poznatog dijagrama (sl. 9) temperature površinske vode Karipskog mora u posljednjem glacijalu⁴², kao i iz shematskog toka Würma u srednjoj Evropi⁴³, jasno se vidi da je temperatura padala i rasla paralelno s površinskim razvojem ledenih pokrova na sjevernoj hemisferi. Obje su krivulje izrazito asimetrične, iz čega se može zaključiti da su se ledeni pokrovi postepeno širili (otud i polagan pad temperature), a vrlo su se naglo povukli (naglo otopljavanje u fazi recesije ledenih pokrova). Na osnovu ovih činjenica, kao i iz dosad poznatih istraživanja fluktuacija morske razine u posljednjem glacijalu, može se zaključiti da ta relacija (tj. relacija između trajanja ekspanzije i recesije) za volumen leda iznosi 1:1, a za površinu 4:1, tj. ledeni pokrov ima najveći volumen u sredini glacijala ili glacijacije, a najveća površina se postiže gotovo pri kraju glacijala ili glacijacije.

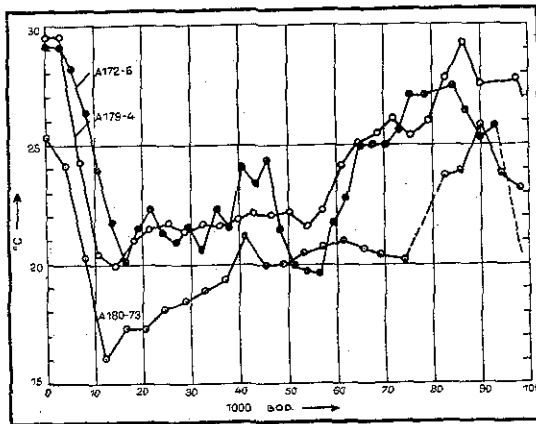
Tok leda u ledenom pokrovu. Iz opisanog mehanizma pulsiranja ledenog pokrova i morfoloških promjena u vezi s time može se izvesti i nekoliko pretpostavki o toku leda u ledenom pokrovu. Već u

⁴¹ F. E. Zeuner, The Pleistocene Period, London 1959, str. 200.

⁴² H. E. Suess, Absolute chronology of the last glaciation, Science 123, 1956, str. 355.

⁴³ P. Woldstedt, Über die Gliederung der Würm-Eiszeit und die Stellung der Lössen in ihr, Eiszeitalter u. Gegenwart 7, 1956, str. 82.

toku prethodnog razmatranja vidjeli smo da morfologija ledenog pokriva nije samo pasivna posljedica toka leda. Kad ledeni pokrov prijeđe izvjesnu graničnu vrijednost, on sam određuje mehanizam toka leda. Prema tome, morfologija ledenog pokriva i tok leda u uskom su uzročno-posljedičnom odnosu, pri čemu jedan utječe na drugoga. Taj odnos nije fiksni. On se mijenja u toku evolucije ledenog pokriva. Zato se shematski prikaz toka leda u ledenom pokrivu bitno razlikuje od sheme koju su predložili P. Woldstedt,⁴⁴ R. F. Flint⁴⁵ i L. M. Gould.⁴⁶ Oni pretpostavljaju



Sl. 9. Temperatura površinske vode Karipskog mora u posljednjem glacijalu (H. E. Suess 1956)

Fig. 9. The temperature of the surface water of the Carribean Sea during the last glacial age

da led teče u cijelom ledenom pokrivu. Gould, npr., zamišlja da led na Antarktici radialno teče na sve strane iz jednog imaginarnog centra koji se nalazi u blizini južnog pola. P. Woldstedt slično pretpostavlja da je tekao led u sjevernoevropskom ledenom pokrivu u glacijalu Elster. (U centralnom dijelu led je »tonuo«, tj. kretao se samo vertikalno.) Pri tom navodi da je glavna zona kretanja pri dnu ledenog pokriva, a velika je upravo koliko i njegov promjer. I po Flintovu mišljenju, led iz centra hipotetskog ledenog pokriva otječe prema periferiji.

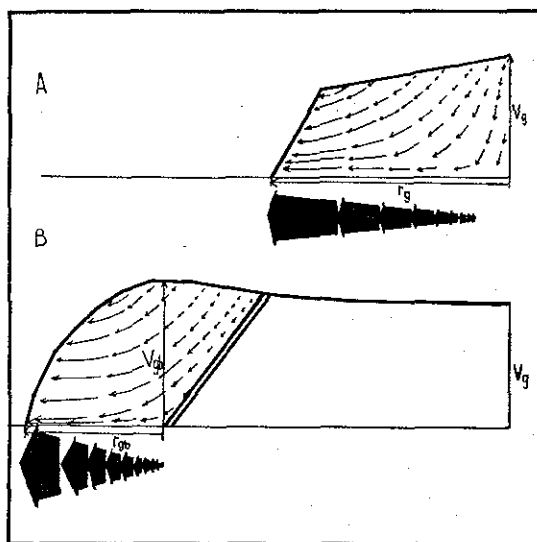
Po svemu sudeći, tok leda mora biti kompliciraniji (sl. 10). U početnim fazama razvoja ledenog pokriva (A) led teče onako kako pretpostavljaju spomenuti autori; u centru led »tone« i radialno teče prema periferiji. (Vektori zapravo označavaju samo smjer toka leda; razlika u brzini toka leda na periferiji i dublje u unutrašnjosti tako je velika da se ne može grafički prikazati proporcionalnom veličinom vektora.) U daljnjim

⁴⁴ P. Woldstedt, Der Bewegungsvorgang beim Inlandeis, Peterm. geogr. Mitt. 96, 1952, 4, str. 268.

⁴⁵ R. F. Flint, op. cit., str. 21.

⁴⁶ L. M. Gould, Glaciers of Antarctica, Amer. Philos. Soc. Proc. 82, 1940, str. 835.

fazama razvoja ledenog pokriva dolazi do bitnih strukturnih promjena koje utječu i na tok leda. Kako smo već vidjeli, u centralnom dijelu led postaje sve nepokretniji dok konačno ne prestane teći; mobilan je samo periferni dio, pa u maksimumu ekspanzije (u širem smislu riječi) led teče kako je prikazano u profilu B.⁴⁷ Imobilan led sličan je krnjem stošcu



Sl. 10. Hipotetički tok leda u ledenom pokriva. A, početne i završne faze; B, maksimalna faza glacijacije (glacijala), odnosno maksimalna faza razvoja ledenog pokriva

Fig. 10. An idealized illustration of supposed streamlines of flow in an ice sheet. A, The first and the last stages; B, the phases of maximal extent of the ice sheet

vrlo velikih dimenzija. Od ruba tog stošca led teče prema periferiji sve brže i maksimalna je brzina na samoj fronti ledenog pokriva. Poslije postignutog maksimuma ledeni pokrov se povlači, a imobilni stožac se smanjuje; u jednom momentu ga potpuno nestaje (stanje slično kao u A).

⁴⁷ J. K. Charlesworth, op. cit., str. 123: Neki su pretpostavljali da se led ne kreće centrifugalno u cijelom ledenom pokriva, jer je led imobilan u centralnom dijelu. Tok leda ograničen je samo na rubni dio. Poslije početne faze ledeni pokrov raste i širi se akumuliranjem snijega na rubu, a ne pritjecanjem leda iz centralnog dijela.

Novije istraživanja Antarktike potvrdila su ovaj zaključak. U unutrašnjim dijelovima Antarktike ni jedna ekspedicija nije pronašla bilo kakve vanjske znakove po kojima bi se moglo zaključiti da se led kreće (L. D. Dolgušin, Gljaciološkičke nabljudenija v Antarktidi, Izv. AN SSSR serija geograf. 1958, 6, str. 16). Antarktički ledeni pokrov »živi« samo na periferiji. To potvrđuje i činjenica da izmjerena srednja brzina kretanja leda u području stanice Mirnyj iznosi 250 m/god.; 10 km u unutrašnjosti brzina opada na 83 m/god., a na 200 km iznosi tek 17 m/god. Prema tome, da bi iz zone 200-og km led došao do obale, treba da prođe 8 000 godina, odnosno nekoliko stotina tisuća godina da dođe iz centra ledenog pokriva. (P. A. Šumskij, Issledovanie lednikovoga pokriva Antarktidy, Priroda 46, 1957,

Ovo su samo krajnji slučajevi; svi ostali intermedijarni slučajevi nalaze se između opisanih ekstremnih stanja. Prema tome: a) tok leda u ledenom pokrovu različit je u njegovim pojedinim dijelovima, b) tok leda je različit u svakoj fazi evolucije ledenog pokrova. Zato se ne može dati »generaliziran«, hipotetički tok leda u ledenom pokrovu, ako se istovremeno ne označi u kojoj se fazi razvoja nalazi ledeni pokrov; potrebna je, dakle, i vremenska oznaka, jer ne postoji neki »srednji« tok leda analogan, npr., srednjoj godišnjoj temperaturi.

Intenzitet glacijacije. Iz relacije volumena leda i površine ledenog pokrova vidi se da je volumen leda bitno važan za režim ledenog pokrova, jer on određuje tendenciju njegova razvoja. Površina ledenog pokrova određuje veličinu promjena nekih posljedica glacijacije kao što su, npr., temperatura i padaline. Zato je intenzitet glacijacije posljedica radialnih promjena ledenog pokrova. Intenzitet glacijacije je isto što i njen površinski (a ne volumenski) razvoj.

Kronologija kvartarne glacijacije postavljena je na već prilično čvrste temelje. Najviše od svega zapanjuje činjenica zašto su glacijali na sjevernoj hemisferi bili tko kratkotrajni, iako je ledom bilo prekriveno oko 30 mil. km² kopna — tome treba dodati oko 15 mil. km² zaleđenog mora — tj. nekoliko puta više nego na Antarktici, koja je još gotovo sva prekrivena ledom.⁴⁸ Kakav bi, dakle, postojao odnos između površine ledenog (odnosno svih pokrova zajedno, plus zaleđeno more) i trajanja glacijacije? Do rješenja se može doći poznavanjem fizičkih svojstava glacijacije. Led je funkcija temperature i padalina; optimalan odnos može se postići samo na kontinentu optimalnih dimenzija. Strahovito zahlađenje je posljedica silnih dimenzija glacijacije, a u prejakom zahlađenju je klica propasti glacijacije. Što je zahlađenje jače, tj. što je veća zaleđena površina, to bi glacijacija bila kratkotrajnija. Iz toga bi se moglo zaključiti da je trajanje glacijacije obrnuto proporcionalno s njenim prostornim dimenzijama. To znači da će najdulje trajati glacijacija optimalnih dimenzija; povećanjem zaleđene površine iznad optimalne veličine ne produžuje se »život« glacijacije; nasuprot, on se — skraćuje.

Zbog neupravno proporcionalnog odnosa između površine ledenog pokrova i vremena njegova trajanja, raspon u trajanju pojedinih glacijacija bio bi vrlo velik. Napose će biti velika razlika u trajanju glacijacije

7, str. 86). Iz ovoga se vidi da negdje u zoni »grebena« potpuno prestaje kretanje leda. Zato V. M. Kotljakov (Osobnosti stroenija verhnjej toščki lednikovogo pokrova central'nyh rajonov Antarktiki, Izv. AN SSSR serija geograf. 1959, 4, str. 15) zaključuje da se današnji antarktički ledeni pokrov sastoji od leda starijeg od milijun godina.

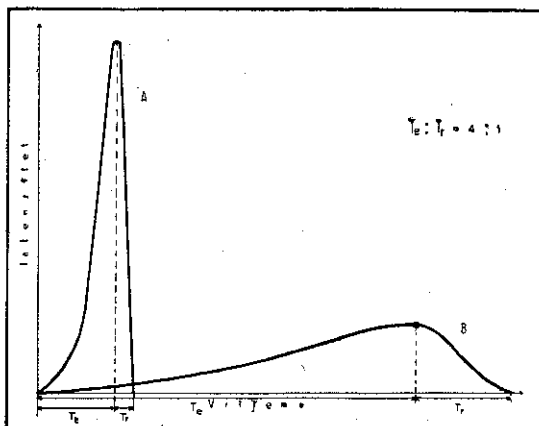
Gornji zaključak potvrđuje i činjenica da led ledenih bregova nije jako metamorfoziran; to upućuje na zaključak da se nije stvarao dublje u kontinentu (B. Vtjurin, Izučenie ledjanyh beregov i ajsbergov v Antarktike, Priroda 47, 1958, 4, str. 60). Do sličnog zaključka došlo je i geomorfološkom studijom antarktičkih oaza. Jedna od karakteristika oaza jest nedostatak akumulacionih oblika; ukoliko se i nađe na eratičke blokove, to su isključivo iste stijene kao i podloga same oaze. To bi se moglo shvatiti kao dokaz da led, koji je nekada prekrivao oaze, nije dolazio iz daleke unutrašnjosti nego iz neposrednog zaleđa. (G. Avsjuk, K. K. Markov i P. A. Šumskij, Geografičeskie nabljudenija v antarktičeskom »oazise«, Izv. Vsesoj. geograf. obšč. 88, 1956, 4, str. 325)

⁴⁸ R. F. Flint, op. cit., str. 53.

optimalnih dimenzija (npr. Antarktika u kvartaru) i glacijacije, tj. pojedinih glacijala, abnormalno velikih dimenzija (npr. kvartarna glacijacija ili glacijali sjeverne hemisfere).

Čini se da zakonitost odnosa intenziteta i trajanja glacijacije mnogo dublje zadire u samu suštinu glacijacije nego što bi se to u prvi mah i pomislilo. Budući da je trajanje glacijacije golemih dimenzija vrlo kratko u poređenju s glacijacijom optimalnih dimenzija (možda čak 20—30 puta kraće), svi su procesi vanredno ubrzani.⁴⁹ Radioaktivnim mjerenjem vremena pokazalo se da su kvartarni ledeni pokrovi na sjevernoj hemisferi ekspandirali i nestajali u vremenu koje, u poređenju s njihovim prostornim dimenzijama (kao i u poređenju s Antarktikom), graniči gotovo s nevjerovatnim.

Generalizirana krivulja intenziteta glacijacije (bez superponiranih glacijala i interglacijala) — kako je izvedeno iz pulsiranja hipotetičkog



Sl. 11. Generalizirana krivulja intenziteta i trajanja glacijacije (bez sekundarnih pulsacija). Trajanje glacijacije u obrnutoj je proporciji s njenim površinskim razvojem. A, približno trajanje glacijacije golemih dimenzija; B, trajanje glacijacije s dimenzijama bliskim optimalnim dimenzijama

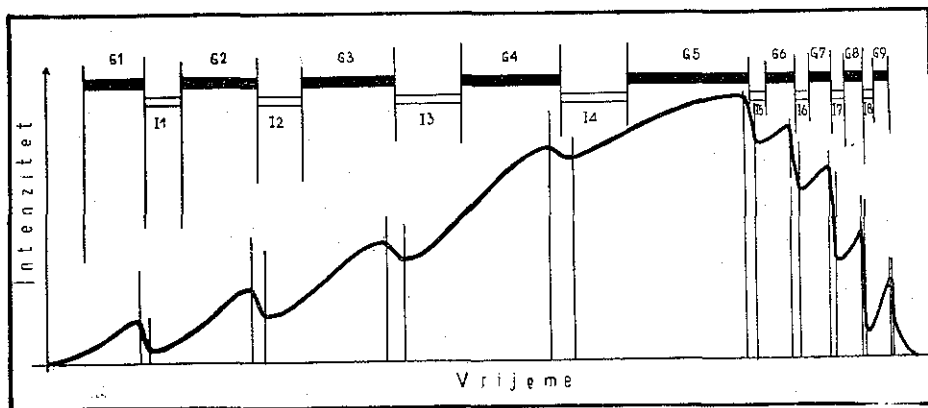
Fig. 11. A generalized curve of the intensity and duration of the glaciation (without the secondary pulsations, i. e. without the glacials and interglacials). The duration of the glaciation is inversely proportional to the surface extent of the ice. A, The duration of the glaciation of enormous dimensions; B, the duration of the glaciation with optimal dimensions

ledenog pokrova jest asimetrična krivulja (sl. 11), pri čemu visina krivulje ovisi o intenzitetu glacijacije. Iz generalizirane krivulje intenziteta glacijacije gotovo optimalnih dimenzija (B) i glacijacije silnih dimenzija (A), te nekih već iznijetih pretpostavki, vidi se da je trajanje ekspanzije (T_e)

⁴⁹ Opisanoj relaciji intenziteta i trajanja glacijacija ustanovili smo na osnovu pretpostavke da su kvartarni glacijali na sjevernoj hemisferi genetski bili zapravo samostalne glacijacije, pa bi to zapravo bio glavni uzrok golemih razlika u trajanju glacijala na sjevernoj hemisferi i glacijacije Antarktike.

u oba slučaja u određenoj proporciji s trajanjem recesije (T_r): taj odnos čini se da iznosi 4 : 1, tj. ledeni pokrov 4 puta brže nestaje nego što se stvara. Generalizirana krivulja glacijacije prevelikih dimenzija bit će slična krivulja A ona će se brzo razviti, imat će goleme dimenzije (3—4 puta veće od glacijacije optimalnih dimenzija, napose ako se uzme u obzir površina zaleđenog mora), ali će upravo zato još brže nestati. Suprotno tome, glacijacija optimalnih dimenzija (nešto slično kao krivulja B) relativno će polako nastati i isto tako relativno polako nestati. Ali, bez obzira na dimenzije glacijacije, omjer između trajanja ekspanzije i recesije ostaje uvijek konstantan (4 : 1).

Evolucija ledenog pokrivača nije kontinuiran proces (sl. 12); ona se sastoji od niza povremenih naleta (glacijala) i povlačenja (interglacijala). Svaka pulsacija (»ciklus«), koja se sastoji od jednog glacijala i dijelova dvaju interglacijala, u suštini je slična generaliziranoj krivulji glacijacije, samo su dimenzije jako smanjene. Osim toga, trajanje pulsacija, tj.



Sl. 12. Intenzitet, odnosno površinski razvoj, glacijacije sa superponiranim oscilacijama drugog reda (glacijali G 1, G 2 itd., i interglacijali I 1, I 2 itd.)

Fig. 12. Generalized curve of the intensity (i. e. the surface extent) of the glaciation with superimposed secondary pulsations (glacials and interglacials)

glacijala i interglacijala, nije isto; ono raste od početka glacijacije prema njenom maksimumu — ledeni pokrov radikalnim povećanjem sve sporije »diše« — a opada od maksimuma prema kraju glacijacije. Na generaliziranu krivulju glacijacije treba superponirati oscilacije drugog reda. To bi bila već prilično realna slika toka glacijacije, na kojoj se vidi opći tok glacijacije zajedno s glacijalima i interglacijalima.

Postoje pulsacije još nižeg reda, stadijali i interstadijali. To su zapravo prve univerzalne reakcije ledenog pokrivača na porast ili smanjenje akumulacije ili ablacije. Sve tri spomenute pulsacije su univerzalne, tj. samo su one vezane uz strukturu, odnosno mehanizam pulsiranja ledenog pokrivača kao cjeline. Smjena stadijala i interstadijala stvarno je ista kao i pulsacije prvog i drugog reda; razlika je samo u dimenzijama.

Trajanje svih pulsacija bit će, dakle, vrlo različito, ali ne kaotično, jer postoji određena zakonitost.⁵⁰ Trajanje će biti različito između pulsacije istog reda veličine i pulsacija raznog reda veličine. Iz toga bi slijedilo da će glacijali u etapi ekspanzije glacijacije (G 1, G 2, G 3...) biti sve dulji, a u etapi recesije (G 6, G 7...) sve kraći. Najdulje će trajati glacijal koji »padne« u maksimum glacijacije (G 5), a svi drugi će biti kraći od njega. Isto tako i interglacijali u etapi ekspanzije (I 1, I 2, I 3...) bit će sve dulji, a u fazi recesije (I 5, I 6...) sve kraći. Najdulji interglacijal bit će između maksimalnog glacijala i glacijala neposredno prije njega; svi ostali interglacijali bit će kraći od njega. Isto pravilo vrijedi i za stadijale i interstadijale; oni su sve dulji od početka prema maksimalnoj fazi glacijala, a sve su kraći od maksimuma glacijala, odnosno interglacijala prema njihovu kraju. Prema tome je trajanje glacijala i interglacijala, kao i stadijala i interstadijala, tačno određeno u okviru cijele glacijacije, odnosno glacijala i interglacijala. Iz krivulje se vidi da pulsiranjem ledenog pokrova dolazi do relativno malenih površinskih i volumenskih promjena ledenog pokrova u jednom »ciklusu«, tj. najveći dio ledenog štita ostaje izvan procesa u toku jednog ciklusa. Zato se ne bi moglo govoriti o potpunom nestanku ledenog pokrova u interglacijalima i stvaranju novog ledenog pokrova u glacijalima.

Mehanizam glacijacije u idealnoj i realnoj sredini

Mehanizam postanka i razvoja glacijacije antarktičnog tipa. Neki će se izvoditi bolje razumjeti ako se opisani hipotetski mehanizam pulsiranja ledenih pokrova prikaže u uvjetima nešto bližima prirodi. U ovom slučaju neće biti prikazane oscilacije nižeg reda, pa će se pričiniti da su sve promjene kontinuirane, što zapravo nisu. Težište je na prikazu relacije ledenog pokrova i prirodne sredine u kojoj pulsira, da bi se ilustrirale postavke na kojima se osniva mehanizam glacijacije.

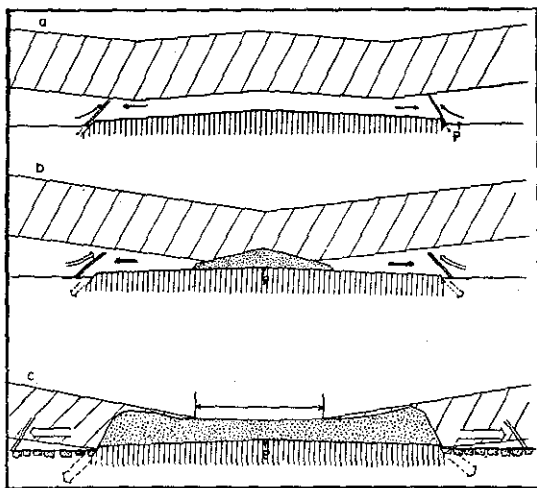
Kopnena masa optimalnih dimenzija okružena oceanom (sl. 13) sve je bliža polu P (a). Znatan dio kontinenta zimi (polarna noć) jako se ohladi. Uz obalu se more zaledi; stvaraju se sve veće i veće količine hladne vode, koja pomalo hladi svjetski ocean; termičke razlike između kopna i mora sve su veće što uzrokuje pojačanu atmosfersku cirkulaciju i diferenciranje zračnih masa. Opće postepeno zahlađenje uzrokuje spuštanje kriosfere. Svi opisani procesi sporo se nastavljaju dalje. Ako tada (b) dođe do orogeneze i epirogeneze, onda postoje svi uvjeti za nastup glacijacije.⁵¹ Poznatim procesom (planinski ledenjaci — pijedmontski ledenjaci — ledeni pokrov) embrionalni ledeni pokrov će prijeći u pokrov velikih dimenzija. Visoki albedo snijega i leda uzrokuje bitne promjene u bilanci

⁵⁰ Uzajaman odnos trajanja glacijala i interglacijala (sl. 12) treba zasad uzeti kao gotovu činjenicu. Put kojim smo došli do pretpostavke o pravilnom pulsiranju glacijacije bit će detaljnije prikazan kasnije.

⁵¹ Radi jednostavnosti prikaza, novi planinski sistem nije unijet na sliku; osim toga, planinski lanac će biti nabran na rubu a ne u centru kopna. Isto tako ni pol ne mora biti u središtu kontinenta. Ako postoje ostali uvjeti, glacijacija će nastati i uslučaju da se pol nalazi u bilo kojem dijelu kontinenta.

zračenja; ledeni pokrov počinje mijenjati prirodne uvjete u smjeru povoljnijem za daljnju ekspanziju. Nad ledenim pokrovom sve se češće stvaraju i sve se dulje održavaju anticiklonalna stanja; prodori hladnih zračnih masa u niže geografske širine sve su intenzivniji; termički i barički gradijent sve su veći i depresije su sve dublje. Zaleđivanje mora je sve trajnije, pa se ohlađivanje morske vode i dalje naglo nastavlja.

Bitan je odnos ledenog pokrova i kriosfere koja se i dalje spušta, pa se najveći dio ledenog pokrova nalazi iznad (donje) snježne granice; ledeni pokrov je »uronjen« u kriosferu. Analogno terminu »depresija snježne granice«, za ovaj odnos i dalje bi se mogao upotrebljavati termin *depresija kriosfere*. Budući da je gornja granica kriosfere još iznad ledenog pokrova, u ovom bi se slučaju radilo o *parcijalnoj depresiji kriosfere*. Kad se i gornja granica kriosfere bude spustila na ledeni pokrov, onda će to biti *totalna depresija kriosfere*.



Sl. 13. Odnos ledenog pokrova i kriosfere u raznim fazama evolucije glacijacije

Fig. 13. The spacial relation between the ice sheet and the chryosphere

U slijedejoj etapi (c) ledeni pokrov je postigao gotovo maksimalne dimenzije i dospio je sve do obale. Svi spomenuti procesi dovedeni su do krajnje granice. Polarna fronta i depresije su jako potisnute prema ekvatoru, a goleme količine hladne morske vode osjetljivo su snizile temperaturu svjetskog mora čak i na drugoj hemisferi (uz pretpostavku da je moguća komunikacija). Sve te promjene dovele su do totalne depresije kriosfere, pa je cijela centralna zona ledenog pokrova u stvari bijela pustinja bez padalina, ali ni na samom rubu ne pada mnogo oborina. »Ledeni val« nestane i ledeni pokrov, po već opisanoj shemi, počne se ritmički povlačiti. I u ovoj etapi odnos ledenog pokrova i kriosfere bitno je važan, a u suštini je sličan njihovom odnosu u etapi ekspanzije ledenog pokrova. U prvoj fazi povlačenja kriosfera se ritmički diže i spušta sinhrono

s pulsiranjem ledenog pokrova.⁵² U nešto kasnijoj fazi povlačenja leda gornja granica kriosfere se »odlijepi« od površine ledenog pokrova i znatno područje u centru opet postaje zona akumulacije. Postepenom likvidacijom ledenog pokrova njegova se visina toliko smanjila da će se sva kriosfera odijeliti od ledenog pokrova i njega će uskoro potpuno nestati. »Odljepljivanje« kriosfere moglo bi se nazvati *izdizanje kriosfere*. U prvom slučaju, kad se od ledenog pokrova odijeli samo gornja granica kriosfere, onda bi to bilo *parcijalno* izdizanje kriosfere; u drugom slučaju, kad se i donja snježna granica, a tim i cijela kriosfera, odijeli od ledenog pokrova, radilo bi se o *totalnom izdizanju kriosfere*.

Snježna granica i poremećaj pravilnosti pulsiranja. Osciliranje akumulacionog pojasa u etapi evolucije ledenog pokrova između totalne depresije i parcijalnog izdizanja kriosfere vjerojatno nije jednostavno. Taj je proces vanredno važan i čini se da kod ledenog pokrova, čija fronta nestaje u moru, može dovesti u pitanje ispravnost nekih shvatanja. Naime, treba imati na umu činjenicu da: a) i relativno malene radijalne promjene ledenog pokrova izazivaju velike promjene površine ledenog pokrova, b) stalno ili sezonsko zaleđivanje mora oko ledenog pokrova (milijuni kvadratnih km) imaju golemu važnost za opći tok evolucije ledenog pokrova. U ovoj fazi milijuni kvadratnih kilometara morskog leda u fizičkom smislu zapravo su površinsko proširenje ledenog pokrova. Morski led važan je zato što isparavanje morske vode smanjuje na minimum, a vanredan je reflektor. Zato direktan utjecaj ledenog pokrova u ovoj fazi ne prestaje na periferiji ledenog pokrova, tj. na morskoj obali. Najveći dio padalina u takvim uvjetima padne na taj morski led, tj. uopće ne ulazi u »bilancu« ledenog pokrova. U stanovitim uvjetima — kad je ledeni pokrov antarktičkog tipa nešto veći od optimalnih dimenzija — može se dogoditi da se neko vrijeme najveći dio ledenog pokrova nalazi iznad gornje snježne granice. Donja snježna granica već je na morskom ledu; poslije nekog vremena ona će biti čak pred obalom, na zaleđenom moru. Stagnacija fronte, uz stalnu »produkciju« hladnoće, još više ohladi krajeve u nižim geografskim širinama. Količina padalina još se više smanji, pa se gornja snježna granica dublje spusti od donje snježne granice; u krajnjem slučaju može doći do isklinjavanja kriosfere. Iscrpljivanjem rezerve produkcija ledenih bregova opada, šelfski led se povlači, a recesija zahvati i sam ledeni pokrov. Uvjeti su tako nepovoljni da ni porast temperature ni izvjesno povećanje padalina dugo ne mogu dovesti do bilo kakve promjene. Ona ne može nastati sve dok je more uz kontinent blokirano ledom. Tek kad se ledeni pokrov povuče još dublje u kontinent, kad se najveći dio obale i mora oslobodi od leda, stvaraju se povoljne mogućnosti za povećanje akumulacije i nešto dublje u ledenom pokrovu; počinje nagomilavanje leda za novi, budući nalet.

Snježna granica je ploha iznad koje se snijeg održi cijelu godinu; ona odvaja zonu ablacije od zone akumulacije. Snježnu granicu određuje niz elemenata od kojih su najvažniji: količina i vrsta padalina, temperatura, reljef planine, relativna vlažnost, snaga i smjer vjetrova, naoblaka. Intere-

⁵² To nije jednostavna translacija, jer se donja i gornja snježna granica ne dižu i ne spuštaju paralelno nego za različite iznose.

santno je da su istraživanja južnopolarnih krajeva pokazala da se klimatska snježna granica, možda s izuzetkom najsjevernijeg dijela Grahamske zemlje, nalazi ispred antarktičke obale. To znači da je cijelo područje (Antarktika) izloženo aktivnoj glacijaciji. Tako, međutim, nije i to ne potvrđuju promatranja.⁵³ Orografska snježna granica, kako se vidi u područjima koja nisu zahvaćena ledenom, u izuzetnim je slučajevima iznad morske razine.⁵⁴

Golema većina Antarktike, po klasičnim shvatanjima snježne granice, nalazi se iznad snježne granice, tj. u zoni akumulacije.⁵⁵ Ali svi znaci pokazuju da je Antarktika u posljednjem glacijalu bila još jače zaleđena — u obalnoj zoni led je bio 300—600 m deblji nego danas — što bi značilo da se antarktički ledeni pokrov nalazi u općem povlačenju, iako se sav nalazi u zoni akumulacije. To znači da snježna granica u fazi kad ledeni pokrov poprma kontinentske dimenzije, a fronta mu stane na morskoj obali, nema praktički nikakvu važnost. Snježna granica spušta se i diže pasivno, onako kako pulsira ledeni pokrov, a ne obratno, kako se općenito danas misli. Ako se sada prisjetimo da je snježna granica u razini mora pred morskom obalom, onda se vidi da se odvaljivanje ledenih bregova i ostali oblici ablacije događaju iznad snježne granice, u tzv. zoni akumulacije; snježna je granica u ovakvim okolnostima — iščezla.⁵⁶ *Tok leda, koji je ovisan samo o kapacitetu rezervoara u neposrednoj unutrašnjosti i količine padalina, jedini je regulator pulsiranja ledenog pokriva.* Razvijeni ledeni pokrov ne pulsira ni pod kakvim utjecajem dizanja ili suštanja snježne granice; suština i glavni uzrok svih promjena u toku glacijacije nalazi se u samom ledenom pokriva.

Prema tome, dizanje snježne granice — i, što je još značajnije, opće otoplavanje ili opći porast temperature — nije uzrok, nego baš suprotno: to je posljedica povlačenja ledenog pokriva.⁵⁷ Ali kad opći porast temperature prijeđe određenu granicu, on postaje aktivan faktor koji bitno pridonosi povlačenju ledenog pokriva.

Rečeno je što sve, po današnjih shvatanjima, određuje snježnu granicu; spominje se sve samo ne — pritjecanje leda. Snježna granica na ledenom pokriva ovisi prije svega o pritjecanju leda, a tek sada treba dodati sve druge navedene faktore.

Privremenim iščezavanjem donje snježne granice, granica kriosfere nije više jasno određena. Zato je bolje uzimati u obzir cijelu kriosferu, odnosno pojas koji nastaje u njenom dodiru s podlogom. Taj pojas u maksimalnoj fazi ekspanzije nema neko veće značenje i neće ga imati

⁵³ W. Meinardus, Klimakunde der Antarktis u Handbuch der Klimatologie B IV, T. U, Berlin 1938, str. 42.

⁵⁴ J. K. Charlesworth, op. cit. str. 17.

⁵⁵ S. V. Kalesnik, Priroda Antarktiki, Izv. Vsesoj. geograf. obšč. 81, 1949, 6, str. 561.

⁵⁶ J. K. Charlesworth, op. cit., str. 650: Ledeni pokrivi, tijela nepravilna oblika i neodređene veličine, nisu pogodni za bilo kakvu matematičku analizu. U svakom slučaju oni vjerojatno nemaju snježnu granicu nego snježnu zonu kao što je ustanovljeno na današnjem Arktiku.

⁵⁷ C. E. Brooks, op. cit., str. 269: Odvaljivanjem ledenih bregova smanjuje se površina ledenog pokriva pa će, prema tome, opadati i njegova moć hlađenja; to je uzrok poboljšanja klime.

sve dok »ledeni val« ne nestane u oceanu i dok se ledeni pokrov ne počne povlačiti.⁵⁸ Recesioni ledeni pokrov »vuče« za sobom kriosferu; bitna će promjena nastati onda kad se ledeni pokrov toliko povuče da se obala i more oslobode od leda. Važno je da akumulacijski pojas zahvati šire područje u zoni glaciobaričke visine, jer akumulacija snijega samo u toj zoni može stvoriti uvjete za narednu ekspanziju. Nije toliko važno koliko snijega padne na ledeni pokrov; mnogo je važnije gdje on pada. Zato neće biti problem, ako se u budućnosti ustanovi da se na rubu Antarktike povećava količina padalina, a da se ledeni pokrov i dalje povlači. Da se ustanovi režim ledenog pokrova, malo koriste podaci sa stanica na samom rubu ledene fronte. Za to su najautoritativniji podaci iz pojasa 200—1 500 km u unutrašnjosti.⁵⁹

Sad se može konkretnije formulirati spomenuti zaključak o režimu ledenih pokrova. U kasnoj fazi povlačenja ledenog pokrova počinju se stvarati uvjeti za buduću ekspanziju; isto tako ekspanzija leda je krajnji rezultat procesa koji su djelovali davno prije početka naleta. Još konkretnije: ekspanzija ledenog pokrova u stadijalu i glacijalu posljedica je akumulacije u interstadijalu i interglacijalu; i obratno: ekspanzijom ledenog pokrova i nestankom »ledenog vala« u stadijalu i glacijalu smanjuje se akumulacija snijega; ledeni pokrov prestaje dalje ekspanzirati i stvaraju se uvjeti za nastup interstadijala i interglacijala.⁶⁰

Mehanizam postanka i razvoja glacijacije celularnog tipa. Celularni tip glacijacije je mnogo kompleksniji od antarktičkog tipa, jer su pojedini ledeni pokrovi izolirani, ne postoji direktna veza među njima.

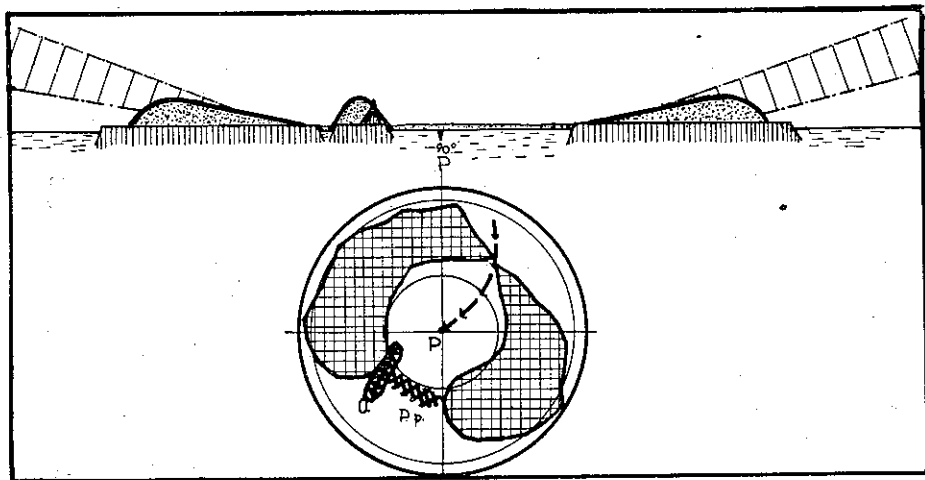
Postanak celularne glacijacije izgledao bi po prilici ovako: dva hipotetička kontinenta odvojena su sredozemnim morem oceanskih dimenzija (sl. 14). Morska cirkulacija je slobodna, pa se vodene mase stalno izmjenjuju. Sami kontinenti su okruženi oceanima i dovoljno su veliki za razvoj ledenih pokrova. Tom sistemu se približava pol (P), i od stanovitog trenutka dijelovi obaju kontinenata i sredozemnog mora sve su duže pod utjecajem polarne noći. U takvim uvjetima povećava se kontinentalnost klime; zime postaju sve oštrije, a snijeg je sve češća padalina. Taj proces postepenog hlađenja traje mnogo milijuna godina i u toku vremena po-

⁵⁸ Snježna granica je funkcija temperature i padalina. Ona je realna i definirana kad su temperature i padaline u »normalnim« granicama, tj. kad su slične optimalnim vrijednostima. Ekscesivni pad temperature, smanjenje padalina na minimum, bitan poremećaj u odnosu pojedinih faktora ablacije, tj. nestajanje ledenog pokrova u moru, moraju se odraziti i na formalnoj manifestaciji uzajamnog odnosa tih faktora. Ona će opet postati realna kad temperatura poraste a količina padalina postane veća. Ona će ostati realna veličina na ledenom pokrovu, koji prodire daleko prema ekvatoru i čija se ledena fronta nalazi na kopnu a ne na moru.

⁵⁹ R. F. Flint, op. cit., str. 37: U neposrednoj blizini grenlandskog ledenog pokrova postoje manje ledene kape i dome čiji promjer iznosi oko 60 km; one su samo na jednoj strani povezane s glavnom ledenom masom, ili su čak i potpuno izolirane od nje. Ustanovljeno je da pozitivni režim jedno vrijeme prevladava istovremeno dok se cijeli ledeni pokrov nalazi u općem povlačenju.

⁶⁰ Ovdje treba imati na umu činjenicu da su glacijacije trajale različito vrijeme, pa su i pulsacije nižeg reda razmjerno kraće trajale. Uz to treba uzeti u obzir i zaključke o mehanizmu pleistocenske glacijacije na sjevernoj hemisferu (v. opasku 49).

činje se odražavati i na temperaturi morske vode. U stanovitom momentu kad se pol nalazi već duboko u basenu, npr. u tački P, došlo je do orogeneze (O.) u rubnoj zoni jednog od kontinenata i do epirogenih pokreta u nekim dijelovima obaju kontinenata. Na novonastalim planinama brzo se stvaraju planinski ledenjaci, koji se, zbog obilja padalina, uskoro spajaju u pijedmontaske ledenjake. Tu proces zastaje. Oceanske struje iz niskih geografskih širina donose goleme količine tople vode koja sprečava znatniji pad temperature. Klima je previše maritimna da bi se pijedmontski ledenjaci dalje razvijali, a orogeneza je previše kompleksan proces da bi nastankom planinskog lanca. O. bilo sve svršeno. Čitavo po-



Sl. 14. Mehanizam postanka glacijacije celularnog tipa. P, pol; P. p., podmorski prag; O., mladi orogeni sistem

Fig. 14. The distribution of land and sea immediately before the expansion of the ice sheets (cellular type of glaciation). P., The Pole; P. p. submarine sill; O., young orogenic system

druže je tektonski nemirno, pa isti procesi mogu zahvatiti i morsko dno. Nije isključeno da će se kao jedna od posljedica orogeneze i epirogeneze izdići morsko dno u područje između obaju kontinenata (podmorski prag P. p.). Nije čak ni potrebno izdizanje nad morsku razinu; dovoljno je da se podmorski prag dignu na 200—300 m dubine. (Tome treba dodati da su sve orogeneze i epirogeneze bile praćene morskim regresijama velikih dimenzija.) Dogodilo se ono što je presudno važno za nastup celularne glacijacije: došlo je do termičke izolacije sredozemnog mora; a do celularne glacijacije može doći samo onda ako se prekine veza centralnog morskog basena sa svjetskim morem u nižim geografskim širinama.⁶¹

⁶¹ C. E. P. Brooks, op. cit. str. 81, zamišljao je početak glacijacije na sjevernoj hemisferi u obliku zaleđivanja mora u blizini pola; prelaskom kritičke granice taj embrionalni morski led može pokrenuti glacijaciju cijele hemisfere. Možda bismo bili bliži istini ako bismo pretpostavili da je svaka glacijacija započela eks-

Termička izolacija je »conditio sine qua non«. To je važno zato što zaleđena morska voda centralnog mora ima ista fizička svojstva kao i zaleđeno kopno pa će zaleđeno more, koje odvaja ledene celule, u takvoj situaciji zajedno s njima činiti golemu plohu prekrivenu ledom, u klimatskom smislu golem ledeni pokrov.^{62, 63} Individualan razvoj pojedinih celula je moguć samo u granicama koje određuje glacijacija cijele hemisfere. Prema tome, sve će celule pulsirati u granicama određenim tima dvama faktorima; apsolutno podudaranje pulsacija nije moguća, kao što nije moguć ni kaotičan razvoj. Može se govoriti o izvjesnom harmoničnom razvoju, odnosno o sinhronosti u geološkom smislu riječi.

Termička izolacija je impuls za razvoj ledenih pokrova na oba kontinenta, a teći će po već opisanoj shemi. Ipak postoji jedna bitna razlika. Ova glacijacija, već u samom početku ima kontinentske dimenzije pa, u poređenju s glacijacijom antarktičkog tipa, nastupa vanredno brzo. Glacijalna atmosferska cirkulacija objedinjuje sav prostor u jedinstven cirkulacijski sistem. Pad temperature je nagao, pa obalno područje sredozemnog mora već na samom početku nije povoljno za razvoj ledenih pokrova, a zaleđivanjem sredozemnog mora padaline prestanu dolaziti iz tog prostora. Njih odsad donose samo depresije iz nižih geografskih širina. Budući da one sve teže prodiru u unutrašnjost kontinenta, količina padalina se pogresivno smanjuje. Ledeni pokrovi rastu prema izvoru padalina, pa će njihov oblik u presjeku biti najsličniji balističkoj krivulji. Unutrašnji dijelovi ledenih pokrova, koji su okrenuti prema sredozemnom moru, nalaze se u zoni vrlo niskih temperatura i minimalnih padalina. Led jedva da teče; u maksimumu površinskog razvoja ledenog pokrova on vjerojatno stagnira. Ledeni pokrovi uskoro postignu maksimalnu visinu, ali su uvjeti za ekspanziju i dalje povoljni, pa se najviša tačka pomiče prema ekvatoru. Ledeni pokrov ne širi se kontinuirano; maksimalna faza se postiže poslije nekoliko naleta i povlačenja. Poslije maksimuma, već upoznatim procesima, ledenog pokrova nestaje, a dijelovi ledenog pokrova uz obalu sredozemnog mora potkraj glacijacije prolazno postaju aktivni.

Snježna granica se brzo spuštala, pa je već u samom početku došlo do totalne depresije kriosfere u čitavom unutrašnjem dijelu. Snježna granica je realna, jer se ledeni pokrovi nalaze u zoni daleko prema ekvatoru, pa su temperature i padaline na fronti ledenog pokrova smanjene u »normalnim« granicama; važna je i činjenica da ledeni pokrov nestaje na kopnu a ne na moru.

panzijom planinskih ledenjaka na Grenlandu, Skandinaviji i Sjevernoj Americi, ali samo u uvjetima termičke izolacije Arktičkog oceana. To bi bio impuls za razvoj ledenih pokrova. Naime, teško se može fizički objasniti početak zaleđivanja na otvorenom moru bez djelovanja i nekih drugih faktora.

⁶² H. W. Ahlmann et al., Glaciers and climate, Geografiska Annaler 31, 1949, str. 21: Zrak je iznad morskog leda velikih dimenzija za 20–30° C hladniji od zraka iznad nezaleđene morske površine na istoj geografskoj širini i duljini.

⁶³ H. Sverdrup, M. Johnson i R. Fleming, The Oceans. Their Physics, Chemistry, and General Biology, New York 1954, str. 113: Morska površina reflektira malen dio upadne svjetlosti; najveći se dio apsorбира. Morski led, međutim, reflektira 50, ili čak i više, posto Sunčeva zračenja; ako je prekriven snijegom, postotak reflektirane svjetlosti raste na 65%; ako je snijeg svjež i suh, onda 80%. Zato je neposredna posljedica zaleđivanja dalji opći pad temperature.

Karakteristično je da celularna glacijacija ima goleme gimenzije; to je uzrok njene brze propasti; a nestat će mnogo brže nego što je nastala i neusporedivo brže nego glacijacija antarktičkog tipa optimalnih dimenzija. Samo takav režim može objasniti »slučaj« da, npr., neki otok u unutrašnjosti sredozemnog mora, ili čak i veliki dijelovi obale istog mora, mogu »preživjeti« glacijaciju a da uopće ne budu zaleđeni. Vrijeme povoljno za razvoj leda u početku je bilo prekratko, a na kraju su uvjeti bili krajnje nepovoljni.⁶⁴ Ako sredozemno more bude i dalje izolirano, dogodit će se da će njegova zaleđena površina i dalje biti stalan izvor hladnih i suhih masa isto kao i hladne morske vode, koja će i dalje održavati nisku temperaturu svjetskog mora. Ledeni pokrovi će, zbog premalene količine padalina, nestati a cijela hemisfera sa zaleđenih morem u centru će i dalje ostati hladna. Budući da je podmorski prag u vrlo aktivnoj tektonskoj zoni, njegova relativna dubina će se sigurno mijenjati. On će se dizati i spuštati; tome treba dodati i glacio-eustatičke i eustatičke fluktuacije morske razine. Ako se dogodi da u periodu deglacijacije (ili čak i mnogo prije) morski prag, potone, prodorom relativno tople vode nastupit će uvjeti nepovoljni za održanje morskog leda; jedna od posljedica nestajanja morskog leda bit će povlačenje depresija prema polu; a one donose goleme količine topline, pa one još više ubrzaju započeti proces otopljanja.⁶⁵ Tako će nestati glavni uzrok hladnoće i klima će nestankom leda *poslije izvjesnog vremena* postati slična klimi prije glacijacije. Ako morski prag potone uskoro poslije početka glacijacije (tj. kratko vrijeme se izdigao pokrenuo je glacijaciju i odmah potonuo), to neće utjecati na započetu ekspanziju ledenih pokrova; glacijacija u naletu je previše autonoman proces da bi to moglo utjecati na njen razvoj. Izdizanje podmorskog praga je neposredni povod za nastup glacijacije, ali ne može izmijeniti smjer procesa kad je on već u toku. Glacijacija mora jako oslabiti da bi se osjetio utjecaj prodora tople morske vode. *Bitan je faktor za celularnu glacijaciju zaleđenost ili nezaleđenog sredozemnog mora.* Nestankom morskog leda klima će toliko otopliti da će na kraju nestati i ledeni pokrov u području mladih planina (O.), koji je pulsiranjem uzrokovao promjenu zale-

⁶⁴ Ekspanzija ledenih pokrova na sjevernoj hemisferi bila je tako nagla da su centralni dijelovi Arktičkog basena smjesta bili »odrezani« od izvora vlage, a pri kraju glacijacije (ili glacijala) klima je bila vanredno suha, pa se ni u jednom ni u drugom slučaju nije mogao razviti i održati led. Pokazalo se da cijela sjeverna Aljaska (R. E. Flint, op. cit., str. 307) i dijelovi Kanadskog arktičkog arhipelaga (T. H. Manning, Narrative of a Second defence research board expedition to Banks Islands, with notes on the country and its history, Arctic 9, 1956, 1—2, str. 61), otok Vrangal (V. P. Gričuk i R. J. Fedorova, K voprosu o karakteristike prilednikovoj rastitelnosti četvrtičnogo perioda na severe azijskogo materika, Izv. AN SSSR serija geograf. 1956, 2, str. 67), golemi prostori Sibira (E. V. Vul'f, Istoričeskaja geografija rastenij. Istorija flor zemnogo šara, Moskva-Leningrad 1944), sjeverni Grenland, golemi šelf Čukotskoga i Beaufortova mora (A. J. Car-sola, Extent of glaciation on the continental shelf in the Beaufort Sea, Amer. J. Sci. 252, 1954, 6, str. 366) u toku cijelog posljednjeg glacijala (a vrlo vjerojatno i u svim drugim glacijalima) nisu nikada bili prekriveni ledom.

⁶⁵ Izvjestan porast padalina, uz postojanje ostalih uvjeta, može uzrokovati povremeno širenje preostalih ledenih pokrova u toku deglacijacije; zato deglacijacija nije jednostavno proces nestajanja ledenih pokrova, nego se oni i u fazi općeg povlačenja povremeno šire.

denosti sredozemnog mora i time je bitno utjecao na klimatske promjene cijele hemisfere kad su drugi ledeni pokrovi već nestali. Ako se neposredno poslije ovog naleta opet prekine veza s vanjskim morem, može ponovno nastati jako zahlađenje (jer se zaledi sredozemno more), ali ne i glacijacija. Glacijacija nastupa samo u slučaju ako se opće prilike povrate na stanje slično u preglacijalu; potrebno je neko vrijeme da uvjeti postanu povoljni za nastup nove ekspanzije leda.

Pulsiranje ledenih pokrova jest posljedica njihovih fizičkih svojstava, pa će svaki ledeni pokrov »disati« u skladu sa svojom vlastitom visinom i radijusom. Budući da je ledeni pokrov vanredno senzitivn (u relacijama prema svojim dimenzijama) prema vanjskim promjenama, napose prema promjenama temperature (ali to, prije svega, vrijedi za ledene pokrove koji prodiru daleko prema ekvatoru), sve ledene celule koje pripadaju jednoj »zajednici« ledenih pokrova ne mogu evoluirati posve slobodno, jer svaka značajnija promjena površine jedne celule automatski uzrokuje klimatske promjene na koje će susjedne celule brzo reagirati.⁶⁶

Opći zaključci o mehanizmu glacijacija. Prirodna sredina u kojoj se razvijala glacijacija uvijek je bila nešto drukčija od prethodnog ili sličnog slučaja, jer su mogućnosti kombinacije faktora beskonačno velike; svaka glacijacija je specijalan slučaj.

Reljef je najvarijabilniji faktor; ako je dovoljno razvijen, on može u znatnoj mjeri utjecati na razvoj ledenog pokrova. Ipak se čini da je reljef važan samo u početnim i završnim fazama glacijacije. U maksimumu volumenskog razvoja ledenog pokrova reljef postaje drugorazredan fak-

⁶⁶ U skladu s opisanim mehanizmom pulsiranja može se pretpostaviti da će ledene celule pulsirati djelomično i u skladu sa svojom veličinom. Te razlike moći će se primijetiti samo onda kad celularna glacijacija ima optimalne dimenzije, tj. kad polagano pulsira, a u drugim slučajevima samo onda kad je tehnika datiranja visoko razvijena. Međutim, ako celularna glacijacija ima goleme dimenzije, tj. ako ona kao cjelina traje vrlo kratko, onda će i njene pulsacije, kao i deglacijacija, biti vanredno kratkotrajni procesi koji se teško mogu utvrditi. Tako bi se možda mogla protumačiti izvjesna neslaganja, ili asinhronost deglacijacije sjeverne hemisfere u posljednjem glacijalu (R. F. Flint, op. cit., str. 211). Na osnovu ovakvog mehanizma može se pretpostaviti da ekspanzija pleistocenskih ledenih pokrova na sjevernoj hemisferi nije bila potpuno sinhrona. U oba slučaja razlike nisu bile jako velike, jer su ledeni pokrovi prodirali daleko na jug, u područja s temperaturama bliskim kritičnima — tj. i maleni porast temperature mogao je utjecati na evoluciju ledenog pokrova — pa su i najmanje klimatske promjene, uzrokovane radijalnim promjenama ledenog pokrova, mogle utjecati na pulsiranje ledenog pokrova. Ledeni pokrov će pulsirati isključivo u skladu sa svojim dimenzijama jedino u slučajevima kad bude imao optimalne dimenzije — takvi su ledeni pokrovi relativno maleni — i kad je daleko u polarnom području (npr. Antarktika), jer je temperatura u tom slučaju preniska da bi se neznatno otoplivanje moglo odraziti u evoluciji ledenog pokrova. U konkretnom slučaju to bi značilo da je za evoluciju grenlandskog ledenog pokrova vrlo važno da li temperatura nešto raste ili pada; nasuprot, ni znatniji porast ili pad temperature ne bi mogao promijeniti smjer evolucije današnjeg antarktičkog ledenog pokrova. Uvjeti su daleko od kritične granice, pa antarktički ledeni pokrov pulsira isključivo pod utjecajem odnosa glaciobaričke visine i glaciobaričkog radijusa (odnosa padalina), a manje pod utjecajem termičkog režima.

tor.^{67,68} Morfologija ledenog pokriva je posljedica prije svega temperature i smjera vjetrova, tj. količine padalina, jer uglavnom ova dva faktora određuju visinu i radijus ledenog pokriva. To se najbolje vidi na Antarktici gdje, nešto dalje od obale, nije više moguće po obliku površine ledenog pokriva rekonstruirati reljef podloge. Kad debljina leda prijeđe određenu granicu, utjecaj reljefa se poništava. To isto je opaženo i na Grenlandu.

I za iščezle kvartarne ledene pokrove vrijedi isto pravilo. Sjevernoevropski ledeni pokrov je čini se, bio mnogo kompleksniji. Utvrđena činjenica da se njegova ledena »razvodnica« pomicala iz Skandinavskog gorja u zonu Baltičkog mora (Botnički zaljev), istovremeno s njegovih porastom, očito pokazuje da i njegov oblik nije bio funkcija reljefa. Zato se može tvrditi da bi oblik visokorazvijenog sjevernoevropskog ledenog pokriva bio onakav kakav je bio i da nije bilo Skandinavskog gorja. I za sjevernoamerički ledeni pokrov je ustanovljeno da je imao balistički profil. Sibirski ledeni pokrov nikada nije bio dovoljno debeo da bi se oslobodio utjecaja reljefa.

Prostorni odnos između ledenih pokriva i pola isto tako ne treba doslovno shvatiti. Kad se kaže da je blizina pola jedan od bitnih faktora koji utječu na razvoj ledenih pokriva, onda se misli da je dovoljno da se ledeni pokrov nalazi i 2 000 km od pola. Pod pojmom »pol« ili »blizina pola« ne misli se na tačku (pol) nego na vrlo prostrano područje. Negirati značenje blizine pola za kvartarnu glacijaciju sjeverne hemisfere samo zato što su svi ledeni pokrovi bili daleko na jugu, nije opravdano kad se zna da u strogo polarnoj zoni nema kopna na kome bi se razvio ledeni pokrov. Kvartarna glacijacija sjeverne hemisfere bila bi u suštini onakva kakva bi bila i u slučaju da se Sjeverni pol nalazio u Aljaski, na otoku Vrangeli ili Jan Mayen, ili bilo gdje na dalekom sjeveru. Isto tako glacijacija Antarktike ne bi bila drukčija nego što je, da se Južni pol nalazio bilo gdje na obali kontinenta. Antarktički ledeni pokrov razvio se oko pola samo zato što je tako smješten antarktički kontinent. Da kontinent nije na samom polu nego, recimo, nekih 40° dalje na sjever, ledeni bi pokrov vjerojatno bio razvijen kao i danas.⁶⁹

Glacijacija je proces planetarnih dimenzija, pa su se sve promjene osjetile na cijeloj Zemlji.⁷⁰ Depresija kriosfere kombinirana s dovoljnom visinom planina mogla je uzrokovati planinsku glacijaciju u nižim geografskim širinama. Budući da ledeni pokrov (pokrovi) određuje opći ritam glacijacije, planinske će glacijacije biti sinhronne s kontinentskim glacijacijama, iako će se i u ovom slučaju očitovati izvjesna individualnost u razvoju, individualnost nižeg reda proporcionalno dimenzijama planinske glacijacije.

⁶⁷ M. Demorest, op. cit., str. 333; Mora se prihvatiti mišljenje da je ledeni pokrov u maksimumu glacijacije dovoljno debeo da može poništiti utjecaj reljefa podloge.

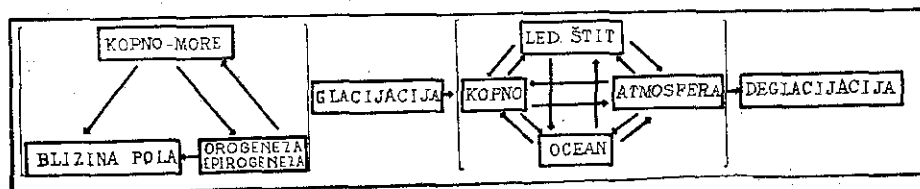
⁶⁸ C. E. P. Brooks, op. cit., str. 155; Kad ledeni pokrov postigne izvjesnu veličinu, postaje neovisan o reljefu podloge u centru, a njegova ekspanzija je rezultat, prije svega, količine snijega koji padne na nj.

⁶⁹ R. F. Flint, op. cit., str. 49.

⁷⁰ C. E. P. Brooks, op. cit., str. 271; Ledeni pokrov velikih dimenzija bitno će utjecati na temperaturu mora, kao i na atmosfersku cirkulaciju; tako može kontrolirati glacijaciju ostalih dijelova svijeta.

Iako je glacijacija kompleksan prirodni proces u koji svaki ledeni pokrov unosi manje-više specifične osobine, ipak se glacijacija kao cjelina može postaviti u određene okvire, može se odrediti opća zakonomjernost koja vrijedi za svaku glacijaciju, bez obzira na njen tip i dimenziju.

Čitav proces glacijacije mogao bi se ovako rezimirati (sl. 15). Optimalnom kombinacijom razmještaja kopna i mora, blizine pola i orogeneze i epirogeneze — strjelice pokazuju uzajaman odnos, odnosno utjecaj — nastaje glacijacija. Ledeni pokrov (pokrovi) u početku glacijacije je pasivna posljedica tog uzročno-posljedičnog kompleksa. *Postizanjem velikih dimenzija ledeni pokrov postaje aktivan faktor koji bitno mijenja cijelu*



Sl. 15. Shema postanka glacijacije, pulsiranja i nestanka ledenih pokrova (objašnjenje u tekstu)

Fig. 15. Schematic representation of the interrelation of glaciogenic factors, and the factors which cause the pulsations of ice sheets.

prirodu oko sebe: on time postaje geografski faktor. Od tog momenta prva tri glasična geografska faktora gube važnost za daljnju evoluciju glacijacije. U toj fazi glacijacija je posljedica djelovanja četiriju kompleksa faktora: broja i dimenzije ledenog pokrova, kopna (važnost vegetacijskog pokrova i visine i smjera pružanja reljefa), oceana (struje i zaljeđenost mora) i atmosferske cirkulacije. U skladu sa zakonom akcije i reakcije dolazi do beskrajno kompliciranog uzajamnog djelovanja svih četiriju kompleksa faktora. Npr. ledeni pokrov djeluje na pad temperature oceana, a on smanjenjem isparavanja počne djelovati na razvoj ledenog pokrova; ledeni pokrov određuje atmosfersku cirkulaciju, ali ona isto tako bitno djeluje na razvoj tog istog ledenog pokrova i na morsku cirkulaciju itd. Promjena jednog faktora uzrokuje promjene u nizu ostalih procesa. To je zapravo lančana reakcija gdje je obično teško ustanoviti primarni uzrok. Relativna važnost pojedinih faktora i čitavih kompleksa faktora mijenja se u toku evolucije glacijacije. Tako, npr., površinskim razvojem ledeni pokrov postaje sve važniji faktor. Ali, paralelno s njegovim razvojem, sve je važnija uloga izmijenjene glacijalne atmosferske cirkulacije, koja u određenom trenutku nadvlada i važnost samog — ledenog pokrova. Glacijalna atmosferska cirkulacija prijeđe granicu optimuma, ona počinje negativno utjecati na razvoj ledenog pokrova. *Deglacijacija je zapravo posljedica prejakog razvoja glacijalne atmosferske cirkulacije.* Pojačanje atmosferske cirkulacije bitno je važno za razvoj ledenog pokrova; likvidira je prejaka atmosferska cirkulacija. Izvjesno ohlađenje svjetskog mora bio je uvjet za nastup glacijacije; preniska temperatura mora oko ledenog pokrova jedan je od uzroka njegove propasti. Glacija-

cija ne određuje samo mehanizam svog pulsiranja; ona sama određuje i smjer svog razvoja. *Glacijacija nestaje djelovanjem faktora koje je sama stvorila; ona je autonoman proces čiji smjer razvoja ovisi o uzajamnom odnosu faktora koji se »rađaju« zajedno s njom; nestanak glacijacije bila bi zapravo anihilacija.*

Deglacijom nestaje jedan od četiriju faktora, nestaje ledeni pokrov, ali posljedice njegova postojanja još će se dugo osjećati. Deglacijacija nije jednostavno vraćanje na stanje prije glacijacije. Tragovi procesa tako kolosalnih dimenzija kao što su glacijacije ne mogu smjesta nestati zajedno s nestankom leda. Mora proći izvjesno vrijeme da se Zemlja »oporavi«, da se opet »ugrije«. To vrijeme »oporavljanja« je u periodu općeg tektonskog nemira (Nova su istraživanja pokazala da su tektonski procesi neuporedivo intenzivniji, tj. kratkotrajniji nego što se dosad moglo pomisliti⁷¹) dovoljno da se naruši vanredno delikatna »ravnoteža«, idealna kombinacija temperature i padalina. Glacijacija nestaje i u »normalnim« okolnostima se neće ponoviti; ona je ireverzibilan proces.

POS LJEDICE GLACIJACIJE

Klimatski utjecaji glacijacije. Kad ledeni pokrov prijeđe kritičnu granicu, njegove dimenzije postaju tolike da se promjene koje on unosi u bilancu zračenja počinju odražavati u prirodnoj sredini u kojoj se širi. Opći, ali spori pad temperature u »pripreмноj« fazi samo je početak. On će zajedno s drugim faktorima dovesti do glacijacije koja će ubrzati davno započeti pad temperature. Genetski postoje dva procesa snižavanja temperature: prije i poslije početka glacijacije. Pad temperature do ekspanzije ledenih pokrova posljedica je približavanja polova prostorima u kojima će doći do glacijacije, a naglo zahlađenje poslije pojave ledenih pokrova posljedica je njihova postojanja. Ekspanzija ledenih pokrova u fizičkom smislu osniva se na činjenici da snježni kristali i led imaju veliku reflektornu moć. Tako se promjenom albeda bitno poremeti ravnoteža zračenja, jer snažna radijacija topline jako snizi temperaturu; iznad ledenog pokrova stvara se sloj teškog, hladnog zraka. Budući da atmosferska cirkulacija ovisi o termičkom gradijentu između visokih i niskih geografskih širina, te Zemljine površine i viših dijelova troposfere, odnosno o baričkom gradijentu, navedene promjene moraju pojačati atmosfersku cirkulaciju. To su procesi koji u početku omogućuju ekspanziju ledenih pokrova. Isto je tako važno da taj hladni zrak, zbog povećane gustoće, sve češće uzrokuje anticiklonalna stanja nad ledenim pokrovom. Kad ledeni pokrov — ili uopće zaleđena površina — prijeđe određene dimenzije, glacijalna anticiklona postaje vanredno važan klimatološki faktor. Ona počinje bitno mijenjati atmosfersku cirkulaciju nad cijelim ledenim pokrovom i u pojasu pod njegovim neposrednim utjecajem. Ona počinje utjecati na lokaciju polarne fronte. Glacijalna anticiklona je barijera koju više ne mogu savladati depresije koje dolaze iz nižih geografskih širina. One sve teže i rjeđe prodiru u unutrašnjost ledenog pokrova. Glacijacija

⁷¹ R. F. Flint, op. cit., str. 501—2.

dovodi do maksimuma davno prije započeto diferenciranje klimatskih zona; još više: ona mijenja i njihov prostorni razmještaj. Glacijalna anticiklona potiskuje ciklonalne putanje daleko prema ekvatoru, pa je sužavanje pojasa subtropskog povišenog tlaka vrlo važno za održanje glacijacije. Znatno povišenje naoblake u tom pojasu, kao i stalni prodori hladnih zračnih masa, mnogo pridonose termičkoj izolaciji ledenog pokrova.⁷² Glacijalna anticiklona, kvazistacionarna barička tvorevina jest posljedica egzistencije ledenog pokrova; ona se u punoj veličini javlja tek u podmakloj fazi njegove evolucije; ona zapravo s njim i nestaje (zapravo nešto ranije). Na temelju svega rečenog može se dati klimatološka definicija glacijacije: *glacijacija je autonoman, termički izoliran energetsko-cirkulacijski kružni sistem s kvazistacionarnom anticiklonom u centru i nizom putujućih depresija na periferiji.*

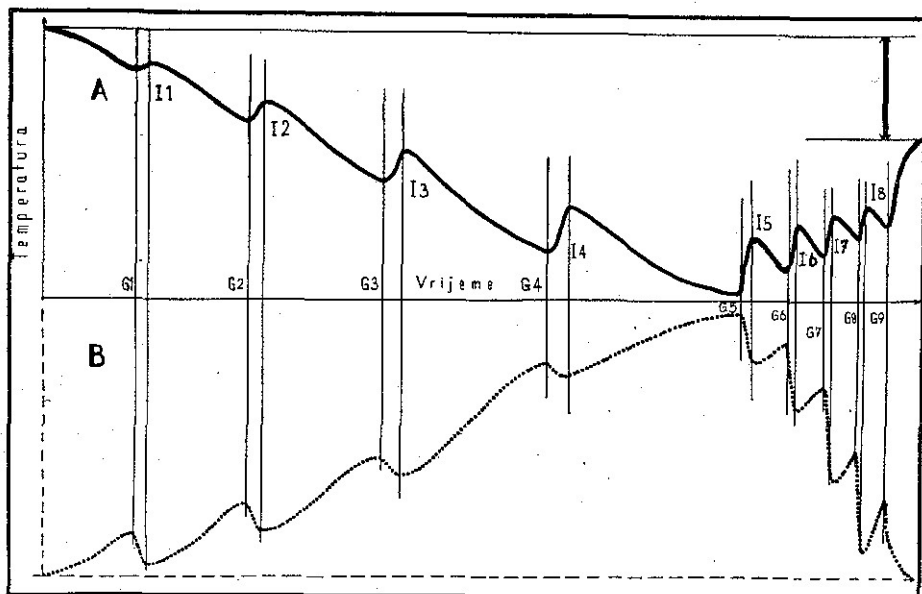
Glacijacija i promjene temperature. Nastupom glacijacije, dotada postepeni pad temperature ubrzano se nastavlja dalje. Pulsiranje ledenih pokrova i promjene temperature, zbog djelovanja zakona inercije, ne mogu teći apsolutno sinhrono, pa će postojati izvjesna razlika u vremenu (termička tromost svjetskog oceana). Ona je neznatna i može se zanemariti kod općeg prikaza.

Temperatura zraka u toku glacijacije (sl. 16) jest posljedica površinskog razvoja ledenog pokrova.⁷³ Nastupom glacijacije temperatura zraka ne padne na najnižu vrijednost u prvom glacijalu G 1, jer se svjetski ocean nije mogao tako brzo ohladiti i, što je još važnije, ledeni pokrov je još daleko od maksimalnog površinskog razvoja; a o tome zapravo ovisi pad temperature. Za temperaturne promjene bitno je i trajanje glacijala i interglacijala, odnosno cijele glacijacije. U prvom glacijalu pad temperature će zastati na određenoj veličini i brzo će porasti u narednom, prvom interglacijalu I 1. Ali, interglacijal ne znači isto što i kompletna deglacijacija. Ledeni pokrov se smanji samo za stanovitu veličinu. On i dalje u suštini ostaje ledeni pokrov, stalan izvor hladnoće (čak i u maksimumu interglacijala; nešto slično kao Antarktika danas), iako u znatno manjoj mjeri nego u prvom glacijalu G 1. Prema tome, temperatura u prvom interglacijalu je znatno niža nego neposredno pred ekspanziju ledenog pokrova. Nastupom slijedećeg, drugog glacijala G 2, temperatura opet počne padati, jer se povećala površina ledenog pokrova. Budući da ledeni pokrov postoji i hladi cijelu hemisferu odnosno Zemlju, već čitav jedan glacijal i interglacijal (kumulativni učinak), temperatura u drugom glacijalu G 2 bit će niža nego u prvom glacijalu G 1. To isto ponovit će se nekoliko puta u narednim glacijalima i svaki put će temperatura biti niža nego u prethodnom glacijalu, odnosno u svakom interglacijalu će temperatura biti niža nego u prethodnom interglacijalu, jer je i površina ledenog pokrova neprekidno rasla. Tako će to ići sve do maksimalnog površinskog razvoja ledenog pokrova. Najniža temperatura bit će u momentu maksimalnog površinskog razvoja ledenog pokrova. Od tog momenta po-

⁷² C. E. P. Brooks, *op. cit.* str. 124.

⁷³ Ovdje je prikazana evolucija jedne kompletne glacijacije kao što je, npr., kvartarna glacijacija Antarktike, ili jedan od glacijala na sjevernoj hemisferi, koje autor shvaća kao kompletne glacijacije.

činje ritmičko povlačenje ledenog pokriva, a smanjenjem zaleđene površine započet će i postepeno otoplavanje klime. Proces nije kontinuiran, nego se izmjenjuju povremeni porasti temperature s povremenim, sve kraćim zahlađenjima. Bitno je da u trenutku nestanka ledenog pokriva temperatura ne će biti na razini kao u momentu nastupa glacijacija, nego će biti znatno niža. Zato deglacijacija nije povratak na stanje neposredno prije glacijacije; to je, uz ostale faktore, jedan od uzroka da se glacijacija ne može ponoviti izvjesno vrijeme poslije nestanka ledenog pokriva. Do toga može doći tek nešto kasnije kad se opće prilike približe stanju neposredno prije nastupa glacijacije. Opće bi pravilo bilo: *glacijaciju u cjelini karakterizira opći postepeni pad temperature.*



Sl. 16. A, hipotetički tok temperature u toku glacijacije; na opći tok temperature superpovrnirane su promjene u glacijalima i interglacijalima. B, površinski razvoj hipotetičkog ledenog pokriva

Fig. 16. A, Diagram showing the curve of temperature during the glaciation with superimposed pulsations during glacials and interglacials; B, surface extent of the ice sheet

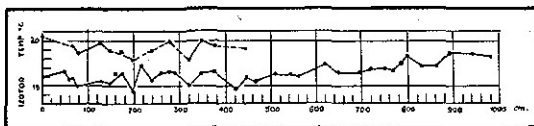
Tok temperature u svakom pojedinom glacijalu i interglacijalu bit će sličan, samo će dimenzije biti različite, jer hod temperature odgovara promjeni intenziteta glacijacije; u početku i na kraju glacijala radikalne promjene ledenog pokriva znatno su manje i kratkotrajnije nego u maksimumu, pa će tako biti i s duljinom stadijala i interstadijala. Iako su temperaturne promjene u stadijalu i interstadijalu neposredno prije i poslije maksimuma glacijala relativno malene, bitno je da su te promjene bile relativno dugotrajne; zato je njihov utjecaj mnogo veći nego što bi to

proizlazilo iz samog stupnja, odnosno veličine tih promjena. Te su promjene u stadijalima i interstadijalima na početku i pri kraju glacijala osjetljivije, jer se površine leda prilično smanjila; one kompenziraju utjecaj kratkoće vremena.

Temperature u toku kvartarne glacijacije nisu konstantno padale, nego su oscilirale između minimalnih vrijednosti u maksimumima glacijala i maksimalnih vrijednosti u maksimumima interglacijala. Temperaturne promjene, koje su uvjetovane strukturnim promjenama ledenih pokrova, bile su univerzalne, jer su pokazivale istu tendenciju rasta i pada u svim dijelovima svijeta, bez izuzetka. Amplitude između dva ekstrema — glacijala i interglacijala — nisu bile jednake u svim dijelovima svijeta i dosad još nisu tačno određene. Procjene su prilično različite, ali se čini da su najrealnije slijedeće vrijednosti: 4°C niža srednja godišnja temperatura u glacijalima u ekvatorskom pojasu⁷⁴ i 6° niža temperatura površinske vode Atlantika, Pacifika i Karipskog mora u niskim geografskim širinama⁷⁵. Ako je Antarktika danas za 15° hladnija od Arktika, onda bi to zacijelo bilo prilično blizu reprezentativnoj vrijednosti za polarne krajeve. Amplituda pravilno raste od ekvatora prema polovima.

Bitno različita struktura glacijacija obiju hemisfera uzrokovala je vrlo kompliciran, gotovo nerazjašnjen tok temperatura u kvartaru. Na temelju naših pretpostavki pokušat ćemo protumačiti spomenute promjene na slijedeći način: pretpostavili smo da je trajanje glacijacije obrnuto proporcionalno njenom površinskom razvoju. Budući da antarktički ledeni pokrov ima dimenzije približne optimalnima, a — suprotno tome — ledeni pokrovi na sjevernoj hemisferi bili su ekscesivno razvijeni, trajanje glacijacije, odnosno glacijala bilo je bitno različito. Kao ledeni pokrov ne mnogo različit od optimalnih dimenzija, antarktički ledeni pokrov pulsirao je ravnomjerno, tj. razlike u površini ledenog pokrova u maksimumima glacijala i interglacijala bile su malene pa su, prema tome, i temperature, odnosno amplitude između glacijala i interglacijala, bile neznatne. Sasvim je drukčije bilo na sjevernoj hemisferi. Goleme razlike u površini leda u maksimumima glacijala i maksimumima interglacijala (koje ovdje shvatamo kao samostalne glacijacije) uzrokovale su i odgovarajuće promjene temperature, tj. vrlo velike amplitude. Samo izuzetnom kombinacijom glaciogenih faktora, glacijacije (po sadašnjoj terminologiji glacijali Würm, Riss itd.) na sjevernoj hemisferi su se nekoliko puta ponovile istovremeno s nastupom glacijala na Antarktici. Zbog ovakve različite strukture kvartarne glacijacije, promjene temperature na obje hemisfere treba promatrati odvojeno.

Antarktički ledeni pokrov je, dakle, pulsirao pravilno, tj. amplitude su bile relativno malene. Zato su na cijeloj južnoj hemisferi klimatske promjene u kvartaru bile manje izrazite nego na sjevernoj hemisferi. Ovaj zaključak potvrđuje krivulja temperatura (sl. 17), koje su dobivene izotopskom analizom sedimenata iz



Sl. 17. Izotopska temperatura dobivena analizom sedimenata iz dubomorskog profila 58 iz Tihog oceana a, *Pulleniatina obliquiloculata*; b, *Globorotalia tumida* (C. Emiliani, 1955)

Fig. 17. Palaeotemperature curves of a deep-sea core 58, Pacific: *Pulleniatina obliquiloculata* (a) and *Globorotalia tumida* (b)

⁷⁴ H. Flohn, Studien über die atmosphärische Zirkulation in der letzten Eiszeit, *Erdkunde* 7, 1953, 4, str. 266.

⁷⁵ C. Emiliani, Pleistocene temperatures, *J. Geol.* 63, 1955, str. 538.

dubokomorskog profila 58 iz Tihog oceana⁷⁶. Prije svega, očit je »smiren« tok kri-
vulje kao posljedica ravnomjernog pulsiranja antarktičkog ledenog pokrova. Iz
grafikona se vrlo jasno vidi da, usprkos povremenom porastu temperature u inter-
glacijalima, koji mogu u nekim slučajevima biti i prilično veliki, od gornjeg pli-
ocena⁷⁷ pa sve do danas na južnoj hemisferi postoji izrazita opća tendencija pada
temperature; grafikon temperature dubokomorskog profila 58 pokazuje opći pad
temperature od dna do vrha.⁷⁸

Sasvim je drukčija situacija bila na sjevernoj hemisferi. Smanjenjem zaleđene
površine samo na ostatke grenlandskog ledenog pokrova, u maksimumima inter-
glacijala, temperatura se vraćala na razinu ne bitno različitu od stanja neposredno
pred nastup najstarijeg pleistocenskog glacijala. To bi posebno vrijedilo za tzv.
veliki interglacijal. Upravo zato na sjevernoj hemisferi se dosad nije mogla tačno
utvrditi određena tendencija toka temperature u kvartaru. Usprkos tome, postoje
izvjesne indikacije na osnovu kojih bi se moglo doći do zaključaka da je i za
kvartar sjeverne hemisfere karakterističan izvjestan opći pad temperature, tj. svaki
mlađi glacijal bio je hladniji od prethodnoga, isto kao što je i svaki mlađi inter-
glacijal bio nešto hladniji od prethodnoga. Izuzetak je možda veliki interglacijal,
koji je vjerovatno bio nešto topliji od prethodnoga zbog duljeg trajanja i smanjenja
zaleđene površine na minimum.⁷⁹⁻⁸³

Usprkos bitno različitoj strukturi glacijacija obiju hemisfera, usprkos poreme-
ćaju toka glacijacije na sjevernoj hemisferi za vrijeme velikog interglacijala, za
kvartarnu glacijaciju je bitno da temperatura — uz povremene prekide — pokazuje
izrazitu tendenciju postepenog pada.

Po iznijetim primjerima moglo bi se zaključiti da se hipotetički klimatogram
(sl. 16) ne slaže sa već poznatim i iznijetim rezultatima hoda temperatura u toku
kvartarne glacijacije. Taj bi se problem mogao riješiti nešto detaljnijim prikazom
mehanizma pulsiranja ledenog pokrova. Na sl. 16 prikazano je pulsiranje ledenog
pokrova optimalnih dimenzija; dimenzije, odnosno razmjestaj kopna i mora takav
je da svakom glacijalu i interglacijalu odgovara stanoviti radijus i određena povr-
šina ledenog pokrova. Hipotetički ledeni pokrov u ovakvim idealnim uvjetima
pulsirat će savršeno pravilno, bez ikakvih poremećaja. Međutim, pulsiranje antark-
tičkog ledenog pokrova nije moglo biti potpuno pravilno, jer je zbog kružnog oblika

⁷⁶ C. Emiliani, op. cit., str. 556.

⁷⁷ C. Emiliani postavlja granicu pliocena i pleistocena na 610 cm, a G. Arrhenius na 395 cm.

⁷⁸ C. Emiliani, op. cit., str. 562.

⁷⁹ C. Emiliani, Palaeotemperature analysis of the core 280 and Pleistocene correlations, J. Geol. 66, 1958, 3, str. 270: Većina dubokomorskih profila pokazuje da je minimum u fazi 2 (maksimum Würma ili, po autoru, Würm II) bio najhladnija faza pleistocena.

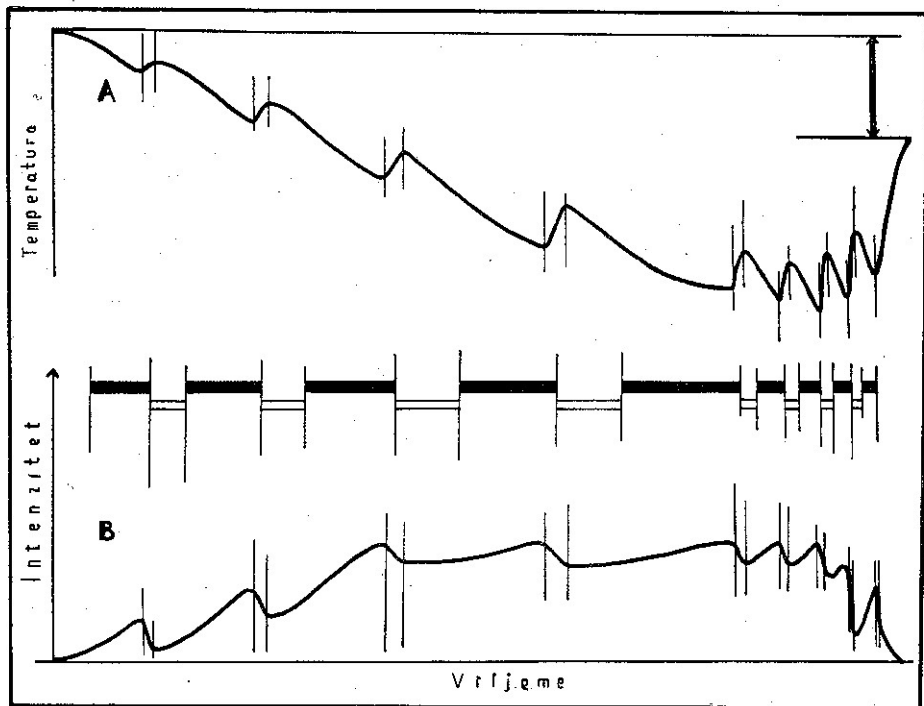
⁸⁰ F. Brandtner, Lösstratigraphie und paläolitische Kulturabfolge in Niederösterreich und in den angrenzenden Gebieten, Eiszeitalter u. Gegenwart 7, 1956, str. 128: Litologija i fauna pokazuje da je riski les bio nataložen u uvjetima maritimnije klime. On se izrazito razlikuje od virmskog lesa koji je, bez sumnje, nastao u kontinentalnijoj klimi... Posljednja faza Würma mora se smatrati kao krajnje hladna kontinentalna faza; ona je bila najhladnije razdoblje cijelog ledenog doba.

⁸¹ F. Prošek i V. Ložek, Stratigraphische Übersicht des tschechoslowakischen Quartärs, Eiszeitalter u. Gegenwart 8, 1957, str. 73: Fauna karakteristična za klimu tundre javlja se u srednjoj Evropi tek u hladnim fazama mlađeg pleistocena, za razliku od stepskih predstavnika u hladnijim fazama starijeg pleistocena. Slično tome, toplije faze starijeg pleistocena karakterizira vrlo topla mediteranska fauna. Str. 74: Jače zahlađenje započelo je tek u Rissu kad je bilo mnogo hladnije nego u prethodnim hladnim fazama, ali još nije bilo tako hladno kao u drugoj fazi Würma.

⁸² H. Müller-Beck, Paläolitische Kulturen und Pleistozäne Stratigraphie in Süddeutschland, Eiszeitalter u. Gegenwart 8, 1957, str. 116. Iako je tek fragmen-
taran, klimatogram na str. 137. potpuno odgovara pretpostavljenoj shemi o općem padu temperature u pleistocenu.

⁸³ Progresivno sve jače zahlađenje možda je najbolje dokazano u Karpatima (W. Szafer 1953 i 1954; cit. R. F. Flint, op. cit., str. 396).

i relativno malenih dimenzija Antarktičkog kontinenta došlo do posebnog načina pulsiranja ledenog pokriva. Postojanjem povoljnijih uvjeta za alimentaciju ledenog pokriva, ali zbog relativno malenih dimenzija, ledeni pokrov je u maksimumu znatnog broja glacijala imao jednaku površinu; zbog uskosti šelfa, antarktički ledeni pokrov od one faze kad je prvi put dostigao vanjsku granicu šelfa nije mogao — usprkos i eventualno većem volumenu leda — imati veću površinu u maksimalnoj fazi razvoja nego u nekoliko faza prije ili poslije nje. To bi značilo da je



Sl. 18. Hipotetički tok temperature (A) uzrokovan pulsacijom ledenog pokriva antarktičkog tipa (B) čije su dimenzije nešto manje od optimalnih. U nizu od nekoliko glacijala ledeni pokrov ima jednaku površinu, jer je ona određena veličinom kopna na kojem pulsira ledeni pokrov. Ovakav je mehanizam značajan za kvartarnu glacijaciju Antarktike

Fig. 18. Temperature curve (A) caused by the pulsations of an ice sheet of Antarctic type (B) which is somewhat smaller than the ice sheet with optimal dimensions. Due to the small dimension of the continent, the ice sheet has an equal area in some phases of its evolution. Such mechanism is characteristic of the Quaternary glaciation in the Antarctica

antarktički ledeni pokrov u nizu kvartarnih glacijala (a ne samo u maksimalnom glacijalu) bio jednako velik; u tom slučaju bitno važan element, koji je određivao mehanizam pulsiranja pokriva, bili su temperatura i količina padalina, koji su se mijenjali s određenom tendencijom, bez obzira na približno jednaku površinu ledenog pokriva. To isto vrijedi i za interglacijale. U svakom interglacijalu, u razvijenoj etapi evolucije ledenog pokriva, ledena fronta se povlačila do manje ili više iste granice kad su se uspostavljali približno podjednaki uvjeti za narednu ekspanziju. U ovakvom izuzetnom slučaju antarktički ledeni pokrov je pravilno (u skladu

s hipotetičkom shemom) pulsirao samo u početnim fazama svoje evolucije, a tako će pulsirati i u završenim fazama evolucije (u budućnosti). Ovakav mehanizam, kao jedna od varijanti polusiranja hipotetičkog ledenog pokrova (moguće su i druge varijante) prikazan je na sl. 18. Kad fronta ledenog pokrova prvi put dospije do morske obale, odnosno do granice šelfa, započinja faza specifičnog razvoja. Iako se površina ledenog pokrova (i zaledenog mora) u narednim glacijalima neće ništa povećati, zaledena površina samim faktom svoga postojanja i dalje hladi hemisferu; temperatura i dalje opada.⁸⁴ Ta tendencija razvoja nastaviti će se sve dotle dok se ne prijede granica (u ovom slučaju preniska temperatura) nepovoljna za daljnju ekspanziju ledenog pokrova. Kad se to postigne, ledeni pokrov u jednom od narednih glacijala više ne može dostići obalu; zaledena površina počinje se smanjivati i time dolazi do postepenog otopljanja, postepenog porasta temperature. Ostaci ledenog pokrova još postoje, kontinent se i dalje nalazi u visokim geografskim širinama, pa temperatura u trenutku potpunog nestanka ledenog pokrova neće biti na istoj razini kao u času nastupa glacijacije. Ona će biti znatno niža. Primijenjeno na Antarktiku, moglo bi se pretpostaviti da će naredni (ili nekoliko budućih) naleta leda, tj. glacijala, imati iste površinske dimenzije kao i u posljednjem pleistocenskom glacijalu, temperatura će i dalje postepeno padati, a tek će onda početi i površinsko smanjenje ledenog pokrova.

U skladu s pretpostavkom da je trajanje glacijacije obrnuto proporcionalno s njenim površinskim razvojem, glacijali na sjevernoj hemisferi shvaćeni su kao kompletne glacijacije koje su, zbog vrlo velikih dimenzija ledenih pokrova trajale vanredno kratko vrijeme, pa je i trajanje svih ostalih procesa bilo proporcionalno smanjeno. Tako se u toku svakog glacijala na sjevernoj hemisferi silno ubrzanim tempom ponavljao opisani mehanizam pada temperature.^{85,86} Svaki glacijal započeo je svježom, vlažnom, oceanskom klimom, koja je postepeno postajala sve kontinentalnija, a maksimum je bio postignut u trenutku najvećeg površinskog razvoja lednih pokrova (krajnje hladna i suha kontinentska klima). Budući da su ledeni pokrovi mogli slobodno ekspandirati, klimatogram Würma u srednoj Evropi⁸⁷ (sl. 19), kolikogod je znatnim dijelom shematičan (napose stariji dio), u osnovi se podudara s našim hipotetičkim tokom temperature (sl. 16) u toku jedne glacijacije.

Glacijacija i padaline. Pojačanje atmosferske cirkulacije u početku glacijacije uzrokuje izvjesno povećanje padalina, vjerojatno najmanje za 20%.^{88,89} Važnije od samog povećanja jest promjena u vrsti

⁸⁴ C. Emiliani, op. cit. (opaska 75), str. 538: Izotopskom analizom je utvrđeno da temperatura pridnene vode u ekvatorijalnom Pacifiku u interglacijalima nije bila viša od 0,8° C od temperature pridnene vode u glacijalima. Budući da pridnena voda dolazi iz antarktičkog prostora, iz toga bi se moglo zaključiti da se temperaturni uvjeti u kojima se ona stvarala nisu bili bitno različiti u glacijalima i interglacijalima.

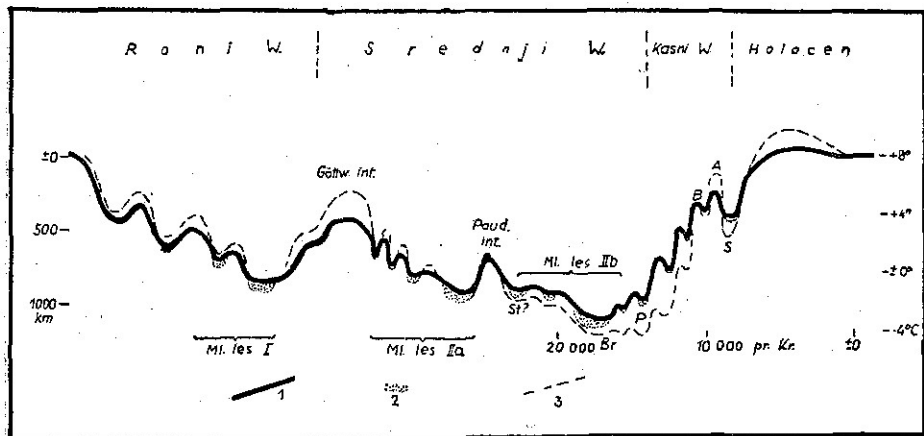
⁸⁵ J. Büdel, Neue Wege der Eiszeitforschung, Erdkunde 3, 1949, str. 82.

⁸⁶ J. Büdel, Die räumliche und zeitliche Gliederung des Eiszeitklimas, Naturwiss. 36, 1949, 4, str. 105 i Die Klimaphasen der Würmeiszeit, Naturwiss. 37, 1950, 19, str. 438.

⁸⁷ P. Woldstedt, Über die Gliederung der Würm-Eiszeit und die Stellung der Lössen in ihr, Eiszeitalter u. Gegenwart 7, 1956, str. 82.

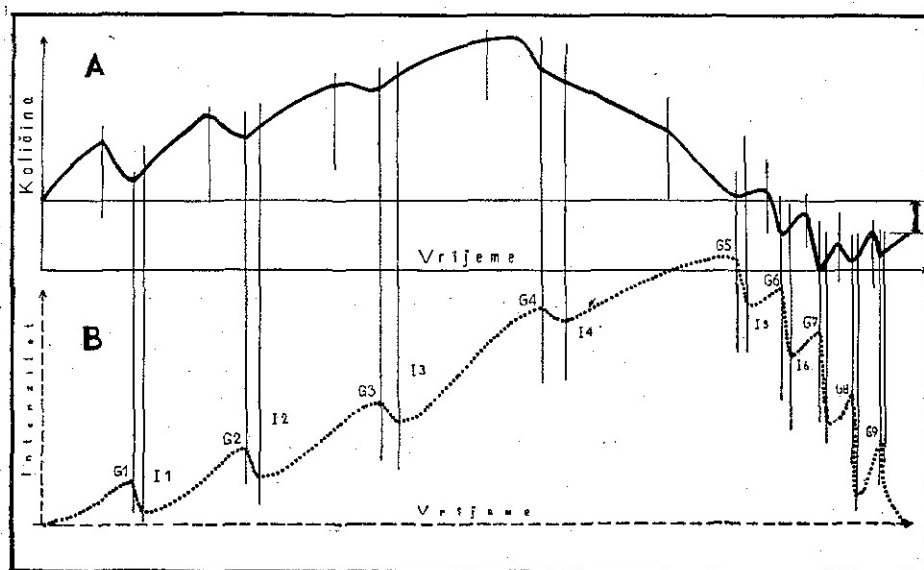
⁸⁸ C. E. P. Brooks, op. cit., str. 1112 (opaska 3).

⁸⁹ Ovo ne bi bilo u suprotnosti s istraživanjima A. Pencka (1909) koji je utvrdio da u maksimumu Würma u firnskoj zoni nije bilo više padalina nego danas. Naime, odmah ćemo vidjeti da je maksimum padalina bio prije maksimalnog površinskog razvoja glacijacije, a u samom maksimumu količina padalina je već znatno pala.



Sl. 19. Shematska krivulja toka Würma u srednjoj Evropi. 1, položaj fronte ledenog pokriva; 2, faze taloženja lesa; 3, temperatura; St. stadijal Stettin; Br. Brandenburg; P. Pomeranien; S. Salpausselkä; B. Bölling; A. Alleröd. (P. Woldstedt 1956)

Fig. 19. Schematic curve of the Würm glaciation in Central Europe. 1, The front of the ice sheet; 2, the phases of loess deposition; 3, temperature; St., Stettin stadial; Br., Brandenburg; P., Pomeranian; S., Salpausselkä; B., Bölling; A., Alleröd



Sl. 20. Hipotetički hod padalina (A) u toku glacijacije sa superponiranim promjenama u glacijalima i interglacijalima. B, površinske promjene ledenog pokriva

Fig. 20. The curve of precipitation (A) during the glaciation; B, surface extent of the ice sheet (or sheets)

padalina, koje sve više padaju u krutom stanju. Ekspanzijom ledenog pokrova nakon izvjesnog vremena (vjerojatno negdje oko sredine glacijacije) počinje se odražavati negativan utjecaj njegovog postojanja. Temperatura prensko padne, smanjuje se ishlapljivanje u oceanu; posljedica je toga postepeno smanjenje padalina (sl. 20). Ovo bi pravilo vrijedilo i za pulsacije nižeg reda: količina padalina počet će opadati mnogo prije maksimalnog površinskog razvoja ledenog pokrova u glacijalu; zato postoji izvjesna vremenska razlika između maksimuma padalina i maksimalnog površinskog razvoja ledenog pokrova u svim glacijalima, kao i maksimalne količine padalina i maksimuma interglacijala. Krivulja padalina bi zapravo bila krivulja volumenskog razvoja ledenog pokrova. Nastupom prvog glacijala G 1 količina padalina počne rasti do sredine glacijala kad počne naglo opadati. To bi bila posljedica površinske ekspanzije ledenog pokrova. Uskoro poslije početka povlačenja ledenog pokrova u prvom interglacijalu I 1, tj. pomicanjem ciklonalnog pojasa u unutrašnjost ledenog pokrova i izvjesnim otopljanjem mora, količina padalina počne rasti i dostigne maksimum na prijelazu iz interglacijala I 1 u glacijal G 2 i u prvom dijelu istog glacijala. To se ponavlja nekoliko puta, sve do sredine glacijacije (odnosno do sredine glacijala na sjevernoj hemisferi u preistocenu), sve do četvrtog glacijala G 4. Već su prošla 4 glacijala, a i u protekla 3 interglacijala ledeni pokrov je bio vrlo važan klimatski faktor. Posljedica toga bit će postepeno smanjenje padalina od sredine glacijacije, usprkos činjenici da će se ledeni pokrov i dalje širiti i maksimalnu će površinu imati u petom glacijalu, G 5. Sve do sredine glacijacije količina padalina u svakom mlađem glacijalu i interglacijalu bit će veća nego u prethodnoj odgovarajućoj fazi: *prvu etapu, period ekspanzije ledenog pokrova, karakterizira porast padalina*. Od sredine glacijacije započeo je suprotan proces: od sredine nadalje glacijaciju karakterizira konstantan pad količine padalina, pa je *na kraju glacijacije količina padalina znatno manja nego na njenom početku*. To je i jedan od bitnih uzroka nestanka glacijacije (W. H. Hobbs 1911). Dakle, *sníženje temperature preko optimalne granice, kao i smanjenje padalina, dovode do progresivnog smanjenja akumulacije i konačno do likvidacije glacijacije*.⁹⁰

Kvantitativno određivanje količine padalina u toku kvartarne glacijacije vrlo je težak posao. Usprkos tome, i fragmentarni podaci koji postoje mogli bi u osnovi potvrditi iznijetu shemu. Sumirajući sve poznate rezultate, moglo bi se tvrditi da je za glacijaciju sjeverne hemisfere karakterističan slijedeći razvoj klime: postepeno sve jača kontinentalnost i aridizacija klime počevši od prvog (Günz) prema posljednjem glacijalu zato što post-Günz, prema našem mišljenju, pripada u recesionu fazu pleistocenske glacijacije.

U skladu s već iznijetim našim shvatanjem mehanizma pulsiranja ledenih pokrova na sjevernoj hemisferi, hod padalina, kako smo pretpostavili na sl. 20, karakterističan je za svaki glacijal, a definitivno je utvrđen za Würm. Svježja, vlažna klima i postepeni prijelaz u suhu, izrazito kontinentsku klimu u umjerenom pojasu sjeverne hemisfere — kako je

⁹⁰ C. E. P. Brooks, op. cit., str. 271 (opaska 4): Danas je općenito prihvaćeno mišljenje da ledeni pokrovi utječu na svoj padalinski režim.

utvrdio J. Büdel — bila bi shema za sve glacijale (mijenjale su se samo apsolutne vrijednosti zbog opće tendencije aridizacije i zahlađenja klime od prvog prema zadnjem glacijalu).⁹¹⁻⁹⁷ Usprkos porastu temperature do kojeg je došlo povlačenjem ledenih pokrova u etapi deglacijacije, ni padaline ni temperatura nisu se — sve dok su postojali i zadnji ostaci leda — mogli povratiti na početno stanje. U svakoj fazi deglacijacije bilo je manje padalina, a temperature su bile niže nego u odgovarajućim fazama ekspanzije würmskih ledenih pokrova. Klima kasnog Würma nije mogla biti ista kao u ranom Würmu, jer nikako nije (ni fizički ni klimatski) shvatljivo zašto bi ista količina padalina i jednaka temperatura u početku Würma uzrokovali ekspanziju ledenih pokrova, a na kraju Würma — recesiju. Ledeni pokrovi ni u jednom stadijalu, ni u jednoj fazi ponovne ekspanzije poslije maksimuma Würma nisu se vraćali u početno stanje, uvijek su zastajali »na pola puta« i dalje nisu mogli. Očito je da nisu imali dovoljno leda da se vrate u prijašnje stanje.

A. Klein⁹⁸ je izračunala količinu padalina u cijeloj Evropi u maksimumu Würma. Nije došlo samo do potiskivanja depresija na jug nego je došlo i do općeg smanjenja padalina prema današnjem stanju; što je najvažnije, padaline su se najviše smanjile u kritičnom prostoru, na samom sjevernoevropskom ledenom pokrovu, pa je jasno zašto se on morao povlačiti.

Pluvijali i interpluvijali. Problem postanka pluvijala i interpluvijala u principu je definitivno riješen; kauzalna veza s glacijacijama, odnosno s glacijalima i interglacijalima, dokazana je i općenito prihvaćena.⁹⁹ Mehanizam je ovaj: sve jačim razvojem glacijalne anticiklone nastaje potiskivanje depresija, odnosno polarne fronte i klimatskih pojava prema ekvatoru, pa su putanje mnogo južnije (na sjevernoj hemisferi), odnosno sjevernije (na južnoj hemisferi) nego u početku glacijacije, odnosno glacijala. Potiskivanje klimatskih zona nije bila jednostavna translacija: klimatske i vegetacijske zone viših geografskih širina bile su više potisnute nego klimatske i vegetacijske zone nižih geografskih širina. Istovremeno se pojas ekvatorskih padalina nešto proširio na štetu oslabljenog pojasa subtropskog visokog tlaka.

⁹¹ R. F. Flint, op. cit., str. 396.

⁹² P. Woldstedt, Das Eiszeitalter. Grundlinien einer Geologie des Quartärs I, Stuttgart 1954, str. 245.

⁹³ T. Kobayashi i T. Shikama, The Climatic History of the Far East u kompendiju Descriptive Palaeoclimatology, New York—London 1961, str. 302.

⁹⁴ P. Woldstedt, Über die Gliederung der Würm-Eiszeit und die Stellung der Lössen in ihr, Eiszeitalter u. Gegenwart 7, 1956, str. 78.

⁹⁵ F. E. Zeuner, The Pleistocene Period, London 1959, str. 333.

⁹⁶ H. Poser, Auftauftiefe u. Frostzerrung im Boden Mitteleuropas, Naturwiss. 35, 1948, str. 269 i 307.

⁹⁷ K. Butzer, Quaternary stratigraphy and climate in the Near East, Bonn 1958.

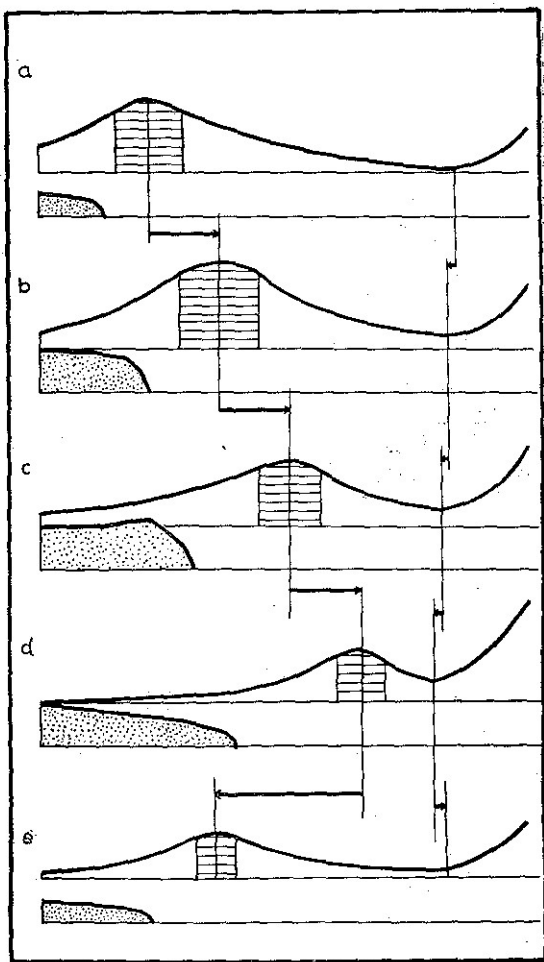
⁹⁸ Prema F. Klute, Das Klima Europas während des Maximums der Weichsel—Würm—Eiszeit und die Änderungen bis zur Jetztzeit, Erdkunde 5, 1951, str. 274.

⁹⁹ J. Büdel, Berichte über Klima-morphologische und Eiszeit-Forschungen in Nieder-Afrika, Erdkunde 6, 1952, str. 109.

U toku glacijacije mijenja se i prostorna raspodjela padalina (sl. 21). U početku glacijacije maksimalne padaline padaju u zoni embrionalnog ledenog pokrova (a). Paralelno s razvojem ledenog pokrova »val« maksimalnih padalina, koji je u prvim fazama glacijacije sve viši, prelazi preko ruba ledenog štita (b), a kasnije (c i d), u maksimalnim fazama, i mnogo dalje od njega (visoko razvijeni pluvijal). To bi bilo svojevrсно prigušivanje putujućeg vala, tj. maksimalna količina padalina se smanjuje, a zona maksimalne količine padalina (šrafirano) oscilira. U pluvijalu je potisnuta prema ekvatoru, u interpluvijalu prema polu. Povlačenjem te zone u interpluvijalu (ili prestankom glacijacije) u fazi e doći će do izvjesnog pojačanja »vala« u zoni ledenog pokrova, ali se neće ponoviti stanje kao u početku. I amplituda i duljina vala na kraju glacijacije je manja nego u početku.

Sl. 21. Shema postanka pluvijala bez pulsacija ledenog pokrova drugog reda, odnosno bez subpluvijal (v. tekst)

Fig. 21. Schematic representation of the pluviation without secondary pulsations (without subpluvials)



U skladu s izloženim mehanizmom pulsiranja ledenih pokrova, mehanizam pluvijala i interpluvijala bi bio nešto kompliciraniji.¹⁰⁰ Pluvijali i interpluvijali nisu ciklički procesi, niti su svi jednako intenzivni, niti jednako trajni (sl. 20). Zato trajanje pluvijala i interpluvijala povećava se prema maksimumu glacijacije, a od maksimuma opada prema kraju

¹⁰⁰ H. Flohn, Studien über die atmosphärische Zirkulation in der letzten Eiszeit, Erdkunde 7, 1953, str. 268; Pluvijale nije karakteriziralo samo povećanje padalina nego i smanjenje evaporacije kao posljedica nižih temperatura. Ishlapljivanje (i padaline) bilo je barem 20% manje nego danas.

glacijacije. Budući da dubina prodora depresija prema ekvatoru ovisi o površinskom razvoju ledenog pokrova, jasno je da će maksimalni pluvijali (faza d) dublje prodrijeti u subtropski pojas nego pluvijali na početku i na kraju glacijacije, ali je značajno da se u toj fazi već osjeća pad količine padalina zbog općeg zahlađenja. Primjenjeno na polarnu frontu, to znači da će ona najdalje biti potisnuta prema ekvatoru u maksimumu glacijacije, a manje u pluvijalima na početku i na kraju glacijacije. Osim toga, treba misliti i na spomenuti opći porast ili pad količine padalina u toku glacijacije, pa će i zato maksimalni pluvijali biti vlažniji u niskim geografskim širinama od ranijeg i kasnijih, to više što je duljina pluvijala za razvoj nekih procesa čak i važnija od same količine padalina.

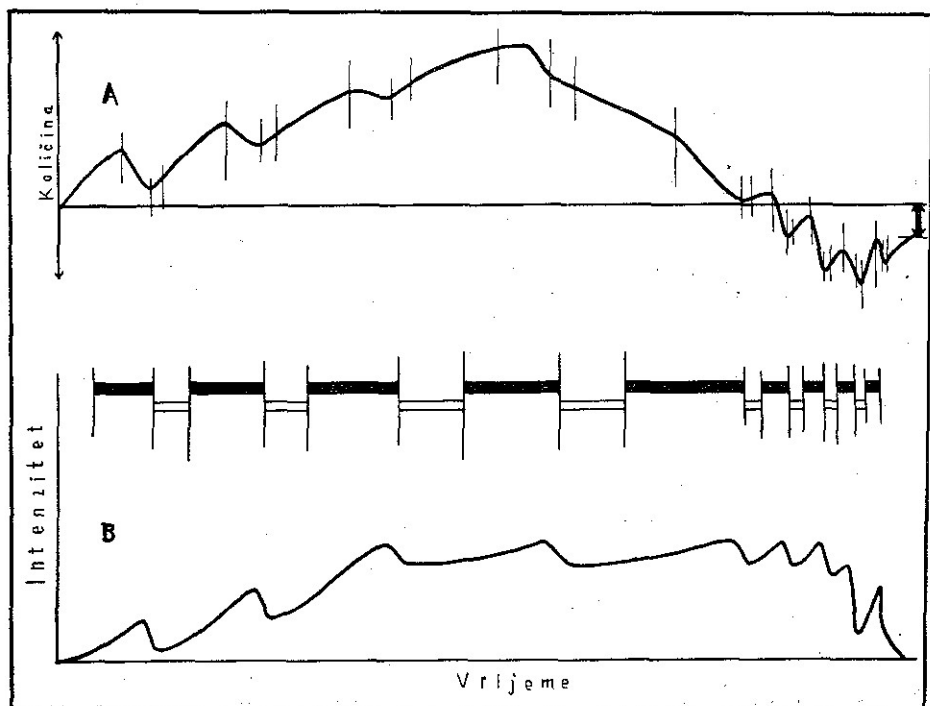
Iz pretpostavke da je maksimum padalina imao biti prije maksimuma površinskog razvoja ledenog pokrova se izvesti zaključak da maksimumi pluvijala nisu sinhroni s maksimumima glacijala; maksimumi pluvijala su raniji od maksimuma glacijala. Tako je kad se misli na količinu padalina. U prostornom smislu postoji sinhronost. Naime, najdublji prodor pluvijala (depresija) prema ekvatoru bit će u trenutku maksimalnog površinskog razvoja ledenog pokrova, jer je tada atmosferska cirkulacija najintenzivnija, a pojas subtropskog visokog tlaka je najjače sužen.

Intenzitet pluvijala ne može se jednostavno odrediti, jer je potrebno naglasiti i udaljenost od ledenog pokrova. U mjestu A koje je mnogo bliže ekvatoru od mjesta B, raniji i kasniji pluvijali se mnogo slabije osjećaju nego maksimalni, dok će ti isti »slabi« pluvijali ostaviti dubok trag u području mjesta B. Budući da se ciklone potiskuju prema ekvatoru postepeno, očito je da će u krajevima bliže ekvatoru pluvijali početi kasnije nego u krajevima dalje od njega. Pluvijal će, isto tako, prestati prije bliže ekvatoru nego dalje od njega zato što se i ciklone postepeno povlače; krajeve bliže polu još će zahvaćati depresije, ali one više neće moći prodirati daleko prema ekvatoru. Trajanje pluvijala povećavat će se idući od niskih geografskih širina prema ledenom pokrovu. Upravo zato se ne može dati jedna opća ocjena intenziteta pluvijala i interpluvijala; uvijek treba označiti udaljenost promatranog lokaliteta od ledenog pokrova.

Iz opisanog mehanizma pulsiranja antarktičkog ledenog pokrova mogla bi se rekonstruirati klima subtropskog pojasa na južnoj hemisferi. Svaki glacijal na Antarktici značio je postepeno potiskivanje depresija u subtropski pojas i uzrokovao je opći porast padalina u toj zoni; to su bili pluvijali. Suprotno tome, interglacijal na Antarktici u istom području je bio — interpluvijal. Iz mehanizma pulsiranja antarktičkog ledenog pokrova mora se izvesti zaključak da smjena pluvijala i interpluvijala nije bio ciklički proces (sl. 22). Iz našeg zaključka da je antarktički kontinent relativno malen za razvoj većeg ledenog pokrova, u svim razvijenijim glacijalima (tj. u najvećem dijelu kvartara antarktički ledeni pokrov je imao podjednake dimenzije; konkretno, na osnovu ove pretpostavke može se tvrditi da su, npr., mindelski, riski i virmski glacijali na Antarktici bili jednako površinski razvijeni.¹⁰¹ Zato je potiskivanje depresija u

¹⁰¹ Budući da antarktički ledeni pokrov nije mogao imati veću površinu nego što je imao u svakom od posljednjih glacijala, povoljniji klimatski uvjeti za aku-

maksimalnoj fazi svakog od spomenutih glacijala prestalo uglavnom u istim geografskim širinama. Jedina promjena koja je nastupila usprkos takvom mehanizmu pulsiranja jest progresivno smanjenje padalina i skraćenje trajanje pluvijala i interpluvijala od maksimalnog pluvijala



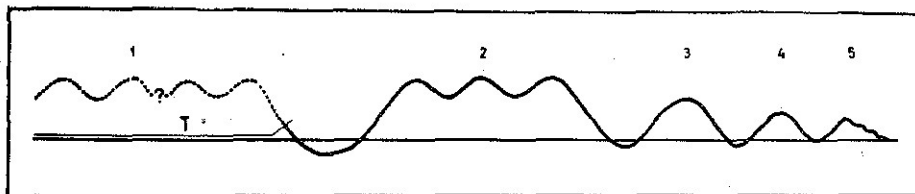
Sl. 22. Hipotetički mehanizam smjene pluvijala i interpluvijala na južnoj hemisferi u kvartaru. A, količina padalina; B, pulsiranje antarktičkog ledenog pokriva

Fig. 22. The curve of pluvials and interpluvials in the southern hemisphere during the Quaternary glaciation. A, The precipitation; B, the pulsation of the Antarctic Ice Sheet

prema današnjici. Ove dvije promjene morale su se odraziti na intenzitetu, odnosno na dubini tragova koje su ostavili pluvijali i interpluvijali. Iako još nema detaljnijih kvantitativnih podataka o pluvijalima na južnoj hemisferi, ono što postoji ipak je dovoljno da se potvrdi sličnost s predlo-

mulaciju leda u prijašnjim glacijalima mogli su se odraziti samo na većoj debljini njegovog ledenog pokriva. T. L. Péwé (Glacial history of the McMurdo Sound region, Antarctica, Trans. Amer. Geophys. Union 41, 1960, 2, str. 391) navodi da su u području McMurdo Sounda na Antarktici ustanovljena najmanje 4 glavna kvartarna glacijala, a pokazalo se da je svaki mladi bio manje intenzivan od prethodnoga, tj. u svakom sukcesivnom naletu led je bio nešto tanji nego u prethodnom naletu.

ženim hipotetičkim mehanizmom. Na klimatogramu južne Afrike (sl. 23) prikazan je tok klime u kvartaru u poređenju s današnjim stanjem. Jasno se vidi da se pluvijali u južnoj Africi nisu ponavljali ciklički, a to tačno odgovara našoj shemi. Trajanje pluvijala, kao i interpluvijala, progresivno se skraćivalo počevši od prvog sigurno ustanovljenog pluvijala u »donjem pleistocenu«¹⁰² prema današnjem vremenu. Od drugog pluvijala

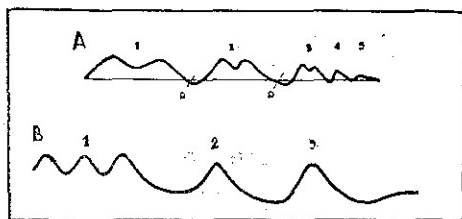


Sl. 23. Klimatogram južne Afrike u kvartaru. Ravna crta, današnji klimatski uvjeti. T, tektonski pokreti; 1, prvi pluvijal (donji pleistocen); 2, drugi pluvijal (srednji pleistocen); 3, treći pluvijal (gornji pleistocen); 4, četvrti pluvijal (gornji pleistocen); 5, posljednja vlažna faza (H. Breuil, C. van Riet Loewe i A. du Toit)

Fig. 23. Climatogram for South Africa of climatic changes in the interior during the Quaternary. The straight line indicates present climatic conditions. The curve above the line indicates wetter conditions

nadalje i intenzitet pluvijala se smanjivao, što je u skladu s postepenim prigušivanjem pulsiranja antarktičkog ledenog pokriva, odnosno s apsolutnim smanjenjem padalinama u svakom sukcesivnom pluvijalu. Uzme li se u obzir činjenica da je klimatogram hipotetičan, on zapravo ne prikazuje realnu, tj. apsolutnu veličinu promjena, jer je vrlo vjerovatno da drugi pluvijal nije bio toliko intenzivniji od petog pluvijala, kako bi se zaključilo po dijagramu, a ni trajanje drugog pluvijala vjerovatno nije proporcionalno s prikazanim trajanjima mlađih pluvijala.

Vrlo je sličan opisanom klimatogramu južne Afrike dijagram padalina u kvartaru u Keniji (sl. 24). Kontrakcija trajanja pluvijala i inter-



Sl. 24. A. Promjene intenziteta padalina u kvartaru u Keniji. 1, prvi pluvijal; 2, pluvijal Kamasian; 3, Gamblian; 4, Makalian; 5, Nakuran; R., rasjedanje. (L. Leakey, 1936) B. Promjena vlažnosti klime u području rijeke Vaal; 1, prva vlažna faza; 2, druga vlažna faza; 3, treća vlažna faza (P. Söhngge, D. Visser i van Riet Loewe, 1937)

Fig. 24. A, Fluctuations of rainfall intensity in Kenya. B, Fluctuations of rainfall intensity in the Vaal River Basin, South Africa

¹⁰² Donji pleistocen po starijoj kronologiji.

pluvijala je vrlo jasna i vjerojatno tačnija nego u prethodnom primjeru. Ovaj je dijagram vrlo bliz realnom stanju, jer su prikazane razlike padalina u pluvijalima mnogo manje nego u prethodnom slučaju. Vrlo je interesantno da su čak i promjene padalina trećeg reda, tj. promjene u samim pluvijalima, bile i vremenski i po intenzitetu različite, što tačno odgovara iznijetim pretpostavkama.

Čini se da je dijagram promjene vlažnosti klime u području južnoafričke rijeke Vaal (B u sl. 24) najbliži našem dijagramu hipotetičkog toka padalina na južnoj hemisferi. Upozorimo na činjenicu da je sve jače zahlađenje djelomično kompenziralo utjecaj smanjenja količine padalina — samo zato su breгови krivulje na podjednakoj visini, ali su doline krivulje koje pripadaju interglacijalima izrazito sve niže — pa se u stvari dobiva dojam da aridizacija klime nije bila tako drastična. Dijagram pokazuje realan stupanj aridizacije (ili vlažnosti) klime, kako se on u prirodi odražava zajedno s temperaturom (a samo je ta relacija važna z intenzitet geomorfoloških proces i za razvoj vegetacije, na osnovu čega se i konstruiraju takvi dijagrami), a ne isključivo apsolutnu količinu padalina, kako smo učinili na našem dijagramu (sl. 20). Kad se to ima na umu, onda se vidi da postoji vanredna podudarnost podataka, odnosno toka klime.

Iako su glacijali na sjevernoj hemisferi u suštini bili istovremeni s glacijalima na južnoj hemisferi, bitno različita struktura glacijacije na sjevernoj hemisferi utjecala je i na tok pluvijala i interpluvijala. Pulsiranje ledenih pokrova na sjevernoj hemisferi bilo je neusporedivo intenzivnije od sličnih procesa na južnoj hemisferi. Zasad još ne postoje kvantitativni podaci o tim procesima na sjevernoj hemisferi. Usprkos tome, po nekim rezultatima bi se moglo zaključiti da je smjena pluvijala i interpluvijala na sjevernoj hemisferi u suštini bila određena istom zakonitošću kao i na južnoj hemisferi. Promjene u vegetacijskom pokrovu zapadnog Sredozemlja i srednje Evrope pokazuju da su se životni uvjeti pogoršavali u interglacijalima.¹⁰³ Isto tako postepena zamjena karbonata mnogo lakše topljivim gipsom u mlađim terasama Nila pokazuje da su pluvijali bili sve suši u srednjem i gornjem pleistocenu.¹⁰⁴

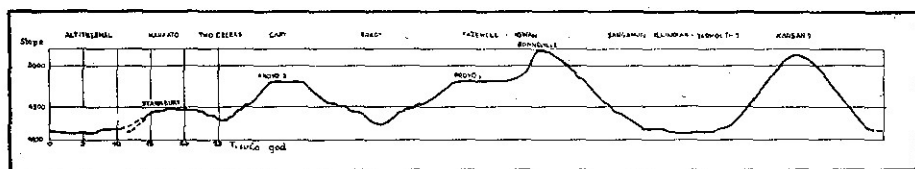
Posljednji (i svaki drugi) glacijal na sjevernoj hemisferi može se shvatiti kao kompletna glacijacija, pa bi se pluvijal mogao pratiti u svakom posebnom slučaju, iako se, naravno, najbolje pozna tok posljednjeg pluvijala.¹⁰⁵ Iz grafičkog prikaza osciliranja jezerske razine, upoređenog s kronologijom posljednjeg glacijala u Sjevernoj Americi (sl. 25), jasno se očituje pravilnost osciliranje jezerske razine. Budući da je kronologija najvažnijeg dijela grafikona pouzdana (radiokarbonsko određivanje vremena) ovaj grafikon je ujedno potvrda pretpostavke o asinhronosti maksimumu glacijala i pluvijala.

¹⁰³ A. Wagner, Klimaänderungen und Klimaschwankungen, Braunschweig 1940, str. 145.

¹⁰⁴ K. Butzer, Contribution to the Pleistocene geology of the Nile Valley, Erdkunde 13, 1959, str. 65.

¹⁰⁵ A. J. Eardley, V. Gvosdetsky i R. E. Marsell, Hydrology of Lake Bonneville and sediments and soils of its basin, Bull. Geol. Soc. America 68, 1957, str. 1141.

Više razine jezera (Bonneville, Provo 1 i Provo 2) koje odgovaraju maksimalnoj fazi pluvijala bile su postignute davno prije maksimuma glacijala Wisconsin. Maksimalnoj fazi glacijala Wisconsin, tj. maksimalnoj fazi ekspanzije sjevernoameričkog ledenog pokrova, vremenski odgovara razina Stansbury, koja je i visinski i vremenski daleko od maksimuma pluvijala. Razina Provo 1, odnosno Bonneville, trebalo je da bude viša od razine Provo 2, kad bi količina padalina bio jedini faktor koji je odredio visinu razine. U fazi Bonneville, koja s fazom Provo 1 čini jednu cjelinu, jezerska voda je probila pregradu i počela otjecati u Snake River, pa je razina jezera morala pasti na razinu Provo 1. Ovakav režim može se objasniti samo obiljem padalina u početku glacijala i njihovim progresivnim smanjenjem u kasnijim fazama, pa je u trenutku maksimalnog



Sl. 25. Oscilacije jezera Bonneville u posljednjem glacijalu (A. J. Eardley, V. Gvosdetsky i R. E. Marsell, 1957)

Fig. 25. Graph showing proposed chronology and fluctuations of lake level at Lake Bonneville

повršinskog razvoja sjevernoameričkog ledenog pokrova klima bila vrlo suha.

Iz ovog se materijala vidi da su padaline vanredno važan meteorološki element, te su bitno utjecale na mehanizam ekspanzije ledenih pokrova. Zato ćemo rezimirati tok padalina u toku kvartarne glacijacije. Klima pliocena znatnih dijelova današnjeg umjerenog pojasa bila je semiaridna, barem u toplom dijelu godine. Pri kraju pliocena pojačana je riječna erozija; to bi bila posljedica povećanja padalina i drugih faktora. Iz mehanizma glacijacije mora se zaključiti da ni tok padalina u kvartaru nije bio jednostavan. Prije početka glacijacije pojasi zapadnih vjetrova bili su na obje hemisfere nešto potisnuti prema polovima, pa su pojasi subtropskog povišenog tlaka obuhvatili znatno veći prostor i prema polovima i prema ekvatoru. Neposredno pred nastup glacijacije hlađenjem polarnih kalota započelo je potiskivanje polarnih fronta prema ekvatoru. Jače potiskivanje polarnih fronta započelo je zapravo sezonskim zaleđivanjem polarnih mora (zimi), koje je započelo mnogo prije glacijacije; to je bio snažan impuls za intenziviranje atmosferske cirkulacije. Budući da se termički gradijent povećao, mora se pretpostaviti i izvjesno opće intenziviranje atmosferske cirkulacije. Kvartarna glacijacija nije počela sinkrono na obje hemisfere, pa je spomenuti proces započeo mnogo prije na južnoj nego na sjevernoj hemisferi.

Dva su bitno različita procesa: 1. Osciliranje pojasa padalina između polarnih i subpolarnih zona treba shvatiti kao neposrednu posljedicu pulsiranja ledenih pokrova i intenziviranja, ili slabljenja glacijalne anticiklone.

U ovom slučaju ekspanzijom ledenog pokrova u jednim područjima (polarna i umjerena zona) količina padalina je pala, a u drugim je područjima (suptropi) porasla, dok je u fazi recesije (interglacijal) bilo obratno. — 2. Hlađenjem svjetskog mora pod neposrednim utjecajem postojanja ledenih pokrova smanjivalo se ishlapljivanje, odnosno transport vlage u područja pod neposrednim utjecajem ledenih pokrova. To je bitno utjecalo na opću tendenciju povećanja i smanjenja padalina u svim krajevima bez izuzetka. To je bio regulator padalina u planetarnim dimenzijama.

Gledajući iz ove perspektive, dugotrajna diskusija o tome da li je kvartarnu glacijaciju karakteriziralo povećanje ili smanjenje padalina mogla bi se usmjeriti u drugom pravcu. Ako se ovaj problem vremenski i prostorno definira, onda se vidi da je za kvartarnu glacijaciju značajno i povećanje i smanjenje padalina; količina padalina je u početku glacijacije porasla prema prethodnom stanju, ali je ekscesivnim razvojem ledenih pokrova postepeno opadala u recesionoj etapi glacijacije pa je danas, u cjelini vjerojatno manja nego u periodu nastupa glacijacije. To vrijedi za kvartarnu glacijaciju kao cjelinu. Ako se detaljizira, onda se vidi da je tendencija razvoja u raznim dijelovima svijeta mogla biti i — suprotna. Uzmimo, npr., suptropski prostor. Tu je u pluvijalima palo znatno više padalina nego u isto tako dugom periodu prije prvog pluvijala. Za suptropske zone kvartarna glacijacija je značila povećanje padalina. Suprotno tome su polarna područja. Poslije relativnog i apsolutnog povećanja padalina u početku kvartarne glacijacije za stalno hladna polarna područja je karakteristično smanjenje padalina, jer je u tom razdoblju palo manje padalina nego u odgovarajućem periodu prije ekspanzije ledenih pokrova, jer su polarna područja bila zahvaćena intenziviranjem atmosfere cirkulacije već davno prije ekspanzije ledenih pokrova. U umjerenim pojasima situacija je bila mnogo kompliciranija. U tim je zonama količina padalina za vrijeme maksimalnih faza (u klimatološkom smislu) glacijala i interglacijala bila smanjena, a povećavala se u prelaznim razdobljima. Teško se može reći kakva je bila konačna »bilanca«, jer je trajanje spomenutih razdoblja u raznim dijelovima svijeta bilo različito. Najvažnija je za razvoj glacijacije činjenica da je količina padalina u zoni ledenih pokrova opadala u glacijalima, tj. onda kad je za održanje glacijacije bila najpotrebniya. U cjelini bi se moglo smatrati da je za umjerene pojase značajno smanjenje padalina. (Misli se na apsolutne količine padali na, a ne na aridizaciju klime koja je ovisna i o temperaturi.) Za glacijaciju se ne može generalizirati, ne može se govoriti o općem planetarnom hodu padalina. Količina padalina u kvartaru je pala u polarnom i umjerenom pojasu, tj. u pojasima koji su jedino važni za alimentaciju ledenih pokrova, dok je istovremeno porasla u suptropskom pojasu. Promjene su bile relativno najmanje u tropima, pa one gotovo nisu ni utjecale na opći tok glacijacije.

Glacijacija i oceanska cirkulacija. Kad se ima na umu činjenica da je akumulacija leda moguća samo onda kad postoji povoljan odnos između padalina i temperatura, odnosno u geografskom smislu, u povoljnom prostornom odnosu kopna i mora, onda je jasno da svjetski ocean ima

golemu važnost za razvoj glacijacije. Zato je za razvoj velikih ledenih pokrova potrebno opće ohlađenje mora.¹⁰⁶ Taj je proces neosporno utvrđen. Kao i kod svih ostalih faktora, uzajaman je odnos ledenog pokrova i oceana; jedan djeluje na drugoga.

Glacijacija stvara specijalnu kružnu atmosfersku cirkulaciju; budući da su snaga i konstantnost zračne cirkulacije glavni faktor koji utječe na morska strujanja, nije teško predvideti da se glacijalna »oceanska cirkulacija radikalno mijenja«. ¹⁰⁷ Možda i nešto više: ona se u cijelosti stvara, a ne samo modificira. Zato bi se moglo tvrditi da *glacijacija stvara specijalnu, kružnu oceansku cirkulaciju koja* — kao i atmosferska cirkulacija — nastaje davno prije postanka ledenih pokrova.

Neposredno uz ledeni pokrov, napose u zoni šelfskog leda, stvaraju se velike količine vrlo hladne vode (pridnena i dubokomorska voda) koja tone i ispunjava oceanske basene. Ledeni pokrovi stvaraju i goleme mase hladne vode koje, kao hladne površinske struje, opkoljavaju ledeni pokrov i teku prema nižim geografskim širinama.

Morske struje oko zaleđenog kontinenta u suštini bi se poklapale sa smjerom glavnih vjetrova u blizini ledenog pokrova. Oko hipotetskog ledenog pokrova kružnog oblika na južnoj hemisferi neposredno bi uz obalu tekla relativno slaba struja s istoka na zapad, a nešto dalje od obale širok pojas mora bio bi sav zahvaćen golemom strujom koja bi tekla od zapada prema istoku. Podmorski reljef i blizina kontinenta mogu znatno izmijeniti taj smjer, pa je vrlo vjerojatno da će neki ogranci struje teći u niže geografske širine.

Sistem struja bit će mnogo kompliciraniji oko ledenih pokrova celularnog tipa glacijacije, napose u razdobljima kad bude postojala komunikacija između sredoziemnog mora i svjetskog oceana. U fazama prekida te veze morska cirkulacija će biti slična teoretskoj shemi: uz granicu morskog leda teći će slaba istočna struja, a dalje na pučini jaka zapadna struja.

Budući da glacijacija stvara vlastitu atmosfersku cirkulaciju, moglo bi se zaključiti da je i kvartarna oceanska cirkulacija posljedica glacijacije; ona je s njom nastala i zajedno s njom će i nestati.¹⁰⁸ Međutim, geneza glacijalne oceanske cirkulacije sasvim je drukčijeg reda veličine nego geneza ledenih pokrova; ona je starija od njih. Glacijalna oceanska cirkulacija u kvartaru nastala je prije ekspanzije ledenih pokrova i održat će se dugo poslije njihova nestanka. Ledeni pokrovi, odnosno atmosferska cirkulacija koju su stvorili, razvijaju do maksimuma proces čiji se elementi naziru već mnogo prije nastupa glacijacije. Zato bismo početak kvartarne oceanske cirkulacije mogli postaviti u doba mnogo prije početka kvartara.

Oceanska cirkulacija oko Antarktike pruža primjer idealne glacijalne morske cirkulacije. To je posljedica kružnog oblika kontinenta, prostranosti okolnih mora i vrlo pravilne i jednolike atmosferske cirkulacije. U fazama velikog površinskog razvoja ledenog pokrova, neposredno uz obalu

¹⁰⁶ C. E. P. Brooks, op. cit., str. 185.

¹⁰⁷ C. E. P. Brooks, op. cit., str. 187.

¹⁰⁸ C. E. P. Brooks, op. cit., str. 139.

je tekla — i danas teče — slaba istočna struja kao posljedica postojanja istočnog vjetera. Dalje od obale je pojas zapadne morske struje koja raznosi goleme količine hladne morske vode i daleko na sjever prema ekvatoru; to strujanje hladne vode na sjever jest posljedica geografskog razmještaja kontinenata na južnoj hemisferi i podmorske topografije.¹⁰⁹

Morska cirkulacija oko Antarktike u interglacijalima se nešto mijenjala. Istočna struja je vjerojatno oslabila i konačno u maksimumu je nestala. Na njeno je mjesto došla zapadna struja koja se povlačila na jug zajedno s pojansom depresija. Time je i brzina struje, kao i volumen transportirane vode, površinske i dubinske, opao za odgovarajuću količinu.

Osim površinskih struja, oko Antarktike postoji i kompliciran sistem dubinskih struja. U antarktičkom obalnom području, napose u basenima Weddellova i Rossova mora, stvaraju se velike količine vrlo hladne dubokomorske i pridnene vode koje tonu i ispunjavaju dubokomorske basene svih triju oceana, ili stvaraju posebne slojeve vode u svim spomenutim oceanima. Prema tome, oceanska cirkulacija imala je, i ima, golemu važnost za razvoj kvartarne glacijacije, ali ne samo na južnoj hemisferi; ona je glavni medij koji povezuje glacijacije obiju hemisfera. Antarktička oceanska cirkulacija bitno je pridonijela općem sniženju temperature kao jednom od uvjeta za nastup kvartarne glacijacije koja je dalje intenzivirala već postojeću oceansku cirkulaciju. Neprобоjna barijera hladne vode oko Antarktike bitno je pridonijela termičkoj izolaciji njegova ledenog pokriva. Poslije nekog vremena goleme mase hladne vode postale su aktivan i vrlo važan glaciološki faktor na južnoj hemisferi; njena važnost, prije svega, proizlazi iz činjenice da antarktička konvergencija bitno utječe na lokaciju polarne fronte, tj. na cijelu atmosfersku cirkulaciju na južnoj hemisferi¹¹⁰; u maksimumima glacijala antarktička konvergencija bila je potisnuta na sjever za oko 10°, tj. na 50° S.¹¹¹ *Ekscesivnim razvojem ledenog pokriva, odnosno prevelikom produkcijom hladne vode, postepeno se stvaraju uvjeti za likvidaciju antarktičke glacijacije (smanjenje evaporacije, depresije teško prodiru na ledeni pokrov); antarktička oceanska cirkulacija je jedan od bitnih faktora koji je stvorio i termički izolirao, ali i faktor koji će pridonijeti likvidaciji antarktičke glacijacije.*

Zbog različite strukture glacijacije, odnosno bitno različitog razmještaja, kopna i mora, kompleksnosti atmosferske cirkulacije, velikih kolebanja temperature i pritjecanja slatke vode s kontinenta, morska cirkulacija na sjevernoj hemisferi je sasvim različita od oceanske cirkulacije oko Antarktike.¹¹² To bi mnogo više vrijedilo za interglacijale nego za glacijale. U glacijalima je jako oslabljena Golfska struja (znatno hladnija već u »izvorišnom« dijelu) bila odbijena prema jugu. Istočna struja u Atlantiku vjerojatno nije postojala. U glacijalima je i sjeverni Atlantik bio izvor hladnih dubinskih struja, pa je zato cijeli Atlantik bio hladniji od Pacifika.

¹⁰⁹ H. Sverdrup, M. Johnson i R. Fleming, op. cit., str. 615.

¹¹⁰ G. Manley, Recent Antarctic discoveries and some speculations thereupon. Quart. J. R. Met. Soc. 72, 1946, str. 314.

¹¹¹ J. K. Charlesworth, op. cit., str. 1095.

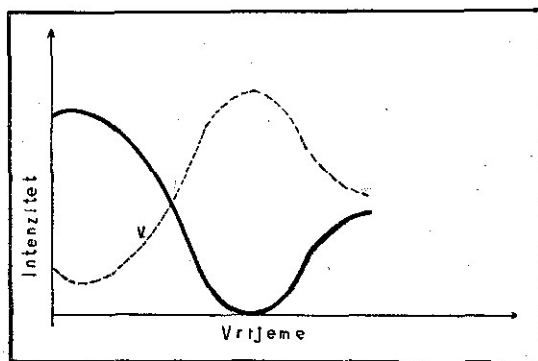
¹¹² G. Deacon, Water circulation and surface boundaries in the oceans, Quart. J. R. Met. Soc. 71, 1945, str. 22.

U Tihom oceanu, za maksimuma glacijala, postojala je karakteristična glacijalna morska cirkulacija. H. W. Menard¹¹³ je ustanovio da su ledeni bregovi koji su nastali na pacifičkoj obali Sjeverne Amerike u posljednjem glacijalu istočnom strujom (tj. istočnim glacijalnim vjetrom) bili nošeni prema Aleutinima. Tako je glacijalna morska cirkulacija na sjevernoj hemisferi postojala samo u Tihom oceanu.

Takva je cirkulacija u interglacijalima bila poremećena. Najznačajniji je prodor Golfske struje u Arktički ocean. Ona je kao izvor goleme količine topline u postglacijalu pridonosila likvidaciji ostataka glacijacije na sjevernoj hemisferi. U početku svakog glacijala, dok je Golfska struja bila topla, ona je kao izvor vlage bitno pridonosila ekspanziji ledenih pokrova na sjevernoj hemisferi.¹¹⁴ Općim zahlađenjem atmosfere i mora, ona nije mogla nadoknaditi gubitak leda koji je nastao ablacijom.

Fluktuacije morske rezine i morske terase. Fluktuacije razine svjetskog mora vanredno su važne za kronologiju glacijacije jer su — univerzalne.

Fluktuiranje razine svjetskog mora u toku glacijacije posljedica je prijelaza golemih masa vode u kruto agregatno stanje. To je led ledenih



Sl. 26. Fluktuacije morske razine kao funkcija volumenskog razvoja (V.) hipotetičkog ledenog pokrova.

Fig. 26. Fluctuations of sealevel are the result of the volume changes of ice sheet

pokrova. Zato je već odavno općenito prihvaćena činjenica da glacijacija uzrokuje posebne, glacioeustatičke fluktuacije morske razine; glacijali odgovaraju niskoj razini mora; obratno: visoka razina mora odgovara interglacijalima. Ovo je u principu tačno. Međutim, kod detaljnijeg promatranja se vidi da je taj mehanizam kompliciraniji nego što bi se to u prvi mah pomislilo. Do toga se mora doći promatranjem relacije volumena leda i površine ledenog pokrova (sl. 26). Naime, vidjeli smo da volumen leda

¹¹³ H. W. Menard, Pleistocene and recent sediment from the floor of the northeastern Pacific Ocean, Bull. Geol. Soc. America 64, 1953, str. 1279.

¹¹⁴ W. Behrmann, Golfstrom und Eiszeit, Peterm. geogr. Mitt. 92, 1948, str. 154.

nije najveći u momentu svog maksimalnog površinskog razvoja; ta dva maksimuma vremenski se ne podudaraju.

Morska razina počne postepeno opadati od onog momenta kad se počne povećavati volumen ledenog pokrova; taj proces se dalje nastavlja i u određenom trenutku (u sredini glacijacije, odnosno glacijala) ledeni pokrov postigne maksimalan volumen, a morska razina padne na najnižu vrijednost. Ledeni pokrov i dalje ekspankira, ali volumen leda počinje opadati (ablacija veća od akumulacije). Djelovanjem ablacije dio vode se vraća u more, pa morska razina počne rasti mnogo prije postizanja maksimalne površine. Zato u momentu maksimalne površine ledenog pokrova morska razina se već digla za izvjesnu vrijednost. Zato se ne može reći da je morska razina najniža u maksimumu glacijacije ili glacijala; ona je najniža prije maksimuma. Ta razlika (u vremenu) bit će najveća kad je i ledeni pokrov najveći, tj. u maksimalnoj fazi glacijacije, a sve manja prema kraju i početku glacijacije.

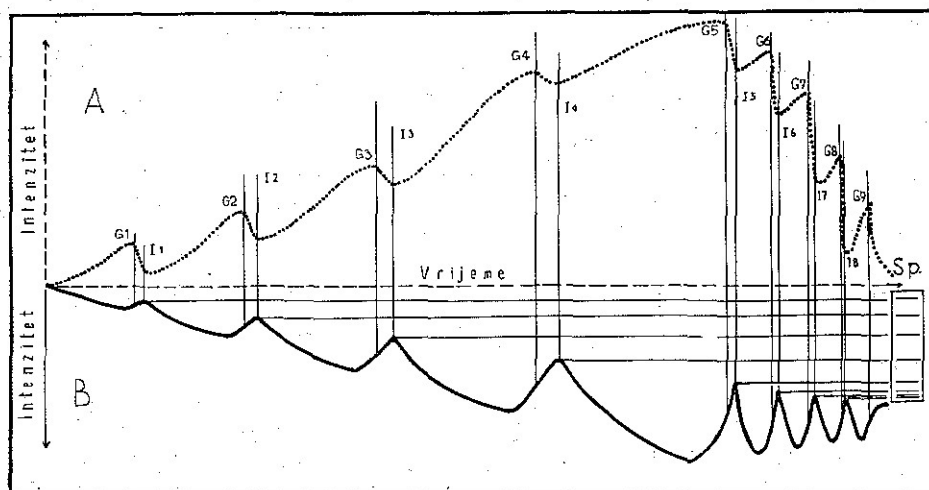
Isto pravilo vrijedi i za visinu morske razine u interglacijalu. Budući da akumulacija snijega (leda) koji će pokrenuti novi glacijal počinje u interglacijalu, najviša razina mora bit će u razdoblju između postglacijala i maksimuma interglacijala, tj. najviša razina mora bit će prije maksimuma interglacijala; u samom maksimumu interglacijala ona će biti već na nešto nižoj razini. I ove razlike bit će veće u maksimumu glacijacije nego prema njenom kraju ili početku.

Fluktacije morske razine uzrokovane pulsiranjem hipotetičkog ledenog pokrova izgledale bi u teoriji ovako: morska razina pada istovremeno s razvojem ledenog pokrova; negdje u sredini prvog glacijala G 1 morska razina će pasti na minimum, a otad će započeti dizanje razine. Budući da najveći dio ledenog pokrova ostaje pošteđen u nastupajućem prvom interglacijalu, morska razina u interglacijalu I 1 bit će niža nego na početku glacijacije. Isti proces ponoviti će se nekoliko puta sve dok ledeni pokrov sredinom glacijacije ne postigne maksimalan volumen; to bi ujedno bila tačka s najnižom razinom. Sve do tog momenta razina u svakom glacijalu i interglacijalu bila bi niža nego u prethodnoj odgovarajućoj fazi. Od ovog trenutka počinje suprotan razvoj; likvidacija ledenog pokrova. Razina će se, uz povremene prekide, tj. uz padove, postepeno dizati, i to u svakom glacijalu i interglacijalu će biti viša nego u odgovarajućoj prethodnoj fazi. Definitivnim nestankom glacijacije morska razina će opet biti na istoj visini kao i na početku glacijacije.

To bi bile fluktuacije morske razine uzrokovane samo pulsiranjem ledenog pokrova. Pokazalo se da su sve orogeneze i epirogeneze bile praćene općim padom razine svjetskom mora (eustatizam). I to treba uzeti u obzir pri razmatranju fluktuiranja morske razine, tj. opisanu krivulju fluktuiranja morske razine uzrokovane pulsiranjem ledenog pokrova (glacio-eustatičke fluktuacije) treba superponirati na krivulju pada morske razine, uzrokovanog eustatičkim pokretima. Tako bi se dobila mnogo kompliciranija, ali realna, krivulja koja pokazuje stvarne fluktuacije morske ra-

zine u toku jedne glacijacije; ta bi krivulja bila realna slika glacioeustatičkih fluktuacija morske razine u toku glacijacije (sl. 27).¹¹⁵

Uzimanjem u obzir eustatičkog pada morske razine vidi se da, usprkos naglom nestajanju ledenog pokrova poslije njegova maksimuma, razina mora i dalje postepeno opada, jer opći pad razine svjetskog mora ne samo da kompenzira spomenuti porast morske razine, do kog dolazi nestajanjem ledenog pokrova; on je čak i veći od njega. Zato bi razina mora u svakom glacijalu i interglacijalu bila nešto niža nego u prethodnoj odgovarajućoj fazi. Isto tako razina mora poslije potpunog nestanka



Sl. 27. Fluktuacije morske razine (B) su posljedica pulsiranja ledenog pokrova (A), tj. posljedica su promjene njegova volumena u smjeni glacijala i interglacijala, te općeg, eustatičkog pada razine uzrokovanog povećanjem volumena oceanskih basena. Sp, »spektar terasa«, tj. »spektar« interglacijalnih visokih razina mora

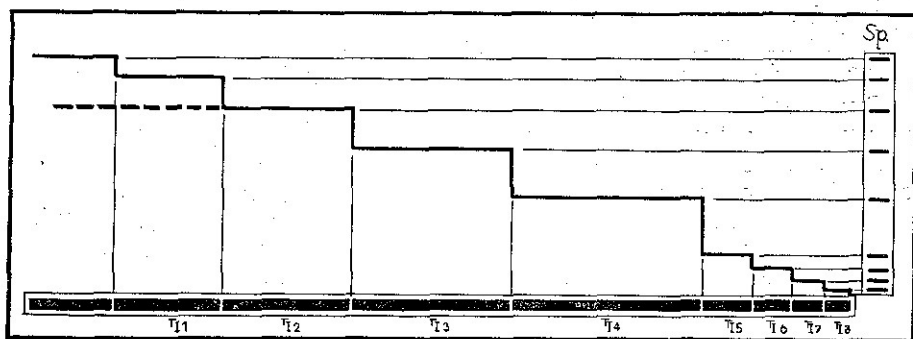
Fig. 27. Fluctuations of sealevel (B) are the effect of the pulsations of the ice sheet (A) and the eustatic drop of sealevel. Sp, Spectrum of interglacial high sea positions, and of interglacial terraces

ledenog pokrova neće biti na istoj visini kao i u početku glacijacije; ona će biti znatno, niža, a veličina tog pada ovisit će o trajanju glacijacije i brzini eustatičkog pada morske razine. Budući da su volumenske promjene ledenog pokrova znatno veće u maksimumu njegova volumenskog razvoja, jasno je da će i fluktuacije morske razine biti intenzivnije (veće razlike u razini između glacijala i interglacijala) u toj etapi, nego na početku i na kraju glacijacije. Teško se može prikazati neko hipotetičko fluktuiranje morske razine, jer ono bitno ovisi o trajanju glacijacije. Ako glacijacija traje vrlo dugo, eustatički pad razine mora poništiti

¹¹⁵ Pod dojmom kvartarnih fluktuacija morske razine i u ovom hipotetskom mehanizmu fluktuiranja morske razine pretpostavlja se da je eustatički pad razine svjetskog mora bio kontinuiran u toku cijelog trajanja glacijacije. Ako eustatički pad razine nije bio jednolik, onda bi cijela krivulja bila mnogo kompliciranija.

će utjecaj glacioeustatičkih fluktuacija. U tom slučaju krivulja glacioeustatičkih fluktuacija morske razine izgledala bi kao slabo valovita krivulja sa vrlo velikim valnim duljinama i malenim amplitudama. Eustatički pad razine, kao konstantan proces potpuno će poništiti utjecaj povećanja volumena svjetskog mora kao posljedice otapanja leda u interglacijalima. Tako će, u slučaju kad glacijacija dugo traje, u dugotrajnoj fazi ekspanzije ledenog pokrova čak i interglacijalne razine biti niže od prethodne razine u maksimumu glacijacije.

Direktna posljedica fluktuiranja morske razine jesu morske terase koje su vrlo važne za kronologiju glacijacije. Njihove dimenzije bit će proporcionalne trajanju glacijala i interglacijala. Budući da je njihovo trajanje vrlo različito, i hipotetički slijed interglacijalnih (a u suštini vrlo slično tome i glacijalnih morskih terasa mora biti u skladu s tim (sl. 28). Tako bi to bilo u u glacijaciji koja traje relativno kratko vrijeme.



Sl. 28. Hipotetički slijed interglacijalnih morskih terasa. Dimenzije su proporcionalne trajanju interglacijala. Sp. spektar interglacijalnih terasa. Ako glacijacija dugo traje, može se dogoditi da će nekoliko starijih terasa biti spojene u jednu terasu vrlo velikih dimenzija (iscrtkani dio)

Fig. 28. Hypothetical spectrum of interglacial sea terraces (Sp.). The dimensions are proportional to the duration of the interglacials. In the case of a long duration of the glaciation several older terraces may form one terrace of enormous dimensions (dashed line)

Glacijacija i opći tok erozije i akumulacije. Utjecaj glacijacije nije ograničen samo na prostor koji je neposredno prekriven ledom. Bitne promjene temperature na moru i na kopnu, vlažnosti zraka, atmosfere i morske cirkulacije, morale su se odraziti i na intenzitetu erozije i akumulacije. Ne može se postavljati pitanje da li glacijacija ubrzava ili usporava geomorfološke procese u krajevima izvan ledenih pokrova. Ispravno je rješenje prostorno i vremensko definiranje, jer glacijacija može bitno usporiti riječnu eroziju u neposrednoj blizini ledenog pokrova, a istovremno je može jako ubrzati u zoni zahvaćenoj pluvijalom. Isto tako i cijeli glacijal i interglacijal ne utječu na taj proces jednako; u nekom kraju u početku glacijala riječna erozija može biti vanredno jaka a posve neznatna u maksimumu, ili vrlo jaka na prijelazu u interglacijal a neznatna u maksimumu interglacijala, itd.

Iz mehanizma pulziranja ledenih pokrova vidjelo se da se trajanje glacijala i interglacijala povećava do sredine i smanjuje od sredine prema kraju glacijacije. Pretpostavi li se da procesi erozije i akumulacije u istim uvjetima teku istom brzinom, onda se može doći do zaključka da će, npr., i sedimenti na morskom dnu biti taloženi u skladu s trajanjem sedimentacije.¹¹⁶ Ako je tako, onda će u svakom glacijalu i interglacijalu debljina sedimenta zapravo biti funkcija trajanja sedimentacije. Vrsta sedimenta je, između ostaloga, ovisna o temperaturi morske vode. Zato će u svim glacijalima biti taloženi sedimenti (i organski svijet karakterističan za hladnu morsku vodu, a u interglacijalima sedimenti (i flora i fauna) karakteristični za toplu vodu. Debljina glacijalnih i interglacijalnih sedimenata povećavat će se do maksimuma, a smanjivat će se prema kraju glacijacije. Debljina će se smanjivati proporcionalno sa skraćanjem trajanja glacijala i interglacijala. Odnos debljine glacijalnih prema interglacijalnim sedimentima nije jednak, jer on ovisi o udaljenosti od ledenog pokrova. Zato će glacijalni sedimenti i relativno i apsolutno biti deblji u blizini ledenog pokrova nego dalje od njega. Interglacijalni sedimenti, obratno, bit će sve deblji, što je veća udaljenost od ledenog pokrova.

Ovo pravilo vrijedi i za sedimentaciju na kopnu: debljina sedimenata bit će u suštini proporcionalna trajanju glacijala i interglacijala. Veličinu akumulacije i erozije teško se može odrediti. To napose vrijedi za kvartar zbog višestruke izmjene erozije i akumulacije. Nekoliko fragmentarnih podataka ne može poslužiti kao osnova za detaljnije razmatranje, ali ipak potvrđuju opću zakonomjernost denudacionog procesa u toku kvartarne glacijacije. Tako je V. P. Baturin (1951)¹¹⁷, studirajući kvartarnu historiju delte Volge, ustanovio da su sedimenti glacijala Baku (Mindel) debeli 57 m, glacijala Hazar (Riss) 46 m i glacijala Hvalinsk (Würm) 11 m.

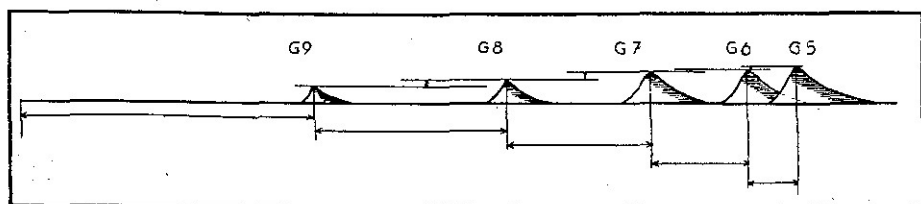
Glacijalna erozija i akumulacija. Da li ledeni pokrov erodira ili zaštićuje podlogu? Zbog vrlo aktivnog toka leda, erozija ledenog pokrova u periodu ekspanzije prilično je jaka, a jača je na periferiji nego ispod centralnog dijela pokrova. Ekspanzijom leda pojas maksimalne erozije pomiče se centrifugalno; u periodu prije maksimuma, u maksimumu i poslije njega, led erodira podlogu samo u rubnoj zoni, dok je najveći dio zbog mirovanja leda pošteđen, odnosno zaštićen od erozije.¹¹⁸ Povlačenjem leda erozija ponovno, po drugi put, napada podlogu koja jedno vrijeme bila zaštićena. Čini se da erozija u jedinici vremena nije bitno različita u toku evolucije ledenog pokrova, pa bi jedan od najvažnijih faktora bilo *trajanja* erozije. U početnim fazama evolucije ledeni je pokrov vrlo aktivan, ali je slab pritisak leda — zbog relativno male debljine. U razvijenim fazama tlak leda na podlogu silno se povećava, ali se zato smanji brzina kretanja ledenog pokrova. Zato bi erozija leda zabravo bila jednaka u toku cijele

¹¹⁶ U ovom slučaju pretpostavlja se da je vrijeme bitan faktor koji utječe na brzinu sedimentacije. Neki procesi mogu biti znatno kompliciraniji, pa će promjene uzrokovane jakim zahlađenjem i smanjenjem padalina u nekim slučajevima u izvjesnoj mjeri nadvladati utjecaj duljine vremena.

¹¹⁷ Cit. u: I. V. Samojlov, Ust'ja rek (njemački prijevod: Die Flussmündungen, Gotha 1956, str. 231).

¹¹⁸ M. Demorest, op. cit., str. 396.

glacijacije, samo bi se mijenjao pojas u kojem ona najaktivnije djeluje. Budući da ledeni pokrov pulsira mnogo sporije u maksimalnoj fazi razvoja nego u periodu ekspanzije i recesije, centralna zona ispod ledenog pokrova bit će kraće vrijeme izložena eroziji nego podloga ispod rubnog pojasa. Analogija ide dalje: jače će biti erodirana podloga, odnosno tu će biti više tragova akumulacije, u području gdje led u pojedinim fazama u toku ekspanzije i recesije privremeno stagnira, nego u područjima između tih zona aktivnosti, jer preko njih led samo »prijeđe«. Zato će i erozioni i akumulacioni oblici biti jače razvijeni u perifernoj zoni nego u centralnom dijelu pokrova, odnosno područja koje je bilo zahvaćeno glacijacijom.



Sl. 29. Recesione morene hipotetičnog kružnog ledenog pokrova. Visina morena i međusobna udaljenost morenskih grebena proporcionalna je trajanju pulsiranja ledenog pokrova

Fig. 29. Recessional moraines of a circular ice sheet. The height and the distance between the moraines are proportional to the duration of the deposition.

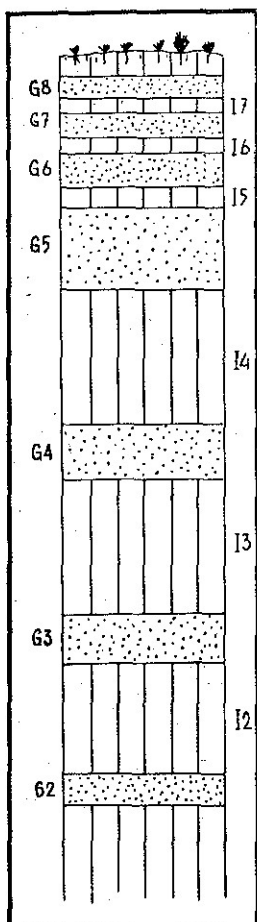
Vrlo je vjerojatno da će ledeni pokrov uništiti najveći dio akumulacionih oblika nastalih u etapi ekspanzije. Očuvat će se samo recesione morene koje su nastale u etapi povlačenja ledenog pokrova (sl. 29). Iz svega što je rečeno o eroziji i akumulaciji ledenog pokrova može se zaključiti da morene neće biti akumulirane bez ikakva reda. Njihova visina smanjivat će se od periferije prema centru; u istom smjeru povećavat će se i međusobna udaljenost između morena. Morene bi, gledane u tlocrtu, u idealnom slučaju bile poredane u koncentričnim kružnicama; same morene koje su taložili ledeni jezici ne bi bile dio periferije tih krugova, nego bi imale radijus oboda ledenog jezika, tj. imale bi mnogo sferičniji obod, mnogo manji polumjer zakrivljenosti.

Sedimentiranje lesa. Eolsko podrijetlo lesa definitivno je dokazano. Budući da se istočni vjetar javlja tek u razvijenijim fazama ekspanzije ledenog pokrova, kad glacijalna anticiklona postane dominantan faktor u glacijalnoj atmosferskoj cirkulaciji, les će se taložiti samo u tom periodu.

Les se taloži podjednakom pravalnošću kao i ostali glacijalni sedimenti; vrijeme, tj. trajanje sedimentacije, bit će jedan od glavnih faktora koji će odrediti debljinu nataloženog lesa. Aridizacija klime može u određenoj mjeri utjecati na brzinu sedimentacije, jer će u povoljnim uvjetima čak i u kraćem vremenskom razdoblju biti nataloženo više lesa nego u klimatski nepovoljnijem duljem razdoblju. Oko hipotetičkog ledenog pokrova kružnog oblika — jedan dio kopna nije pokriven ledom ni u mak-

simalnoj fazi glacijacije, pa će se tu taložiti les — les bi se taložio po slijedećoj shemi (sl. 30): debljina lesa i humusnih zona kao cjeline, tj. cijele eolske serije, opadati će od ruba ledenog pokrova prema ekvatoru. To bi bilo opće pravilo. Stratigrafija lesa je, zbog radijalnih promjena

ledenog pokrova, mnogo kompleksnija. U stanovitoj, već nešto razvijenoj fazi ekspanzije ledenog pokrova (G 2) počinje sedimentiranje lesa. Budući da je istočni vjetar još slab a temperature još nisu dovoljno niske, prvi horizont lesa će se taložiti samo u lokalitetima bliže ledenom pokrovu. U slijedećem interglacijalu I 2 na lesu će se razviti tlo, i to deblje u lokalitetima dalje od ledenog pokrova nego u lokalitetima bliže njemu. U slijedećem glacijalu u G 3 uvjeti za deflaciju mnogo su povoljniji; ledeni pokrov vrlo polagano pulsira, klima je već aridna, pa taloženje lesa postaje sve intenzivnije. Novi les G 3 deblji je nego u prethodnom glacijalu. Istodobno istočni vjetar je postao dovoljno jak, pa će se prvi sloj lesa početi taložiti i u lokalitetima podalje od ledenog pokrova. Povlačenjem ledenog pokrova u narednom interglacijalu I 3 prestat će taloženje lesa i na njemu će se razviti tlo. Isti taj proces ponovit će se nekoliko puta, sve dok se ledeni pokrov ne smanji na minimum potreban za razvoj glacijalne anticiklone. Cijela serija lesnih horizonata i humusnih zona nije jednoliko taložena; debljina pojedinih horizonata nije jednaka. Ona je znatnim



Sl. 30. Shematski profil lesnih horizonata i fosilnih tala. Uzeta je u obzir činjenica da uvjeti za taloženje lesa nisu bili najpovoljniji u početku glacijacije (glacijala), pa je debljina nataloženih slojeva lesa nešto manja nego bi to odgovaralo samo trajanju sedimentiranja

Fig. 30. Schematic profile of fossil soils and loess deposited during the glaciation

dijelom proporcionalna trajanju glacijala i interglacijala te klimatskim uvjetima sedimentiranja; djelovanjem ovih dvaju faktora debljina lesnih horizonata i humusnih zona povećavat će se od početka prema maksimumu glacijacije, a smanjivat će se od maksimuma prema kraju glacijacije.

Poseban mehanizam pulsiranja kvartarnih ledenih pokrova na sjevernoj hemisferi odrazio se i na ritmu sedimentiranja lesa. Les je stijena koja se vrlo lako razara, pa do danas nije otkriven lesni profil koji bi sadržavao lesne slojeve svih glacijala. Zato do danas ne postoji jasna slika kakav je bio mehanizam sedimentiranja kvartarnog lesa. Usprkos

tome, postoje izvjesni elementi po kojima bi se moglo zaključiti da je naša opća shema taloženja lesa u suštini tačna, samo treba stalno imati na umu činjenicu o strukturi glacijacije na sjevernoj hemisferi. Iz dosad poznatih primjera (napose lesni profil iz Ebersbrunnua u Austriji^{119, 120} jasno se vidi da je riski les znatno deblji od würmskog lesa — svi lesni horizonti koji pripadaju jednom glacijalu uzeti su zajedno — a mindelski les bi imao biti deblji od riskog i würmskog. U skladu s našim shvatanjem mehanizma pulsiranja pojedinih glacijala na sjevernoj hemisferi, moglo bi se postaviti pravilo da debljina lesnih horizonata taloženih u toku svakog pojedinog glacijala (Mindel, Riss, Würm) opada od maksimuma prema kraju glacijala. Ovo se teško može definitivno potvrditi; u svakom je profilu odnos debljine pojedinih horizonata različit, jer su se uvjeti za sedimentaciju mijenjali u raznim stadijalima. Ipak bi se iz shematskog toka Würma u srednjoj Evropi (v. sl. 19) moglo zaključiti da je gornji izvod u biti ispravan. Ista shema, dakle, može se primijeniti za utvrđivanje odnosa debljine lesnih horizonata u svakom glacijalu posebno i za utvrđivanje ukupne debljine lesa u svakom glacijalu u odnosu na debljinu lesa (svi horizonti uzeto zajedno) ostalih glacijala.

Osciliranje snježne granice i visina morena. Osciliranje snježne granice u toku glacijacije nije jednostavno, ali je ipak pravilno. Najjasnija slika tih oscilacija ne bi se dobila na samom ledenom pokrovu nego na izvjesnoj udaljenosti od njega, najbolje na nekoj dovoljno visokoj planini, gdje će planinska glacijacija biti određena pulsiranjem ledenog pokrova.

Ekspanzijom hipotetičkog ledenog pokrova snježna granica će biti sve niža — time će u planinama i visina morena svakog glacijala bit sve manja — pa će maksimalna depresija snježne granice biti u fazi maksimalnog površinskog razvoja ledenog pokrova. Povlačenjem ledenog pokrova u prvom interglacijalu snježna granica će se dići na stanovitu visinu, a opet će se spustiti u slijedećem glacijalu. Snježna granica neće se spustiti na razinu snježne granice iz maksimalnog glacijala, jer ni ledeni pokrov u tom glacijalu neće postići istu površinu. Zato će krajnja morena u prvom postmaksimalnom glacijalu biti viša od krajnje morene u maksimalnom glacijalu. To će se ponoviti onoliko puta koliko bude glacijala u toku recesije glacijacije.

U skladu s predloženim mehanizmom pulsiranja ledenih pokrova moglo bi se postaviti pravilo: *razlika u visini, tj. depresija, snježne granice između sukcesivnih glacijala bit će sve manja što se više bliži kraj glacijacije, odnosno bit će sve veća od početka glacijacije prema fazi maksimalnog površinskog razvoja ledenog štita.*

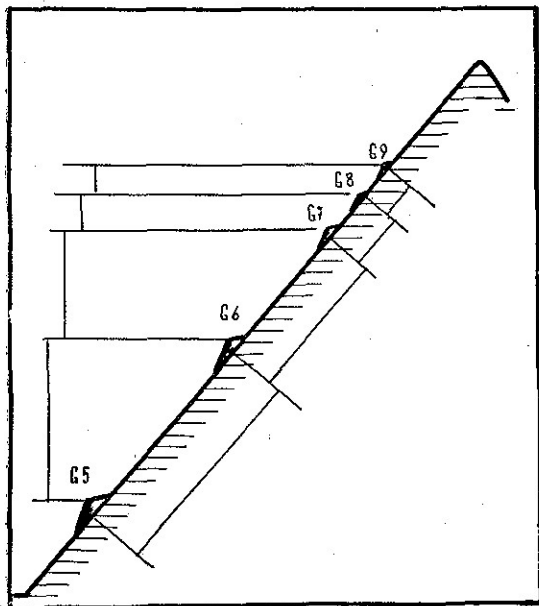
Visina snježne granice u interglacijalima nije toliko važna kao u glacijalima. I za njih bi vrijedilo spomenuto pravilo, pa će visina snježne granice u maksimumima interglacijala biti sve viša, što se više bliži kraj glacijacije; i razlike u visini snježne granice između maksimuma sukce-

¹¹⁹ J. Fink i H. Majdan, Zum Gliederung der pleistozänen Terrassen des Wiener Raumes. Jahrb. der geol. B.—A., Wien 1954, B. 97, H. 2, str. 211.

¹²⁰ L. Piffel, Die Exkursion von Krems bis Absberg, Beiträge zur Pleistozänforschung in Oesterreich, Wien 1955, str. 70.

sivnih interglacijala bit će sve manja prema kraju glacijacije (isto kao i za glacijale).

Isto pravilo vrijedilo bi i za prostorni razmještaj morena deponiranih u maksimumima glacijala (uz pretpostavku da su se sve očuvale). Njihov razmještaj i veličina (tj. volumen deponiranog materijala) bio bi u skladu s ovim pravilom: čeonu morena maksimalnog glacijala (G 5) bila bi najniža (po apsolutnoj visini) i najrazvijenija (tj. najveća); što su čeonu morene mlađe, to su više (visinski) i slabije razvijene (sl. 31). I razlika u



Sl. 31. Razmještaj morena koje taloži planinski ledenjak od maksimuma (G 5) do prestanka glacijacije (glacijala). Takav bi u suštini bio i mehanizam pulsiranja snježne granice

Fig. 31. Spatial distribution of the moraines deposited by the mountain glaciation during the recessional phase of the glaciation. The height of the snow line changes in the same manner

visini između dviju sukcesivnih čeonih morena bila bi sve manja. Morene starijih faza, faza nastupa ledenog pokriva, sigurno će biti uništene; u idealnom slučaju slijed morena ekspanzionih faza bio bi isti kao u fazama recesije (G 9 = G 1; G 8 = G 2.; i ovdje bi se moglo govoriti o spektru, »spektru morena«).

Nešto slično, ali u jako smanjenim dimenzijama, dogodit će se u svakom glacijalu. U svakom stadijalu depresija snježne granice bit će sve veća počevši od početka ekspanzije ledenjaka do maksimuma tog glacijala. I spuštanje snježne granice između dva stadijala bit će sve veće prema maksimumu. Isto tako i visina snježne granice u stadijalima poslije maksimuma glacijala bit će sve veća, a razlika u visini između dva sukcesivna stadijala bit će sve manja, što se bliži kraju glacijacije.

Osim za posljednji glacijal, gotovo ništa nije poznato o depresiji snježne granice u toku kvartarne glacijacije, tj. o depresiji snježne granice u maksimumima pojedinih glacijala; to vrijedi i za najbolje proučene krajeve sjeverne hemisfere. Izvjesni podaci, koliko je poznato, po-

stoje samo za Himalaju. Klima južne Azije, a time i Himalaje, bitno ovisi o ritmu monsuna. Budući da je geneza ljetnog monsuna najuže povezana s atmosferskom cirkulacijom na južnoj hemisferi, glacijacija Himalaje će nositi tragove tako zamršenog mehanizma. H. de Terra i H. L. Movius (1943)¹²¹ navode da je depresija snježne granice u Himalaji iznosila 1600 m u prvom, 1500 m u drugom, 1400—1500 m u trećem i 900—1000 m u četvrtom glacijalu.

U Pir Panjalu, između Baramula i planinskog prolaza Banihal,¹²² očuvane su terminalne morene četiriju glacijala:¹²³ IV glacijal visina krajnje morene 3650 m; III glacijal 2130 m; II glacijal 1830 m; I glacijal 1580 m.¹²⁴

U oba slučaja vidi se da je depresija snježne granice bila najveća, tj. visina krajnjih morena bila je najmanja u najstarijem utvrđenom glacijalu, a opadala je u mlađim glacijalima. To pokazuje da su uvjeti za postanak i razvoj ledenjaka na Himalaji bili najpovoljniji u najstarijem konstatiranom glacijalu, a najnepovoljniji u posljednjem, najmlađem glacijalu. Ako se na ovo gleda iz šireg aspekta, onda navedeni podaci pokazuju da su se uvjeti za razvoj glacijacije pogoršavali od najstarijeg konstatiranog glacijala prema najmlađim glacijalu.

Ovaj zaključak nije u kontradikciji s činjenicom da kvartarnu glacijaciju karakterizira opći postepeni pad temperature. Ako temperatura opada, to znači da se snježna granica mora spuštati a ne dizati u svakom mlađem glacijalu. Treba naglasiti već iznijetu činjenicu da je, uz opći pad temperature, nastupila i aridizacija klime. U ovakvom slučaju svako daljnje zahlađenje samo negativno djeluje na evoluciju glacijacije. To je karakteristika postmaksimalnog razvoja kvartarne glacijacije. Iz režima svih ledenih pokrova vidi se da je akumulacija najveća u početku i sve do sredine glacijacije (na Antarktici), odnosno u početku glacijala (na sjevernoj hemisferi), a sav kasniji razvoj događa se u sredini koja nije više povoljna za ekspanziju ledenih pokrova. Zato bi opći pad temperature od Donaua dalje bio samo »obol« općem pogoršanju uvjeta za razvoj ledenih pokrova i planinskih ledenjaka, koji su u Himalaji, od četiri slučaja, bili najpovoljniji u najstarijem konstatiranom glacijalu. Od prvog konstatiranog glacijala nadalje (možda i prije, ali o tome nema tragova) počinju se održavati negativne posljedice postojanja lednih pokrova, jer je u tom momentu prijedena donja granica optimuma. Ako još tome dodamo činjenicu da je u starijim glacijalima Indijski ocean — sudeći prema poznatim rezultatima iz Tihog oceana — vjerojatno bio nešto topliji nego u mlađim glacijalima i da su stariji glacijali trajali dulje od mlađih — misli se samo na četiri spomenuta glacijala — onda smo spomenuli sve glavne faktore, koji su odredili spomenuti razvoj himalajske glacijacije. Zato je himalajska, kao i sve druge planinske glacijacije, morala biti intenzivnija u starijem glacijalu koji je bio nešto topliji, vlažniji i dugotrajniji, nego u mlađem glacijalu koji je bio hladniji, suši i kratkotrajniji.

¹²¹ Cit. u: J. K. Charlesworth, op. cit., str. 652.

¹²² D. N. Wadia, Geology of India, London 1953, str. 383.

¹²³ Ovdje se zacijelo u prvom slučaju glacijali broje od najstarijeg prema najmlađem, a u drugom slučaju obratno: od najmlađeg prema najstarijem glacijalu.

¹²⁴ Visina morena dobivena je preračunavanjem stopa u metre.

Kao i u dosadašnjim slučajevima, glacijal Würm ćemo shvatiti kao kompletnu glacijaciju, pa se tako mogu pratiti oscilacije snježne granice u jednom relativno kratkom periodu; to je primjer kako je oscilirala snježna granica u svakom predwürmskom glacijalu. Oscilacije snježne granice i visine morena mogu se pratiti samo od maksimumu Würma nadalje, jer su raniji tragovi uništeni. Snježna granica se povlačila u interstadijalima, a spuštala se u stadijalima upravo tako su deponirane i čeone morene planinskih ledenjaka.

Depresija snježne granice u Alpama i visinska razlika između sukcesivnih saza iznosila je (W. Senarclens - Grancy 1932)^{125, 126}:

Današnja visina	O m	Razlika
		75
1820—1850	50—100	75
Fernau	100—200	150
Egesen	300	150
Daun	400—500	200
Gschnitz	600—700	200
Schlern	800—900	300
Bühl	1100—1200	

Slično tome, depresija snježne granice (u m) prema današnjem stanju iznosila je u centralnom Kavkazu¹²⁷:

Stadijali	Depresija snježne granice	Razlika
XVII—XIX st.	52—90	15
Historijski	50—120	120
5. stadijal	140—270	155
4. „	320—400	215
3. „	500—650	225
2. „	oko 800	100
1. „	oko 900	250
Maks. Würma	1100—1200	

¹²⁵ Cit. u: O. Maull, Handbuch der Geomorphologie, Wien 1958, str. 366.

¹²⁶ Srednja depresija snježne granice uzeta je jednostavno kao aritmetička sredina od navedenih vrijednosti, što u većini slučajeva nije posve tačno.

¹²⁷ A. V. Šnitnikov, Izmenčivost' gornogo oledenjenja Evrazii v pozdne- i poslednikovoju epohu i absoljutnaja hronologija, Izv. Vsesoj. geograf. obšč. 85, 1953, str. 559.

Depresija snježne granice u skupini Taht i — Sulaiman u Elbursu¹²⁸ iznosila je: 700, 450—500, 300, 250, 170, 100 i 50 m, tj. razlika između sukcesivnih visina snježne granice iznosi: 250—200, 150—200, 50, 80, 70 i 50 m.

Kako se vidi, visinska razlika između dviju sukcesivnih depresija snježne granice u najvećem broju slučajeva pravilno se smanjivala od maksimuma Würma prema kraju kvartara. Ima i nekoliko izuzetaka; to, međutim, nije teškoća jer: prvo, treba imati na umu činjenicu da je nestankom ledenih pokrova nestao najvažniji faktor koji je regulirao pulsacije u posljednjem glacijalu; drugo, čini se da koji put istraživači nisu načistu pri odvajanju oscilacija višeg i nižeg reda, koje lokalni geografski faktori mogu prilično poremetiti. Usprkos tome, navedeni primjeri pokazuju da se snježna granica od maksimuma glacijala pa sve do posljednje depresije u XVII—XIX st. pravilno povlačila i da je amplituda oscilacija snježne granice bila sve manja idući prema današnjem stanju. To je u potpunom skladu s našom shemom (sl. 31).

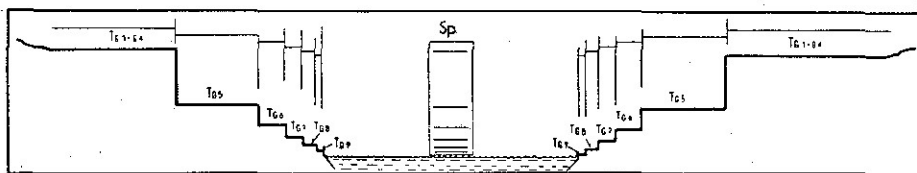
Visina morena u suštini je oscilirala kao i snježna granica, ali je pravilnost u mnogim slučajevima prilično poremećena. To je shvatljivo kad se pozna priroda mehanizma koji je taložio krajnje morene. Usprkos tome može se tvrditi da se visina krajnjih morena povećava od maksimuma Würma prema današnjem stanju, a međusobna udaljenost između dvije sukcesivne krajnje morene u istom se smjeru pravilno smanjuje.

Jezerske terase. Budući da su pluvijali sinhroni s glacijalima, jezerske terase mogu biti baza za kronologiju glacijacije. Postoje izvjesna ograničenja, odnosno uvjeti da bi se jezero moglo koristiti. Prvi je uvjet geografski položaj jezera. Ono mora biti južnije (na sjevernoj hemisferi), od umjerenog pojasa, tj. mora biti podalje od ruba ledenog pokrova čak i u maksimalnoj fazi njegova razvoja. Drugi je uvjet lokalni: okolica jezera ne smije biti previše ravna, jer bi se povećanje volumena vode moglo poništiti odgovarajućim povećanjem površine jezera, pa bi se čak i znatne klimatske promjene jedva odrazile na terasama. Jezero mora biti hidrografski izolirano od susjednih basena, jer se »pretakanjem« vode razina jezera ne bi povećala usprkos apsolutnom povećanju padalina, odnosno povećanju pritjecanja vode.

Razina jezera (sl. 32) oscilirat će sinhrono s porastom ili opadanjem padalina u glacijalu (pluvijalu). Pojavom ledenog pokrova započet će pluvijal, tj. razina jezera će se početi dizati, a bit će sve viša u svakom narednom pluvijalu. Budući da je količina padalina najveća u početku glacijacije, odnosno glacijala, najviša razina jezera bit će u srednjim fazama ekspanzije ledenog pokrova — maksimum će biti u glacijalu G 4 — odnosno znatno prije njegova maksimalnog površinskog razvoja. Jačom ekspanzijom ledenog pokrova količina padalina počinje opadati, pa istovremeno i razina jezera počinje opadati. Tako će u fazi maksimalnog površinskog razvoja ledenog pokrova, tj. u maksimumu glacijacije, razina jezera biti već prilično niska, a povlačenjem ledenog pokrova i dalje će

¹²⁸ H. Bobek, Die Rolle der Eiszeit in Nordwestiran, Z. Gletscherkunde 25, 1937, str. 130.

opadati. Dodamo li tome činjenicu da je trajanje glacijala i interglacijala vrlo različito, onda iz toga slijedi zaključak da će se terase najstarijih pluvijala (obilje padalina, dugo trajanje) u stvari vjerojatno spojiti u jednu terasu vrlo velikih dimenzija. Od sredine glacijacije količina padalina se smanjuje, pa će razina u maksimumu površinskog razvoja glacijacije (glacijala) biti nešto niža; zato će i terasa koja će biti abradirana u maksimalnom glacijalu (T_{G5}) biti manja i niža od prve terase. Isto se tako mora doći do zaključka da će sve mlađe terase biti sve niže, odnosno sve slabije razvijene (uže). Zato — u skladu s činjenicom da su stariji glacijali dulje trajali od mlađih i da su volumenske promjene vode u jezeru bile veće u prvom nego u drugoj polovici glacijacije — pravilo o super-



Sl. 32. Shema jezerskih terasa abradiranih u toku hipotetičke glacijacije; svaka faza odgovara stanovitom stupnju u evoluciji pluvijacije. Sp., spektral jezerskih terasa

Fig. 32. Lake terraces abraded during the glaciation, i. e. pluviation. Sp., spectrum of lake terraces

poziciji jezerskih terasa glasi: *visinska razlika između terasa, kao i njihove horizontalne dimenzije, smanjivat će se od najviše prema najnižoj terasi.* (Može se govoriti o spektru jezerskih terasa.) Bitno je naglasiti da najviša i najrazvijenija terasa nije abradirana u maksimumu površinskog razvoja glacijacije, isto kao što nije abradirana ni u prvom pluvijalu. To je važan »praktični« zaključak za kronologiju glacijacije, jer bi se učinila velika greška kad bi se paraleliziralo maksimum glacijacije s najvišom terasom.

Po istom pravilu, terase će biti abradirane u svakom posebnom glacijalu, samo će dimenzije biti proporcionalno smanjene.¹²⁹

Riječne terase. Problem riječne erozije i akumulacije, odnosno problem postanka riječnih terasa, jedan je od najzamršenijih problema kvartarne glacijacije. To je posve razumljivo s obzirom na prirodu ovih procesa. Rijeke često teku kroz krajeve s različitim geološkom i morfološkom historijom, kroz krajeve s različitim tektonskom strukturom (izvorišni dio, npr., može se dizati, a ušće tonuti, ili obratno; postoje velike mogućnosti kombinacija), sastav podloge stalno se mijenja; isto tako je i klima u raznim dijelovima toka različita, a u relativno kratkom periodu je promjenljiva (napose, ako je rijeka natprosječna duga). Eroziiju i akumulaciju komplicirat će eustatički pad razine mora i glacioeustatičke fluktuacije morske razine, koje se mogu odraziti i vrlo daleko od ušća. U području

¹²⁹ Rezultat detaljnih istraživanja u Sjevernoj Americi koji potvrđuju opisanu shemu v. str. 83.

neposredno zahvaćenom glacijacijom i glacioizostatički pokreti pridonijet će daljnjem kompliciranju procesa. Posljedica svega toga bit će kompleksnost riječnih dolina. Glacijacija je proces tako kolosalnih dimenzija da su svi ostali faktori potisnuti neposrednim utjecajem klimatskih promjena, uzrokovanih pulsiranjem ledenih pokrova. Zato su riječne terase u suštini klimatske.

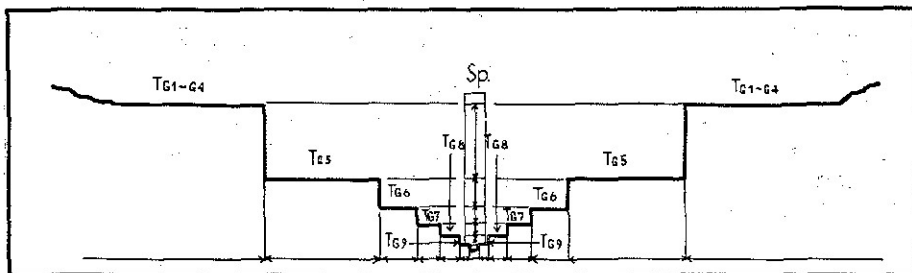
Problem riječne erozije i akumulacije u početku se postavljao jednostavno. Pretpostavljalo se da je u umjerenom pojasu sjeverne hemisfere materijal bio akumuliran u glacijalima, dok su se u interglacijalima rijeke usijecale u taj isti materijal (W. M. Davis 1903; W. Soergel 1919; A. Penck 1936; J. Lobeck 1939). Ti bi procesi bili najintenzivniji u maksimumu glacijala, odnosno interglacijala. Kasnija su istraživanja pokazala da je cijeli proces mnogo kompliciraniji od te sheme. Za fluvijalnu eroziju i akumulaciju umjerenog pojasa nisu bitni klimatski uvjeti u maksimumima glacijala. Važna je klima između tih ekstremnih faza, pa bi se najveći dio materijala taložio na prijelazu interglacijala u glacijal, a najveći dio erozije bio bi ograničen na prijelaz iz glacijala u interglacijal (H. Udluft 1934, V. Ambroz 1947). L. Trevisan (1949) je prvu fazu nazvao anaglacijal, drugu kataglacijal. A. Jahn¹³⁰,¹³¹ je produbio tu shemu i tačnije odredio vrijeme tih faza kombiniranjem krivulja temperatura i padalina uzimajući u obzir vegetacijski pokrov u maksimumu interglacijala i zaleđenost u maksimumu glacijala, koji su sveli geomorfološke procese na minimum. Prijelaz interglacijala u glacijal nije bio period kontinuirane sedimentacije. Prva faza je faza »tople« interglacijalne sedimentacije. Poslije nje dolazi period anaglacijalne erozije, a iza nje opet faza sedimentacije, ali ovog puta to je »hladna« glacijalna sedimentacija. Na prijelazu iz glacijala u interglacijal redosljed bi bio obrnut: najprije »hladna« glacijalna sedimentacija, zatim kataglacijalna erozija, pa »topla« interglacijalna sedimentacija. Dakle, dvije erozivne faze odvajaju dvije akumulacione faze, »hladnu« i »toplu«. Ovi su procesi strogo određeni relacijom temperature i padalina, čiji je tok A. Jahn prikazao — sinusoidom.

Još jedan korak bliže stvarnosti bit će ako fluvijalnu eroziju i akumulaciju shvatimo kao posljedicu odnosa temperature i padalina zamišljajući pri tom da njihov tok nije bio sinusoida, jer ni generalizirana krivulja glacijacije nije sinusoida (sl. 12). Generalizirana krivulja glacijacije realna je krivulja i svaka njena tačka ujedno upućuje na stanoviti odnos temperature i padalina, a fluvijalna erozija i akumulacija su upravo određene tim odnosom. Bez obzira na to da li je fluvijalna akumulacija i erozija tekla prema Trevisanovoj ili Jahnovoj ili bilo kojoj drugoj shemi, u svakom glacijalu i interglacijalu nalaze se određene tačke kad će početi ili prestati erozija, odnosno akumulacija. Položaj tih tačaka tačno je određen u relaciji prema trajanju cijelog glacijala i interglacijala. To znači: da bi se povećala ili snizila temperatura za 1° C, proći će mnogo više vremena u maksimalnoj fazi glacijacije nego u njenom početku ili pri kraju. Ili

¹³⁰ A. Jahn, The action of rivers during the Glacial Epoch and the stratigraphic significance of fossil erosion surfaces in Quaternary deposits, *Przeglad geograficzny* 28, 1956, str. 101.

¹³¹ A. Jahn, *Wyzyna Lubelska, rzeźba i czwartorzęd*, Warszawa 1956.

još konkretnije: svaki prijelaz iz interglacijala u glacijal u maksimalnoj fazi glacijacije dulje će trajati nego na njenom kraju ili njenom početku. Isto tako svaki prijelaz glacijala u interglacijal trajat će dulje u maksimumu glacijacije nego pri kraju ili početku glacijacije. To bi vrijedilo i za Jahnova razdoblja erozije između dvije faze akumulacije; i ta će razdoblja biti dulja u maksimalnoj fazi glacijacije nego na njenom kraju ili početku. I konačno: trajanje maksimuma glacijala i interglacijala skraćuje se od maksimalnog glacijala prema kraju i početku glacijacije. To je posljedica već poznatog mehanizma pulsiranja ledenog pokriva, pa će svi procesi, uzrokovani glacijacijom, dulje trajati u maksimalnoj fazi nego u početku ili pri kraju glacijacije. Upravo zbog te razlike u trajanju svih glacijalnih procesa, opisane faze akumulacije i erozije neće jednako dugo trajati. Iz toga slijedi da će svaka faza erozije i akumulacije biti dulja u naponu glacijacije nego na njenom kraju ili početku. Ovo se mora odraziti na morfologiju riječnih dolina, pa bi razlika u visini i širini



Sl. 33. Shema slijeda rječnih terasa. Dimenzije su u proporciji s trajanjem glacijala i interglacijala. Sp., spektar riječnih terasa

Fig. 33. Schematic representation of river terraces eroded (or deposited) during the glaciation. Dimensions of the terraces are proportional to the duration of glacial and interglacial phases. Sp., spectrum of river terraces

rječnih terasa imala da bude sve manja od maksimalne faze glacijacije prema njenom kraju i početku, odnosno volumen erodiranog i akumuliranog materijala imao bi se smanjivati od maksimuma glacijacije prema njenom kraju i početku. Ovi se izvodi osnivaju na pretpostavci da su erozija i akumulacija morali biti jednako intenzivni u sličnim uvjetima: volumen erodiranog i akumuliranog materijala te dimenzije riječnih terasa u neposrednoj su vezi s trajanjem fluvijalne erozije i akumulacije.

Tako bi bilo samo u slučaju kad ne bi postojala vremenska razlika u površinskom razvoju ledenog pokriva i hoda padalina. Međutim, ta razlika postoji i ona će bitno utjecati na morfologiju riječnih terasa. Ovdje ćemo morati ponoviti isto što smo rekli za jezerske terase. Naime, glacijali i interglacijali u etapi ekspanzije glacijacije bili su mnogo dulji od odgovarajućih faza u toku recesije. Doda li se tome činjenica da je količina padalina u prvoj polovini glacijacije bila vrlo velika, onda će se morati poremetiti hipotetički slijed starijih terasa. Erozija i akumulacija su u starijim glacijalima i interglacijalima, zbog obilja padalina, bile vrlo intenzivne; osim toga, ti su procesi bili dugotrajni.

Dakle, mehanizam je riječne erozije i akumulacije prilično kompliciran; zato ćemo shematski prikazati samo krajnji rezultat — slijed riječnih terasa. Ovdje vrijedi isto ono što je rečeno za jezerske terase; predglacijalna riječna dolina mora imati povoljne dimenzije, tj. strane doline ne smiju biti previše blago nagute. Zato se pretpostavlja »normalno« profilirana riječna dolina (sl. 33). I u ovom slučaju stvarno će se dogoditi isto kao i s ostalim oblicima stvorenima glacijacijom. Naime, vrlo je vjerojatno da će se starije, relativno kraće, faze spojiti, pa će najstarija terasa ($T_{G_{1-G_4}}$) imati vrlo velike dimenzije, a sve mlađe terase — među njima i terasa T_{G_5} koja odgovara maksimalnom glacijalu — bit će manje od nje. Isto to pravilo vrijedit će i za volumen materijala, koji je erodiran ili akumuliran u odgovarajućim fazama. U idealnom slučaju, pravilo o superpoziciji riječnih terasa glasi *visinska razlika između riječnih terasa mora biti sve veća počevši od korita današnje rijeke prema najvišoj (najstarijoj) terasi; isto tako i širina terasa, kao i debljina materijala, mora se povećavati u istom smjeru.*

Pulsacije nižeg reda, stadijali i interstadijali, malo će utjecati na formiranje riječnih terasa; očuvat će se vjerojatno samo tragovi iz posljednjeg glacijala. Riječne terase, odnosno erozija i akumulacija, bit će po mehanizmu slični kao u glacijalima i interglacijalima, samo s proporcionalno smanjenim dimenzijama. I u ovom slučaju razlika u visini terasa bit će sve manja počevši od najstarije, tj. najviše, terase prema najnižoj (najmlađoj) terasi. U istom smjeru smanjivat će se i širina terasa.

Na formiranje riječnih terasa utječu tri glavna faktora: klima, tektonika, eustatičke i glacioeustatičke fluktuacije morske razine; oni zajednički, ili pojedinačno, određuju tok razvoja riječne doline. Na kompleksnost kvartarnih riječnih terasa utjecao je i poremećaj slijeda glacijala u toku tzv. velikog interglacijala koji je mnogo dulje trajao od ostalih interglacijala, te ritmičnost u pulsiranju ledenih pokrova, pa glacijalni procesi nisu bili kontinuirani. Zato se nekim glacijalima pripisuje više od jedne terase. Jedna od glavnih teškoća jest ta da su zemlje, gdje je istraživanje posljedica kvartarne glacijacije najdalje dospjelo, bile uglavnom nepovoljne za pravilniji razvoj riječnih terasa. Tako je dolina Rajne jako tektonski-poremećena; Temza, Sena i mnoge druge zapadnoevropske rijeke bile su pod prevelikim neposrednim utjecajem glacioeustatičkih fluktuacija, a mnoge rijeke SSSR-a i SAD često su bile preblizu ledenom pokrovu. Zato ima malo riječnih dolina gdje se mogu pratiti klimatske promjene i iz njih izvesti neki zaključci o općem toku kvartara. Postoje brojni numerički podaci o visini terasa, ali podaci o starosti terasa vrlo su rijetki.

Vjerojatno su najbolje proučene terase Dunava. One su pretežno klimatske, iako su nešto poremećene tektonskim pokretima.^{132, 133} U širem području Beča konstatiran je niz riječnih terasa,¹³⁴ a sve su nastale u gla-

¹³² M. Pécsi, Parallelisierung der Donauterrassen in Ungarn und der Terrassen in der Umgebung Wiens und des Eisernen Tores, Földrajzi Közlemenyek 81, 1957, str. 282.

¹³³ J. Fink i H. Majdan, op. cit., str. 241.

¹³⁴ H. Küpper, Ausblick auf das Pleistozän des Raumes von Wien, Beiträge zur pleistozänforschung in Österreich, Wien 1955, str. 136.

cijalima. Evo naziva i visina terasa iznad današnje razine Dunava i njihove kronologije:

Laarberger-Terasse	90—95 m	Günz
Wienerberg-T	60—65	Mindel I
Arsenal-T.	45—50	Mindel II
Höhere-T.	25—30	Riss I
Simmeringer-T.	17	Riss II
Gänserdorfer-T.	10	pre-Würm, stariji Würm
Prater-T.	4	Würm
Razina Dunava	0	

Za nas je važan samo kompletan morfološki ciklus u jednom glacijalu, bez obzira na stadijale. Naime, uzet ćemo da svakom glacijalu pripada jedna jedinstvena terasa koja bi nastala »spajanjem« dviju stadijalnih terasa. U tom slučaju visina terase bila bi slijedeća: 90—95, 45—65, 17—30, 4—10 m. Da bi visine bile još tačnije određene, uzet ćemo aritmetičke sredine visina terasa.¹³⁵ Aritmetičke sredine visina terasa iznosila bi: Günz 92,5, Mindel 55, Riss 23,5 i Würm 7 m. Jednostavnim odbijanjem iz ovoga vidi se da razlika u visini između današnje razine Dunava i srednje visine wirmske terase iznosi 7 m, između srednje wirmske i srednje visine riske terase 16,5 m, između srednje riske i srednje visine mindelske terase 31,5 m i srednje mindelske i srednje visinske ginoke terase iznosi 37,5 m. Poredamo li te visine 7, 16,5, 31,5 i 37,5 m, onda vidimo da se visina terasa između dvaju sukcesivnih glacijala povećava od Würma prema Günzu, što odgovara našoj shemi slijeda riječnih terasa (sl. 33).

Da to nije slučajno, potvrđuje i sukcesivni niz terasa Dunava u Mađarskoj.¹³⁶ Prosječna visina terasa iznad razine Dunava iznose: 3—6 m (stariji holocen) 8—16 m (postglacijal-mlađi pleistocen), 27—35 m (srednji pleistocen), 50—65 m (stariji pleistocen), 80—115 m (najstariji pleistocen). Srednja visina terasa iznosila bi: 4,5, 12, 31, 57,5 i 97,5 m, a visinska razlika između njih: 7,5, 19, 26,5 i 40 m.

Visina terasa Dunava u Željeznim vratima¹³⁷ iznosi 4—8 m (holocen), 10—20 m (mlađi pleistocen), 27—35 m (srednji pleistocen), 55—60 m (stariji pleistocen) i 95—115 m (najstariji pleistocen). Visinska razlika između srednjih visina iznosila bi: 9, 16, 26,5 47,5 m.

Visinski razmještaj, odnosno sukcesija svih spomenutih terasa, pravilno se povećava od Würma prema Günzu. Usprkos tektonskim poremećajima i imajući na umu činjenicu da jedan od faktora koji može poremetiti pravilan slijed terasa jest sam profil riječne doline, sukcesija terasa je pravilna. Budući da su periodi ili faza akumuliranja (isto kao i erodiranja) u svakom glacijalu i interglacijalu proporcionalni trajanju cijelog glacijala ili interglacijala, iz sukcesije riječnih terasa indirektno možemo zaključiti da se trajanje glacijala i interglacijala pravilno skraćivalo od

¹³⁵ Aritmetička sredina ne daje stvarnu srednju visinu terase, jer nisu uzete u obzir nama nepoznate horizontalne dimenzije terasa, tj. njihova širina.

¹³⁶ B. Bulla, Flussterrassenprobleme, Földrajzi Közlemenyek 80, 1956, str. 135.

¹³⁷ M. Pécsi, op. cit. str. 273.

Günza prema Würmu, tj. svaki stariji glacijal je dulje trajao od mlađega, a manje od starijega glacijala.

Dosad se u literaturi nije pridavala nikakva važnost širini terasa. Kad jednom započne sistematski rad, imalo bi se potvrditi pravilo da starije terase moraju biti šire od mlađih. Ustanovit će se da ni širina terasa nije slučajna; ona mora biti proporcionalna trajanju glacijala, odnosno interglacijala. To isto ustanovit će se i za volumen materijala koji je erodiran ili akumuliran u pojedinim fazama, pa će se utvrditi da je, npr., volumen materijala akumuliranog u Rissu veći nego u Würmu, u Mindelu veći nego u Rissu itd., proporcionalno trajanju ovih razdoblja kvartara.

Ima slučajeva da su se očuvale i riječne terase u kojima se jasno odražavaju klimatske promjene u posljednjem glacijalu i postglacijalu. R. L. Nelson¹³⁸ je konstatirao i datirao 6 terasa uz rijeku Frying Pan u Coloradu; pet terasa pripada Wisconsinu i post-Wisconsinu, a šesta, najviša, pre-Wisconsinu. Ime, kronologija, visina terasa iznad razine današnja rijeke (srednja visina terasa) i ostali podaci vide se iz slijedeće tabele:

Naziv terase	Kronologija	Relat. vis.	Sred. vis.	Razlika	Starost	Razlika
Chapman Gulch	Cochrane(?)	1,8—2,4	2,1	2,3	5 750	5 750
Hell Gate	Mankato	3,6—5,2	4,4	3,1	11 500	5 500
Ivanhoe	Cary	6—9	7,5	6,1	17 000	29 000
Biglow	Tazewell	12—15	13,6	18,4	46 000	17 000
Thomasville	Iowan	27—37	32		63 000	

Kako se vidi, visinska razlika između terasa pravilno se povećava od najniže prema najvišoj usprkos tome što vrijeme između postanka dviju sukcesivnih terasa nije isto tako pravilno raslo. Ali i tu se opaža stanovita pravilnost. Vremenska razlika između terasa Chapman Gulch i Hell Gate (5 750 god.) veća je od razlike između terasa Hell Gate i Ivanhoe (5 500 god.). U potonjem je slučaju proteklo više vremena, a visinska razlika je manja. Iz toga se vidi da je energija erozije bila jača u kasnom glacijalu nego u postglacijalu. To je u skladu s poznatim mehanizmom erozije. Ovu razliku ne bi ni trebalo objašnjavati, jer je prva terasa postglacijalna! Isto tako između dvije najviše terase vremenski je raspon manji (17 000 god.) nego između terasa Biglow i Ivanhoe (29 000 god.). U prvom slučaju smanjio se intuzitet erozija, jer se iz glacijala prešlo u postglacijal, a u drugom slučaju velika količina padalina u početku Wisconsinu poništila je efekt skraćivanja trajanja erozije. Bitna promjena fizikalnih uvjeta morala je dovesti do promjene energije erozije.

S. Venzo¹³⁹ je konstatirao 3 virmske terase u Val Brembano, i to terasa WI na visini 255 m, WII 247 i WIII na 240 m, aluvijalna terasa je na 236 m (Brembano 233 m). Prema tome, visinska razlika između terasa povećava se od korita rijeka prema najvišoj terasi: 3, 6,7 i 8 m.

¹³⁸ R. L. Nelson, Glacial geology of the Frying Pan River drainage, Colorado, J. Geol. 62, 1954, str. 325.

¹³⁹ S. Venzo, Geomorphologische Aufnahme des Pleistozän im Bergamasker Gebiet, Geolog. R. 40, 1952, 1, str. 122.

KVARTARNA GLACIJACIJA

Geografska raširenost kvartarne glacijacije. Kvartarna glacijacija je specijalno težak problem; ona je bipolarna, a struktura glacijacije sjeverne hemisfere — celularni tip glacijacije — i južne hemisfere — kontinuirani tip glacijacije — bitno je različita. To je idealna kombinacija koja omogućuje kompliciranje procese do krajnosti, jer je postojanje uzajamne uzročno-posljedične veze između ledenih pokrova na obje hemisfere neosporna činjenica.

Antarktika je kontinent okružen morem; Arktik je, suprotno tome, more okruženo kopnom. To je geografski okvir koji je odredio bitno različitu strukturu glacijacije objiju hemisfera. Arktik je oceanski basen koji je u najvećem dijelu okružen kontinentskim masama Euroazije i Sjeverne Amerike, a tek u jednom relativno uskom dijelu — između Evrope i Sjeverne Amerike — komunicira s Atlantskim oceanom. To je malen, ali vrlo važan sektor, jer je već odavno utvrđena najuža genetska veza između Atlantskog oceana i glacijacije sjeverne hemisfere.

Antarktika je kontinent koji je sa svih strana okružen dubokim i prostranim oceanom. Upravo zbog takvog geografskog razmještaja kopna i mora uvjeti za razvoj leda mnogo su povoljniji na južnoj nego na sjevernoj hemisferi.

Opći tok kvartarne glacijacije. Sve planinske glacijacije — kako sve druge, tako i na Alpama — bile su pod neposrednim utjecajem ledenih pokrova na sjevernoj i na južnoj hemisferi, i o ovima je ovisio njihov razvoj.

Prema današnjem stanju znanja, može se pretpostaviti da su glavne epizode kvartarne glacijacije bile sinhronne na cijelom svijetu.¹⁴⁰ Kad bismo htjeli biti još precizniji, onda bismo morali reći da je uzrok glavnih klimatskih promjena, promjena najvišeg reda, bio istovremen i univerzalan, ali daljnji tok procesa nije morao biti strogo sinhron na cijeloj Zemlji. Kad kažemo da je kvartarna glacijacija bila sinhrona, onda mislimo na sinhronost u genetskom smislu.

Novija su istraživanja pokazala da su ledenjaci na Antarktici postojali davno prije postanka njezina ledenog pokrova; sasvim je moguće da su ledenjaci mogli postojati znatno prije početka pleistocena¹⁴¹; a to je moglo biti pred nekoliko milijuna godina,¹⁴² dok su prvi ledenjaci uopće nastali duboko u tercijaru.¹⁴³ Prema tome, glacijacija na Antarktici je počela znatno ranije nego na sjevernoj hemisferi.¹⁴⁴ Zato klasična podjela na 4 glacijala i 3 interglacijala više ne bi zadovoljavala; treba dodati još 1 ili 2 glacijala prije Günza.¹⁴⁵ Tako bi, čini se, bila tačna pretpostavka o postojanju glacijala Donau. U Alpama su otkriveni tragovi još starijeg gla-

¹⁴⁰ P. Woldstedt, op. cit., str. 1.

¹⁴¹ R. F. Flint, op. cit., str. 45.

¹⁴² C. Emiliani i J. Geiss, On glaciation and their causes, Geolog. R. 46, 1959, 2, str. 589.

¹⁴³ C. E. P. Brooks, op. cit., str. 83.

¹⁴⁴ D. G. Panov, Geologičeskoe stroenie Antarktiki u zborniku Materialy po istorii issledovanija i po fizičkoj geografiji, Moskva 1958, str. 224.

¹⁴⁵ P. Woldstedt, Das Eiszeitalter... II, str. 393.

cijala, Biber (I. Schaeffer (1956). Kompletniji pleistocen izgledao bi ovako¹⁴⁶; Biber (ili Brügggen), Donau (ili Eburon), Günz, Mindel, Riss i Würm.¹⁴⁷ Između njih se nalazi 5 interglacijala: Tiglien (Tegelen), Waal, Aftonian (Cromer), Yarmouth (Holstein) i Sangamon (Eem).

Bitna je činjenica da su stariji glacijali na sjevernoj hemisferi ostavili vrlo malo tragova. Čini se, da je Donau bio znatno slabiji (tj. manje intenzivan i »toplji«), od Günza, pa je on zato ostavio malo tragova, i to tek na nekim mjestima.¹⁴⁸ Isto je tako važna činjenica da je u Nizozemskoj utvrđen niz transgresija u starijim interglacijalima (Cromer, Waal, Tiglien), ali je interesantno da su sve te tri transgresije bile relativno slabe u poređenju s kasnijima. Jedan je od mogućih uzroka: »interferencija tektonskih pokreta i (slabijih?) glacioeustatičkih fluktuacija.«¹⁴⁹

Do sličnog zaključka mora se doći i poznavanjem činjenice da dosad nije pronađen stariji les, npr., les koji bi pripadao Günzu. Nepostojanje lesa moglo bi se protumačiti nepostojanjem glacijalne anticiklone, odnosno malene površine leda na sjevernoj hemisferi. Poznato je da je Günz na sjevernoj hemisferi bio vrlo slabo razvijen; ne postoje nikakvi dokazi da je ledeni pokrov tada prodro do baltičke obale Njemačke i Poljske, pa je vrlo vjerojatno da su za vrijeme Günza u Skandinaviji postojali samo planinski ledenjaci.¹⁵⁰

Postojanje glacijala prije Günza potvrđuju i činjenice o pluvijalima. Pliocen u Great Plainsu završio je dugim i jakim sušnim periodom, nakon kojeg je nastupio pluvijal, i to prije nastupa pleistocenske glacijacije na sjevernoj hemisferi.¹⁵¹ To isto potvrđuju i istraživanja u Maroku (G. Choubert 1957).¹⁵² Prvi pregincki pluvijal je bio Moulouyen, prije njega je bio još jedan jaki i dugotrajni pluvijal. Dakle, dva pluvijala prije Günza.

Još u važni podaci o razvoju organskog svijeta. Granica između pleistocena i pliocena najlakše se određuje u marinskim sedimentima; granica se postavlja ondje gdje se počinju pojavljivati prvi predstavnici hladne faune među toplom faunom u umjerenom pojasu sjeverne hemisfere, tako da je cijeli Villafranchien priključen pleistocenu.¹⁵³ Fauna Villafranchiena je jako slična fauni gornjeg pliocena, a jasno pokazuje da se razvila u vlažnoj i umjerenom toploj klimi. Sve veća diferencijacija opaža se tek kasnije. Prvi jasni znaci nastupa kvartarne glacijacije u marinskoj flori i fauni Italije nalazi se između Piacentina i Astiena, s jedne strane,

¹⁴⁶ P. Woldstedt, op. cit., str. 2.

¹⁴⁷ Budući da je klasična podjela u Alpama u suštini tačna (iako nije kompletna), poznate nazive za 4 glacijala u tekstu uvijek smo upotrebljavali i za krajeve izvan Alpa.

¹⁴⁸ E. Zeuner, The lower boundary of the Pleistocene, XVIII Int. Geol. Congress 1948, P. IX, London 1950, str. 127.

¹⁴⁹ P. Woldstedt, op. cit., str. 64 i 301.

¹⁵⁰ D. Wirt i H. Illies, Plio-Pleistozängrenze und Günzeiszeit in Nordwestdeutschland, Eiszeitalter u. Gegenwart 1, 1951, str. 73.

¹⁵¹ J. C. Frye i A. B. Leonard, Studies of Cenozoic Geology along eastern margin of Texas High Plains, Armstrong to Howard counties, The Univ. of Texas, Rpt. of Investigations No 32, Austin 1957.

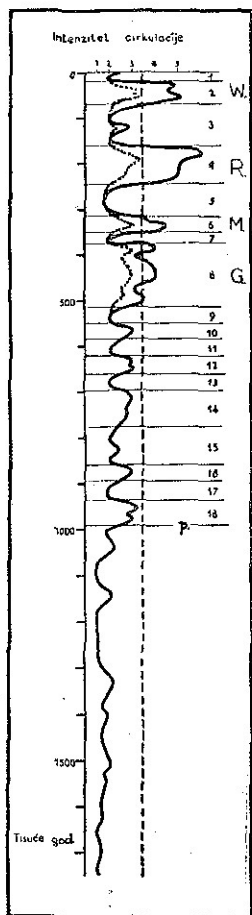
¹⁵² Cit. u: P. Woldstedt, op. cit., str. 391.

¹⁵³ Odluka XVIII Int. geol. kongresa u Londonu 1948.

te Kalabriena, s druge strane. Između Kalabriena i Siciliena je temperatura opet nešto porasla.

Vanredno važne podatke za rekonstrukciju općeg toka kvartarne glacijacije sakupila je Švedska dubokomorska ekspedicija 1947—48. Analizom dubokomorskih sedimenata G. Arrhenius¹⁵⁴ je, iz brzine sedimentiranja i otapanja kalcijeva karbonata i na temelju mikrofosilne analize, konstruirao krivulju intenziteta atmosferske cirkulacije u niskim geografskim širinama Tihog oceana (sl. 34). Intenzitet atmosferske cirkulacije je funkcija intenziteta glacijala, pa spomenuti autor faze 2, 4, 6 i 8 paralelizira sa četiri posljednja glacijala. Jasno se vidi da je atmosferska cirkulacija bila jako pojačana u posljednja 4 glacijala. Tako bi posljednja 4 glacijala obuhvatala samo gornji dio kvartara. Pojačanje atmosferske cirkulacije, odnosno zahlađenje u fazama 10, 12, 14, 16 i 18, bilo je tako jako te izgleda da je barem u pet pleistocenskih prebraskanskih faza atmosferska cirkulacija bila tako pojačana da bi se oni mogli nazvati glacijalima.¹⁵⁵

Ako je taj zaključak tačan, onda treba pretpostaviti ne 2 nego 5 glacijala prije Günza, tj. dosad je moralo biti ukupno 9 glacijala i 8 interglacijala. Nekoliko manjih pojačanja intenziteta cirkulacije bilo je u gornjem pliocenu, ali to po in-



Sl. 34. Intenzitet atmosferske cirkulacije u niskim geografskim širinama Tihog oceana. P., granica pliocena i pleistocena (G. Arrhenius 1952)

Fig. 34. The rate of low latitude atmospheric circulation. The dashed line corresponds to the inferred minimum rate occurring in connection with extensive glaciations. P. is the climatic Pliocene-Pleistocene boundary. (The dotted line - added by the author - would correspond to the rate of atmospheric circulation in a case of nonexistence of the ice sheets in the northern hemisphere.)

tenzitetu, tj. po veličini klimatskih promjena, nisu bili glacijali koji bi se mogli uporediti s kasnijim glacijalima. Autor zaključuje da još ništa nije poznato o mehanizmu koji je mogao uzrokovati intenzivniju atmosfersku cirkulaciju u niskim geografskim širinama potkraj kvartara. Može se pretpostaviti da je to zapravo znak intenziviranja cirkulacije u planetarnim dimenzijama.

¹⁵⁴ G. Arrhenius, Sediment cores from the east Pacific, Reports of the Swedish Deep-sea Expedition 1947—1948, Vol. V, Fasc. 1, Göteborg 1952.

¹⁵⁵ G. Arrhenius, op. cit., str. 200.

Koristeći se glavnim rezultatima, citiranim u gornjim primjerima, te u skladu s hipotetskim mehanizmom pulsiranja ledenih pokrova, opći tok kvartarne glacijacije mogli bismo u glavnim crtama ovako zamisliti:

Prvi planinski ledenjaci počeli su na Antarktici nastajati duboko u pliocenu. Klimatski uvjeti polagano su se bližili optimumu, pa su planinski ledenjaci postepeno prelazili u pijedmontske ledenjake. Budući da je temperatura bila još relativno visoka i padalina je bilo sve više, akumulacija i ablacija su bile vanredno velike. To je bio uzrok brojnih nalleta i povlačenja ledenjaka, uzrok prvih kratkoperiodskih i relativno slabijih klimatskih promjena, ali promjena samo na južnoj hemisferi. Započeti proces nastavio se dalje i nakon izvjesnog vremena nastao je embrionalni antarktički ledeni pokrov. Ali se ledeni pokrov ne širi kontinuirano; započela je nova faza evolucije kvartarne glacijacije; javljaju se prve pulsacije ledenog pokrova koji je već postao fizičko-geografski faktor planetarne važnosti. To je bio uzrok prvih klimatskih oscilacija čiji je utjecaj (hlađenje svjetskog mora; jako pojačana atmosferska cirkulacija) već prešao granice južne hemisfere. To je možda bio uzrok spomenutog zahlađenja i klimatskih promjena u Kalabrienu i Siciliju: na Sjevernoj hemisferi se javljaju prvi »sjeverni gosti«. To je bio vrlo dug period *postojanja ledenog pokrova samo na Antarktici*, period u kome se izmijenilo nekoliko klimatskih oscilacija drugog reda. Ovi glacijali pridonijeli su daljem postepenom padu temperature na cijeloj Zemlji, jer se i u fazama povlačenja leda očuvao najveći dio antarktičkog ledenog pokrova. Temperatura je u fazama 12 i 10 već toliko pala da je na sjevernoj hemisferi došlo do razvoja prvih ledenjaka, odnosno prvih pluvijala (u Alpama Donau i Biber).¹⁵⁶ Tako bismo fazu 12 možda mogli paralelizirati s glacijalom Biber, a fazu 10 s glacijalom Donau. Tako bismo mogli pretpostaviti zašto su tragovi starijih glacijala rijetki i slabo razvijeni. Osim velike starosti (mogućnost uništenja tragova), važan je faktor bio i opći tok glacijacije. Budući da *tada na sjevernoj hemisferi nije bilo ledenih pokrova* (na Grenlandu su vjerojatno postojali ledenjaci, a u Arktičkom oceanu se tek počeo »hvatati« led), pluvijale i planinsku glacijaciju na sjevernoj hemisferi znatnim je dijelom uzrokovalo zahlađenje kao posljedica postojanja, odnosno pulsiranja antarktičkog ledenog pokrova. Svaki mlađi glacijal na Antarktici bio je sve hladniji i dugotrajniji, pa je shvatljivo zašto je Donau ostavio više tragova od Bibera, a ovaj više od prethodnog glacijala. Zato se na sjevernoj hemisferi možda neće moći ustanoviti tragovi glacijala starijih od Bibera (ekvivalenti fazama 14, 16 i 18). Dakle, *prvih pet glacijala direktno je zahvatilo samo Antarktiku i južnu hemisferu*.

Postepenim porastom, antarktičkom ledenom pokrovu se progresivno povećavao volumen; time je on uzrokovao prve glacioeustatičke fluktuacije svjetskog mora. Budući da je volumen ledenog pokrova polako rastao

¹⁵⁶ Istovremeno s razvojem glacijacije na Antarktici, odnosno s postepenim hlađenjem Zemlje, nastupali su povoljniji uvjeti za nastup glacijacije i na sjevernoj hemisferi. U maksimumu najstarijih faza glacijacije Antarktike moglo bi se pretpostaviti da su nastupili i uvjeti za intenzivniju glacijaciju Grenlanda i zaledivanje Sjevernog ledenog mora. Nisu još postojali uvjeti za razvoj velikih ledenih pokrova na kontinentima sjeverne hemisfere, pa su prve faze zaledenosti Grenlanda i Sjevernog ledenog mora vjerojatno pokrenule pluvijale na sjevernoj hemisferi.

od faze 18 do faze 16 itd., jasno je zašto su starije glacioeustatičke fluktuacije bile slabije; njih je regulirao samo jedan ledeni pokrov, i to pokrov koji pulzira vrlo raznomjerno (jer se veći dio njegova leda očuvao u interglacijalima), pa su glacioeustatičke fluktuacije u Kalabrienu i Siciliju bile neznatne. *Tako je sve do Günza (ili Mindela), tj. veći dio pleistocena, kvartarna glacijala u pravom smislu riječi bila ograničena samo na južnu hemisferu.*

Od ovog trenutka treba imati na umu tri važne činjenice: prvo, od početka glacijacije na Antarkici sve do Günza prošlo je mnogo vremena, toliko mnogo da je razina mora u tom periodu — zbog općeg eustatičkog pada morske razine — pala za najmanje 200 m; drugo, antarktički ledeni pokrov ima već goleme dimenzije, i glacioeustatičke fluktuacije uzrokovane njegovim pulsiranjem postale su faktor koji treba imati u vidu, napose kad se pribroje prvom faktoru; treće vertikalni pokreti morskog dna u zoni podmorskog prava Wyville Thomson (i Nansenova praga), zajedno s općim sniženjem razine mora stvorili su kritičnu situaciju. Slijedeći glacijal na Antarktici (tj. Günz) uzrokovao je izvjestan pad razine mora, relativno malen pad, ali je on u kritičnoj situaciji mnogo značio: bila je prekinuta (potpuno ili samo djelomično, ili možda samo u zoni Nansenova praga) veza između Arktičkog oceana i Atlantika. *Nastala je prva termička izolacija Arktičkog oceana u kvartaru*, a to je bio neposredni impuls koji je pokrenuo prvi glacijal na sjevernoj hemisferi i ujedno prvi univerzalni kvartarni glacijal-Günz. Međutim, Günz (Nebraskan) je još prilično problematičan glacijal, jer ni u sjevernoj Evropi ni u Aziji ne postoje sigurni znakovi po kojima bi se moglo zaključiti da su tada postojali sibirski i sjevernoevropski ledeni pokrov. Izgled da ni u Sjevernoj Americi situacija još nije posve jasna. U svakom slučaju Günz nije bio veliki glacijal; to bi mogla biti posljedica nedovoljne izolacije Arktičkog oceana, ili možda oceani na sjevernoj hemisferi nisu bili dovoljno hladni za nastup glacijacije. Na taj zaključak upućuje i činjenica da je pad razine mora u Günzu bio relativno malen, mnogo manji nego u kasnija 3 glacijala.

Pulsiranje antarktičkog ledenog pokrova nastavilo se i dalje, pa se neposredno prije slijedećeg glacijala (Mindel) ponovila ista situacija, samo je morska razina pala još niže. Glacioeustatički pad razine mora, uzrokovan nastupom novog glacijala na Antarktici u kritičnoj situaciji, bio je dovoljan za termičku izolaciju Arktičkog oceana, koja je u ovom slučaju bila totalna; dokaz su goleme dimenzije mindelskih ledenih pokrova. To isto ponovilo se još dva puta, u Rissu i Würmu.

Planetarna atmosferska cirkulacija je funkcija termičkog gradijenta. Ako su od Günza (ili Mindela) nadalje ledeni pokrovi postojali i na sjevernoj hemisferi, onda se mora pretpostaviti da je atmosferska cirkulacija u posljednja 4 (ili 3) glacijala bila znatno intenzivnija nego prije. Na taj zaključak upućuje dijagram intenziteta atmosferske cirkulacije u Tihom oceanu (sl. 34). Gornji dio Arrheniusove krivulje, od Günza nadalje, prikazali smo kao prigušenu oscilaciju, tj. trajanje je ostalo isto, ali je intenzitet izjednačen (tačkasta krivulja) s oscilacijama u pre-Günzu. Tako bi, naime, izgledala krivulja intenziteta atmosferske cirkulacije u ekvatorijalnoj zoni, da nije bilo spomenutih četiriju glacijala na sjevernoj hemisferi, tj. da je regulator atmosferske cirkulacije i dalje ostao antarktički

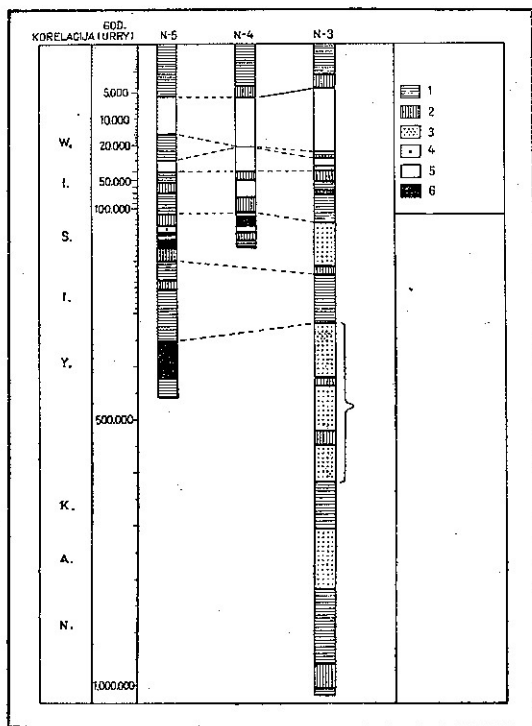
ledeni pokrov. Sada možemo riješiti *Arrheniusov* problem: koji je to »nepoznati mehanizam« uzrokovao intenziviranje atmosferske cirkulacije u posljednja 4 glacijala. Taj mehanizam mogli su činiti samo ledeni pokrovi na sjevernoj hemisferi, koji prije toga nisu ni postojali. Da bi ovo moglo biti ispravno najbolji je dokaz sam *Arrheniusov* dijagram. Rekli smo da je egzistencija gincke glacijacije na sjevernoj hemisferi prilično problematična; u svakom slučaju, ona je bila mnogo slabija od kasnija tri glacijala. To se vidi i na dijagramu. Atmosferska cirkulacija u Günzu (faza 8) bila je intenzivnija nego u glacijalu Donau, ali nije bila tako jaka kao u naredna 3 glacijala. Analogija ide i dalje. Iz intenziteta cirkulacije vidi se da je ona bila barem 2—3 puta jača u posljednja 3 glacijala nego u pre-Günzu; to bi bilo u izvjesnoj proporciji s površinom ledenih pokrova na sjevernoj hemisferi u relaciji prema veličini antarktičkog ledenog pokrova.

Iz opisanog mehanizma da glacioeustatički pad razine, uzrokovan pulsiranjem antarktičkog ledenog pokrova, može dovesti do termičke izolacije Arktičkog oceana dolazi se do zaključka da glacijali na Antarktici mogu, ali ne moraju, pokrenuti glacijale na sjevernoj hemisferi. To se najbolje vidi iz broja glacijala na objema hemisferama (sjeverna 4, južna 9 kompletnih glacijala). Postoje, međutim, najrazličitije mogućnosti kombinacija. Tako, npr., da nije došlo do termičke izolacije Arktičkog oceana cijeli kvartar mogao je proći a da do glacijacije sjeverne hemisfere nije trebalo da dođe, ili je pak većina glacijala na Antarktici mogla biti praćena istim brojem glacijala na sjevernoj hemisferi. Moglo se u krajnjem slučaju dogoditi i da jedan glacijal na sjevernoj hemisferi »izostane« u kontinuiranom nizu između dva glacijala, ili da je na sjevernoj hemisferi mogao biti samo jedan jedini glacijal, a ne četiri.

U vezi s ovim hipotetičkim kombinacijama možemo dotaći i teški problem tzv. velikog interglacijala (*Yarmouth, Mindel/Riss*). Naime, već se odavno pokazalo da je pretposljednji interglacijal bio mnogo dulji od ostalih interglacijala. U skladu s gornjom shemom može se pretpostaviti slijedeća mogućnost. Poslije *Mindela* na obje hemisfere je nastupio »normalni« interglacijal. Nakon njega je na Antarktici počeo slijedeći, novi glacijal. Međutim, istovremeno s nastupom tog novog glacijala na Antarktici, podmorski prag *Wyville Thomson* spustio se nešto dublje ispod kritične dubine, pa nije došlo do prekida pritjecanja toplih atlantskih voda u Norveško more i Arktički ocean, nije došlo do termičke izolacije Arktika. Novi glacijal na Antarktici ostao je bez pandana na sjevernoj hemisferi. Jedina posljedica je bilo izvjesno zahlađenje, slično kao u glacijalima prije Günza. Nakon ovog glacijala na Antarktici je nastupio novi interglacijal, a na sjevernoj hemisferi je proizučen »stari« interglacijal. Tako bismo na sjevernoj hemisferi imali »abnormalno« dug interglacijal— »abnormalno« dug zato što je zapravo nastao spajanjem dvaju »normalnih« interglacijala i jednog glacijala — sa relativno slabim zahlađenjem, a na južnoj hemisferi dva »normalna« interglacijala i jedan »normalni« glacijal. U ovom slučaju prvi (tj. stariji) od ova dva interglacijala morao je biti nešto dulji od drugoga, tj. zahlađenje nije bilo tačno u sredini velikog interglacijala nego nešto kasnije. Ako je doista bilo tako, u skladu s mehanizmom pulsiranja ledenih pokrova, nije isključeno da je ipak došlo do izvjesnog poremećaja pulsiranja antarktičkog ledenog pokrova,

pa možda zbroj dvaju interglacijala i jednog glacijala na Antarktici nije bio sasvim u skladu s trajanjem kakvo bi trebalo da bude prema pravilu. Kod prirodnih procesa ove vrste, takav je poremećaj moguć. Iznijetu pretpostavku možda potvrđuju slijedeći dokazi:

Svi su interglacijali na sjevernoj hemisferi bili isprekidani kratkotrajnim slabim zahlađenjima. Zato je F. Mühlerberg smatrao da je



Sl. 35. Litologija profila morskog dna iz Rossova mora. 1, grubi glacijalni morski sediment; 2, srednje fini morski sediment; 3, fini glacijalni morski sediment; 4, izolirane valutice; 5, sitnozrni, dobro sortirani sediment; 6, lamine fino sortiranog sedimenta (J. L. Hough 1950)

Fig. 35. Lithology of core samples from Ross Sea, Antarctica

između Mindela i Rissa u Alpama bio jedan čitav glacijal.¹⁵⁷ To isto utvrdili su G. Gams i R. Nordhagen, koji čak smatraju da je on bio bliži Rissu nego Mindelu, dakle da nije bio u sredini velikog interglacijala.¹⁵⁸ F. Brandtner¹⁵⁹ je studijom austrijskih lesnih profila utvrdio izrazit svježi interval negdje u sredini velikog interglacijala.

¹⁵⁷ Cit. u: R. Klebelsberg, Handbuch der Gletscherkunde und Glazialgeologie, Wien I 1948, II 1949, str. 421.

¹⁵⁸ Cit. u: C. E. P. Brooks, op. cit., str. 122.

¹⁵⁹ F. Brandtner, op. cit. str. 127.

Za rješenje ovog problema najautoritativniji će biti podaci s južne hemisfere. Zato je vanredno važan dubokomorski profil N-3 sa 68° 26' S (sl. 35). Sedimentiranje grubih glacio-marinskih sedimenata poklapa se s glacijalima, dok je u interglacijalima bio sedimentiran finiji materijal. U velikom interglacijalu (Y. = Yarmouth; označeno vitičastom zagradom) očito je došlo do poremećaja. Protivno ostalim interglacijalima, vide se dva prekida kad je bio sedimentiran grubi glacijalni materijal između kojih je taložen finiji materijal, isti ili sličan kao i u interglacijalima Aftonian i Sangamon. To bi značilo da je na Antarktici u velikom interglacijalu došlo do dva relativno kratkotrajna naleta leda, koji se nisu mogli spojiti u jedan jaki glacijal. To bi bio znak da je donekle naletio led, ali ne kao u prethodnom glacijalu, iako se iz debljine tih dvaju slojeva vidi da bi ova dva manja naleta, da su se spojila, trajala kao jedan cijeli, »pravi«, odnosno kompletni glacijal, a 3 faze sedimentiranja finijeg materijala vremenski bi odgovarale trajanju dvaju interglacijala. Tako cijeli taj poremećaj nije bitno poremetilo opći tok kvartarne glacijacije. Ako je to tačno, onda znači da je u kvartaru bio jedan glacijal više, što bi ukupno iznosilo: 11 glacijala i 10 interglacijala na južnoj hemisferi, te 4 glacijala i 3 interglacijala na sjevernoj hemisferi.

Pretpostavili smo da se svaka glacijacija sastoji od dvije etape: etape ekspanzije, tj. etape od početka glacijacije do maksimalnog glacijala (maksimalnog površinskog razvoja), i etape recesije koja traje od maksimuma do kraja glacijacije. Koji je glacijal u kvartaru bio maksimalni glacijal? Iz mehanizma kvartarne glacijacije vidi se da antarktički ledeni pokrov bio (i dalje ostaje) glavni regulator glacijacije sjeverne hemisfere. Jedan od glacijala na Antarktici morao je dulje trajati od svih ranijih i kasnijih glacijala. Taj glacijal je bio prekretnica u evoluciji kvartarne glacijacije; otad je počelo postepeno opadanje antarktičke glacijacije kao cjeline, počelo je skraćivanje trajanja glacijala i interglacijala. Ne postoje podaci po kojima bi se sa sigurnošću moglo zaključiti koji je to glacijal bio. Teškoća je u tome što je to možda bio jedan od pregingčkih glacijala, vjerojatno Donau, glacijal iz perioda prije prave glacijacije sjeverne hemisfere, pa zato ne postoje nikakvi pouzdani tragovi.

Pretpostavimo još jednu mogućnost koja je — ako su gornji izvodi tačni — donekle moguća. Moglo se dogoditi da je na sjevernoj hemisferi bio samo jedan jedini glacijal, recimo Würm (ili bilo koji drugi). U tom slučaju cijela kvartarna glacijacija sjeverne hemisfere trajala bi onoliko koliko bi trajao spomenuti glacijal, tj. cijela glacijacija ne bi trajala dulje od oko 60.000—100.000 god., tj. onoliko koliko su u prosjeku trajali kvartarni glacijali na sjevernoj hemisferi. Usprkos tome, i taj bi jedini glacijal — u stvari glacijacija — mogao ostaviti tragove kao i cijela glacijacija (nekoliko horizonata lesa, niz morskih, jezereskih i riječnih terasa i dr., koji bi odgovarali pulsacijama drugog reda); samo bi dimenzije tih pulsacija (oblika) bile proporcionalno smanjene. Ako se ovdje još prisjetimo prijašnjeg izvoda »da je trajanje glacijacije obrnuto proporcionalno s njenim prostornim dimenzijama«, onda možemo doći do slijedećeg zaključka: *sva tri velika glacijala na sjevernoj hemisferi (Mindel, Riss, Würm i možda Günz) zapravo su bili — svaki za sebe — kompletne glacijacije,*

a ne samo glacijali.¹⁶⁰ To znači da su u kvartaru u vrlo kratkom vremenu na sjevernoj hemisferi bile 3 kompletne glacijacije koje su nastale samo zahvaljujući izuzetnoj, u geološkoj historiji vjerojatno jedinstvenoj, kombinaciji glaciogenih faktora, ili preciznije: glacijacija se ponovo pojavila zbog višestruke termičke izolacije do koje u »normalnim« okolnostima, u »normalnim« glacijacijama dolazi samo jedanput u 230-ak milijuna godina. U takvom »normalnom« slučaju Arktički ocean bi se zaledio, nastala bi glacijacija koja, zbog golemih dimenzija ledenih pokrova i velike površine zaleđenog mora, ne bi trajala dulje od oko 100.000 godina. U takvom »normalnom« slučaju ledenih pokrova na periferiji brzo bi nestalo, a Arktički ocean i Grenland bi još dugo ostali zaleđeni, cijela hemisfera bila bi hladna još dugo vremena, ali previše hladna i suha da bi se pojavio novi nalet leda; glacijacija se u takvim uvjetima ne može ponoviti. Bilo bi to u suštini slično situaciji na južnoj hemisferi u toku permo-karbonske glacijacije. Tako bi bilo da je glacijacija trajala samo onoliko koliko bi morala trajati u skladu sa spomenutom relacijom trajanja glacijacije i njenog prostornog razvoja, i kada bi termička izolacija bila nešto trajnija, tj. kada bi bila »normalno« trajna (barem nekoliko stotina tisuća godina). Budući da se u svakom interglacijalu uspostavljala veza između Arktičkog i Atlantskog oceana, cijeli je proces počinjao temeljito iznova od onog trenutka kad je prekinuta ta veza, tj. kad se ponovno termički izolirao Arktički ocean.¹⁶¹ Sve ovo je posljedica činjenice, da kojoj smo toliko inzistirali, da se Wyville Thomsonov prag nalazi u kritičnoj dubini, tako kritičnoj da čak glacioeustatički pokreti izazvani pulsiranjem antarktičkog ledenog pokrova (plus oscilacije samog podmorskog praga) mogu dovesti do termičke izolacije Arktika. Zato je rečeno da je kvartarna glacijacija sjeverne hemisfere jedinstvena pojava u historiji glacijacija. Ako je ovo tačno, onda se lako mogu naći rješenja za neke probleme. Time moramo istaći da smo, i da ćemo nadalje, pod terminom celularna glacijacija misliti samo na jednu takvu glacijaciju, tj. samo na jednu ekspanziju i recesiju velikog stila. Samo u tom slučaju je mehanizam celularne glacijacije sličan mehanizmu glacijacije antarktičkog tipa. Jedina je formalna razlika trajanja takvih glacijala, jer je ono posljedica samo površine ledenih pokrova i zaleđenog mora, ali je mehanizam u oba slučaja jednak. To bi značilo da bi kvartarna glacijacija Antarktike — zbog njenih gotovo optimalnih dimenzija — mogla trajati, recimo, oko 5 milijuna godina, a kvartarna glacijacija sjeverne hemisfere, u slučaju da je do ekspanzije ledenih pokrova došlo samo jedanput, trajala bi tek oko 100.000 god., i to samo zato što je zaleđena površina bila silno velika. U skladu s tim, proporcionalno se skraćuje trajanje glacijala i interglacijala i svih

¹⁶⁰ Uz ostalo, sada je jasno zašto su ledeni pokrovi na sjevernoj hemisferi u »interglacijalima« (trebalo bi ih nazvati interglacijacijama) gotovo potpuno nestajali, dok je istovremeno antarktički ledeni pokrov u svim interglacijalima ostajao pošteđen.

¹⁶¹ N. A. Belov i N. N. Lapina, Novye dannye o stratifikaciji donnyh otloženij Arktičeskogo bassejna Severnogo Ledovitogo okeana, Doklady AN SSSR 122, 1958, 1, str. 115. U ovom je djelu prvi put dokazano da je u kasnijem pleistocenu — profil ne zahvaća starije dijelove — nastao višestruki prekid, odnosno uspostavljanje veze Atlantika i Sjevernog ledenog mora; to bi služilo kao dokaz o termičkoj izolaciji Arktika u izvjesnim razdobljima pleistocena.

oscilacija nižeg reda. Zato su interglacijali i glacijali na Antarktici trajali mnogo dulje od istih pulsacija na sjevernoj hemisferi. To znači da su — s takvim shvatanjima mehanizma glacijacije — *stadijali i interstadijali na sjevernoj hemisferi u svakom »glacijalu«* (Günz, Mindel . . .) *u genetskom smislu bili su zapravo glacijali i interglacijali*, tj. bili su pulsacije drugoga reda, jer su sami glacijali (Würm itd.) zapravo bili kompletne glacijacije. To bi, uz ostalo, moglo biti rješenje problema, odnosno zabune koja je nastala proučavanjem permo-karbonske glacijacije koja je, kao i kvartarna glacijacija, bila celularna, ali, za razliku od nje, nije se ponovila nekoliko puta. Ona je bila »normalna« glacijacija.

Ovdje ćemo jednom vanredno sretnom okolnošću potvrditi gornje pretpostavke. R. Maack¹⁶² je brojenjem varvi u sedimentima permokarbonske glacijacije u Brazilu došao do vanredno zanimljivih podataka: »Izračunao sam da je trajanje fluvioglacijalne sedimentacije u pokrajini Villa Velha, u državi Paraná, iznosilo oko 105.400 godina, kod São José u sjevernoj Parani oko 105.150 godina, a u zoni Pitange, u državi São Paulo, okruglo 96.750 godina; sedimentiranje se vršilo u četiri vremenska perioda između faza naleta leda, tako da u prosjeku otpada po 25.000 godina na svaku fazu fluvioglacijalne sedimentacije«.

Iako su ovi podaci vrlo instruktivni, iz njih se ne može izvesti tačan zaključak koliko je trajala permo-karbonska glacijacija Brazila. Ipak, njeno trajanje vjerojatno nije bilo bitno različito od spomenutih vrijednosti. Ako se u krajnjem slučaju pretpostavi da su sve faze naleta trajale podjednako dugo, onda se može zaključiti da je permo-karbonska glacijacija Brazila bila podjednakog reda veličine kao i kvartarni glacijali (glacijacije) na sjevernoj hemisferi. Iz toga bi se moglo zaključiti da je zajednička površina ledenih pokrova i zaleđenog mora na južnoj hemisferi u permo-karbonu morala biti približno velika kao zaleđena površina na sjevernoj hemisferi u Mindelu (ili Rissu),¹⁶³ tj. bila je mnogo veća od površine antarktičkog ledenog pokrova u kvartaru. Dakle, permo-karbonski ledeni pokrovi prodirali su daleko prema ekvatoru. Iz trajanja permo-karbonske glacijacije u Brazilu mora se zaključiti da su glavne pulsacije ledenog pokrova, tj. glacijali, trajali relativno kratko vrijeme i mogu se po trajanju upoređivati s trajanjem osnovnih pulsacija kvartarnih ledenih pokrova na sjevernoj hemisferi. Iz toga bi se moglo zaključiti da su osnovne pulsacije kvartarnih ledenih pokrova na sjevernoj hemisferi bili zapravo glacijali, a ne stadijali, kako se danas uzima.

Ovdje bi se moglo postaviti pitanje: zašto glacijali (glacijacije) na sjevernoj hemisferi nisu trajali mnogo dulje ili kraće nego glacijali na

¹⁶² R. Maack, Über Vereisungsperioden und Vereisungsspuren in Brasilien, Geolog. R. 45, 1957, 3, str. 578.

¹⁶³ Permo-karbonska glacijacija je bila »normalna« glacijacija, tj. ledeni pokrov (ili pokrov) nastao je, ritmički se širio do maksimuma i onda je uz prekide u povlačenju nestajao. On je nastao u trenutku kad su uvjeti za glacijaciju bili optimalni. Zato se u gornjem slučaju u poređenju veličina ne navodi i Würm, jer je njegova glacijacija nastala u već znatno nepovoljnijim klimatskim uvjetima nego u Rissu i Mindelu. Budući da se glacijacija nije ponovila, može se pretpostaviti da su klimatski uvjeti na južnoj hemisferi u maksimumu permo-karbonske glacijacije bili povoljniji nego u maksimumu Würma na sjevernoj hemisferi; povoljniji zato, što je glacijacija bila jednokratna.

Antarktici. Pokazalo se baš suprotno: da postoji izvjesna sinhronost u razvoju glacijacija obiju hemisfera. Taj problem bi se možda mogao riješiti primjenom spomenutog zakona o nepravno proporcionalnom odnosu trajanja i intenziteta glacijacije, a u skladu s predloženim mehanizmom kvartarne glacijacije. Iz površine ledenog pokrova proizlazi da antarktička glacijacija traje neuporedivo dulje od sjevernohemisferske kvartarne glacijacije i permo-karbonske glacijacije. Zbog gotovo optimalnih dimenzija, Antarktika tako sporo pulsira da su njezini glacijali u etapi recesije (od Donaua dalje) trajali u prosjeku oko 100.000 godina. Međutim, relacija zaleđene površine i trajanja glacijacije je takva da je glacijacija, koja je imala dimenzije Mindela (ili Rissa i Würma), trajala upravo oko stotinjak tisuća godina (Moglo bi se govoriti o poklapanju u fazi.) Dakle, »slučajna« koincidencija koja proizlazi samo iz veličine zaleđene površine (na sjevernoj hemisferi), odnosno veličine kvartarnih kontinenata (Antarktika) i mora (Sjeverno ledeno more). To znači da je površina leda na Antarktici, npr., dvostruko veća nego što je danas ili nego što je bila u većem dijelu pleistocena, ne bi postojala sinhronost kvartarne glacijacije.¹⁶⁴ Taj odnos u kvartaru, čini se, ipak nije bio idealan, tj. svaki glacijal na Antarktici trajao je nešto dulje od odgovarajuće glacijacije (glacijala) na sjevernoj hemisferi, jer su antarktički glacijali počinjali prije i svršavali kasnije nego glacijali na sjevernoj hemisferi, ali su zato interglacijali na Antarktici trajali kraće nego »interglacijali« na sjevernoj hemisferi. Interglacijali na Antarktici počinjali su kasnije, a svršavali su ranije nego na sjevernoj hemisferi.¹⁶⁵

¹⁶⁴ Ako doista postoji opisana genetska veza između pulsacija antarktičkog ledenog pokrova i postanka kvartarnih ledenih pokrova na sjevernoj hemisferi, onda bi značilo da bi u takvom hipotetičkom slučaju glacijali počinjali istovremeno, ali bi različito trajali.

¹⁶⁵ Zato se može tvrditi da se Antarktika danas još nalazi u (posljednjem) glacijalu, a nalazit će se sve dotle dok se obala i more ne oslobode od leda. Ovo će uzrokovati izvjesne teškoće kod pokušaja sastavljanja apsolutne kronologije kvartara.

Pretpostavljena sinhronost kvartarne glacijacije obiju hemisfera djelomično je posljedica i nesavršenosti dosadašnjih metoda mjerenja vremena. Budući da su razlike u ritmu pulsiranja u poređenju s ukupnim trajanjem glacijala neznatne (samo nekoliko tisuća godina), ove se razlike mogu utvrditi samo najpreciznijim mjerenjima. Da je ovaj zaključak tačan, u izvjesnoj mjeri potvrđuju rezultati radiokarbonskog mjerenja trajanja povlačenja würmskih ledenih pokrova na sjevernoj hemisferi. Pokazalo se (R. F. Flint, op. cit., 211) da, »usprkos sinhronizmu, ipak postoji prilična razlika u razvoju ledenih pokrova; pokazalo se da se sjevernoevropski ledeni pokrov poslije maksimuma proporcionalno brže smanjivao od sjevernoameričkog ledenog pokrova. Radiokarbonska mjerenja su potpuno potvrdila G. de Geerovu kronologiju koja se osniva na brojenju varva; po ovim metodama proizlazi da se pred 13 000 god. sjevernoevropski ledeni pokrov povukao daleko u unutrašnjost Skandinavskog poluotoka, dok je sjeveroamerički ledeni pokrov, usprkos gubitku najvećeg dijela leda, još u suštini imao istu površinu kao i u maksimumu (90% površine maksimuma) i da se poslije 13 000-te godine još 2 puta širio (Cary, Mankato). Mankato je, čini se, sinhron sa Salpausselkä; to bi značilo da je u toj fazi radijus sjevernoevropskog ledenog pokrova bio smanjen za $\frac{1}{4}$, a sjevernoamerički pokrov za polovicu. I konačno, led je u sjevernoj Evropi potpuno nestao, dok se na američkom kontinentu još uvijek održao.« Postojanje leda u sjeveroistočnom dijelu Sjeverne Amerike poslije kompletne deglacijacije u Evropi jednostavna je posljedica činjenice da je sjevernoamerički ledeni pokrov bio mnogo veći pa je

Apsolutna kronologija kvartara. Apsolutna kronologija kvartara ide u red najtežih problema kvartara, jer još ne postoji apsolutno pouzdana metoda mjerenja vremena koja bi zahvatila nešto dublje u prošlost kvartara. Izvjesne rezultate pokušat ćemo dobiti ekstrapoliranjem na osnovi nekih podataka koje smatramo dovoljno pouzdanima, a sve na temelju našeg hipotetičkog mehanizma, pretpostavljajući da je kvartarna glacijacija, kao cjelina, morala pulsirati manje-više *pravilno*. Osnova za sve ovo bit će pretpostavka da je: a) Würm — kao najbolje upoznata faza kvartara — bio kompletna glacijacija (a ne samo glacijal); b) da je trajanje ekspanzije glacijacije uvijek u određenoj proporciji s trajanjem recesije.

Najvažnije treba utvrditi: a) trajanje Würma kao cjeline; b) približnu godinu početka, maksimuma i nestanka würmske glacijacije.¹⁶⁶ Iako se radiokarbonskim mjerenjem vremena ne može obuhvatiti cijeli posljednji glacijal, ekstrapoliranjem su dobiveni prilično pouzdani rezultati o početku posljednjeg glacijala, odnosno svršetku posljednjeg interglacijala.

trebalo više vremena da nestane. Dva ledena pokrova različitih dimenzija ne mogu pulsirati potpuno sinhrono.

Spomenuti podaci o permo-karbonskoj glacijaciji Brazila možda bi se teško mogli dovesti u sklad s pretpostavkom da je permo-karbonska glacijacija trajala 1—2 mil. godina (C. Schuchert i C. O. Dunbar, *Outlines of Historical Geology*, 1941, str. 102), iako na potonje trajanje upućuje i činjenica da prosječna debljina kvartarnih sedimenata u sjevernoj Njemačkoj iznosi 35—58 m, a debljina permo-karbonskih sedimenata u južnoj Africi iznosi 400—500 m (cit. u: R. Klebelsberg, *Handbuch...* str. 877). Iz toga bi se moglo zaključiti da je permo-karbonska glacijacija trajala mnogo dulje od svih kvartarnih glacijala sjeverne hemisfere zajedno. Detaljnije istraživanje permo-karbonske glacijacije upućuje neke autore (L. C. King, *The palaeoclimatology of Gondwanaland during the Palaeozoic and Mesozoic Eras* u kompendiju *Descriptive Palaeoclimatology*, New York 1961, str. 316) na zaključak da permo-karbonska glacijacija nije počela niti je svršila u raznim dijelovima južne hemisfere u isto vrijeme; razlika između glacijacije Argentine i Australije procjenjuje se čak na nekoliko milijuna godina. Iz ovog se vidi da se na temelju tako različitih podataka zasad ne može ništa pouzdano reći o mehanizmu pulsiranja permo-karbonskih ledenih pokrova. Za nas je važno da se i ovakav slučaj može dovesti u sklad s opisanim mehanizmom pulsiranja ledenih pokrova. Naime, pretpostavili smo da relativno manji ledeni pokrovi u visokim geografskim širinama pulsiraju više pod utjecajem svojih dimenzija nego pod utjecajem klimatskih promjena uzrokovanih promjenama zaleđene površine (primjer je Antarktika u kvartaru). U tom slučaju — ako je ukupna zaleđena površina relativno malena — glacijacija može dugo trajati, pa će i sekundarne pulsacije biti proporcionalno trajnije. Isto tako i definitivna likvidacija, kao i nastanak, neće biti jednovremeni, nego će postojati znatne razlike. Ukoliko glacijacija dulje traje, utoliko će ta asinhronost u razvoju biti izrazitija. Prema tome, ako se uzme da je permo-karbonska glacijacija trajala 1—2 mil. god. i da glacijacija pojedinih dijelova Gondwane nije bila istovremena, onda se iz našeg mehanizma glacijacije mora zaključiti: a) da su permo-karbonski ledeni pokrovi bili relativno maleni; b) da su se oni nalazili u visokim geografskim širinama; c) da je razmještaj kopna i mora bio takav da se u nekim dijelovima led mogao održati i onda kad su u drugim dijelovima nastupili nepovoljni uvjeti za održanje leda. (U izvjesnoj mjeri to se može uporediti sa stanjem na sjevernoj hemisferi u kvartaru; grenlandski ledeni pokrov ima sve uvjete da se u manjem ili većem opsegu još dugo održi, a sibirski ledeni pokrov u posljednjem glacijalu nije se ni mogao dovoljno razviti i brzo je nestao u fazi deglacijacije.) Tek buduća istraživanja dat će materijal za rješenje ovog problema.

¹⁶⁶ Rezultat u suštini neće biti netačan, iako smo pretpostavili različito trajanje posljednjeg glacijala na Antarktici i posljednjeg glacijala (tj. glacijacije) na

Za početak posljednjeg glacijala na sjevernoj hemisferi može se uzeti: 50.000—52.000 do 65.000—70.000 god.,¹⁶⁷ 70.000 god.,¹⁶⁸⁻¹⁷¹ oko 72.000 god.,^{172,173} 65.000—81.000 god.¹⁷⁴

Kraj posljednjeg glacijala utvrđen je s mnogo većom sigurnošću; procjene se neznatno razilaze, a iznose: 9.000—10.000 god.,¹⁶⁷ 10.000 god.,¹⁶⁸⁻¹⁷² 11.000 god.^{170,175}

Ledeni pokrovi na sjevernoj hemisferi imali su maksimalnu površinu prije: 15.000 god.,¹⁶⁹ 16.000—20.000 god.,¹⁶⁸ 18.000—20.000 god.,¹⁷⁶ 18.600—23.900 god.,¹⁷⁷ 18.000 god.,¹⁷⁸ 20.000 god.¹⁷²

Dakle, posljednji glacijal je trajao: 59.000 god.,¹⁷⁰ 60.000 god.,¹⁷¹ 58.000 god.,¹⁶⁷ 60.000 god.,¹⁶⁸ 62.000 god.¹⁷²

Prema ovim podacima za daljnje razmatranje može se uzeti da je Würm počeo pred oko 70.000 god., u maksimumu je bio pred oko 20.000—22.000 god., a prestao je pred oko 10.000 god. To znači da je trajao okruglo oko 60.000 god. Prema tome, *relacija između trajanja recesije (12.000 god.) i ekspanzije (48.000 god.) iznosila bi 1 : 4, tj. virmški ledeni pokrovi su po prilici 4 puta brže nestali nego što su nastali.* Ta bi relacija vrijedila za sve ledene pokrove, bez obzira na njihove dimenzije i trajanje glacijacije, tj. bez obzira o kojoj je glacijaciji riječ.

Spomenute veličine ne mogu jednostavno poslužiti za rekonstrukciju kronologije kvartara jer su: a) glacijali različito trajali; b) jer interglacijali nisu bili svi jednako dugi, niti su razjeli koliko i glacijali. Da li postoji kakva pravilnost u tom odnosu? Ako postoji, kakva je? Ovdje je ne-

sjevernoj hemisferi, jer koliko se antarktičkom glacijalu doda godina, toliko se njegovu interglacijalu oduzme, pa je konačan rezultat tačan. Moramo gledati iz sjevernohemisferske perspektive, jer su to jedini podaci koji zasad postoje, pa kad kažemo da je Würm prestao tad i tad, to je očito da se misli na umjereni pojas na sjevernoj hemisferi. To nije bitan problem, jer nam je cilj: utvrđivanje općeg toka kvartarne glacijacije i približno trajanje njenih glavnih faza.

¹⁶⁷ N. A. Belov i N. N. Lapina, op. cit., str. 118.

¹⁶⁸ P. Woldstedt, Die Letzte Eiszeit in Nordamerika und Europa, Eiszeitalter u. Gegenwart 11, 1960, str. 148.

¹⁶⁹ H. E. Suess, Absolute chronology of the Last Glaciation, Science 123, 1956, str. 355.

¹⁷⁰ J. L. Kulp, Geologic time scale, Science 133, 1961, str. 1105.

¹⁷¹ W. D. Urry, Radioactivity of ocean sediments VI, Amer. J. Sci. 247, 1948, str. 257.

¹⁷² H. Gross, Noch einmal: Riss oder Würm. Eiszeitalter u. Gegenwart 10, 1959, str. 65.

¹⁷³ C. Emiliani, Palaeotemperature analysis of core 280 and Pleistocene correlations, J. Geol. 66, 1958, str. 264.

¹⁷⁴ W. S. Broecker, K. K. Turekian i B. C. Heezen, The relation of deep sea sedimentation rates to variations in climate. Amer. J. Sci. 256, 1958, str. 503.

¹⁷⁵ D. B. Ericson, W. S. Broecker, J. L. Kulp i G. Wollin, Late-Pleistocene climates and deep-sea sediments, Science 124, 1956, str. 387.

¹⁷⁶ P. Woldstedt, Eine neue Kurve der Würm-Eiszeit, Eiszeitalter u. Gegenwart 9, 1958, str. 151.

¹⁷⁷ N. V. Karlstrom, Radiocarbon-based Pleistocene correlations and worldwide climatic change, Science 124, 1956, str. 939.

¹⁷⁸ R. F. Flint, op. cit., str. 325.

sigurnost procjene mnogo veća nego u prethodnom slučaju, i rezultati se još više razilaze.

Pojedini su glacijali i interglacijali, prema sadašnjim rezultatima, trajali vrlo različito. Prvo je potrebno utvrditi trajanje glacijala. Prema našem mehanizmu kvartarne glacijacije od maksimalnog glacijala (Donau) nadalje, trajanje glacijala moralo se pravilno smanjivati. Istraživanjem odnosa kod najpouzdanijih podataka dolazi se do zaključka da je *svaki stariji od posljednjih 5 glacijala trajao oko 20% dulje od mlađega glacijala*, a s druge strane *svaki stariji pre-Donau glacijal bio je 20% kraći od mlađega glacijala* (sl. 12). Ako smo pretpostavili da je posljednji glacijal trajao 60.000 god., onda je Riss morao trajati 72.000 god.,^{179,180} hipotetički glacijal u sredini velikog interglacijala (Mühlbergian) trajao je 86.000 god., Mindel 103.000 god.,¹⁸¹ a Günz 124.000 god.; ukupno svih 5 glacijala trajalo je 445.000 god.

Drugi problem je utvrđivanje trajanja interglacijala. Poslužiti ćemo se istim pravilom kao i za glacijale; naime, opet ćemo pretpostaviti da je *svaki stariji post-Donau interglacijal trajao 20% dulje od mlađega* i da se veliki interglacijal sastojao na južnoj hemisferi od 2 interglacijala i jednog glacijala. Opet je teško odrediti tačno trajanje posljednjeg interglacijala (Sangamon, Riss/Würm). Iz dijagrama izotopskih temperatura u Würmu (v. sl. 9) te iz pretpostavke da je u svakom postglacijalu dolazilo do naglog porasta temperature, možda bi se mogla dobiti približna vrijednost. Uzeli smo da je kraj posljednjeg interglacijala (tj. ujedno i početak Würma) bio pred oko 70.000 god. Problem je: odrediti početak interglacijala; on je počeo pred 103.000 god.,¹⁸² 150.000 god.,¹⁸³ ili 110.000 god.¹⁸⁴ Iz svih poznatih podataka kao najpouzdanije bi se moglo uzeti da je 110.000 god. najrealnija granica. Prema tome, posljednji interglacijal (Sangamon) je vjerojatno trajao oko 40.000 god.^{185,186} Uvećanjem za 20% dobit ćemo slijedeća trajanja: prvi, mlađi interglacijal u velikom interglacijalu, Yarmouth II, trajao je 48.000 god., drugi, stariji, Yarmouth I, 58.000 god. (Ako uzmemo oba ova interglacijala plus hipotetički Mühlbergian, onda dobijemo ukupno trajanje velikog interglacijala na sjevernoj hemisferi 192.000 god.); Aftonian je trajao 70.000 god. Dakle, sva 4 posljednja interglacijala (odnosno 3 interglacijala na sjevernoj hemisferi) ukupno su trajala 216.000 god. To znači: ako je radiokarbonsko određivanje trajanja posljednjeg glacijala tačno, ako je pretpostavka o pravilnom prigušenom pulsiranju kvartarne glacijacije tačna, ako poremećaj pulsiranja u velikom interglacijalu nije bio znan, onda je posljednja etapa kvartarne glacijacije od početka Günza do danas trajala 671.000 god. Ovo zapravo odgovara najpozdanim dosadašnjim procjenama trajanja kvar-

¹⁷⁹ J. L. Hough, Pleistocene climatic record in a Pacific Ocean core sample, J. Geol. 61, 1953, str. 252: Trajanje Rissa procjenjuje se na 70 000 god.

¹⁸⁰ W. D. Urry, op. cit., str. 257, procjenjuje trajanje Rissa na 80 000 god.

¹⁸¹ J. L. Hough, op. cit., str. 252: Mindel je trajao 115 000 god.

¹⁸² C. Emiliani, Pleistocene temperatures, J. Geol. 63, 1955, str. 564.

¹⁸³ W. S. Broecker et al., op. cit., str. 513.

¹⁸⁴ N. A. Belov i N. N. Lapina, op. cit., str. 118.

¹⁸⁵ W. D. Urry, op. cit., str. 257, uzima da je Sangamon trajao 40 000 god.

¹⁸⁶ N. A. Belov i N. N. Lapina, op. cit., str. 118: Sangamon je trajao 40 000—45 000 godina.

Tab. 1. Relativna i apsolutna kronologija kvartara
 Tab. 1. The relative and absolute chronology of the Quaternary

Glacijal	Trajanje	Interglacijal	Trajanje	Apsolutna kronologija 0
Würm	60.000	Postglacijal	10.000	10.000 70.000
Riss	72.000	Sangamon	40.000	110.000 182.000
Mühlbergian	86.000	Yarmouth II	48.000	230.000 316.000
Mindel	103.000	Yarmouth I	58.000	374.000 477.000
Günz	124.000	Aftonian	70.000	547.000 671.000
Donau	595.000	Waalien	84.000	755.000 1.350.000
Biber	496.000	Tiglien	336.000	1.686.000 2.182.000
N	412.000	N/Biber	280.000	2.462.000 2.874.000
M	344.000	M/N	232.000	3.106.000 3.450.000
L	288.000	L/M	192.000	3.642.000 3.930.000
K	240.000	K/L	160.000	4.090.000 4.330.000

tarne glacijacije u dosadašnjem smislu riječi. Procjene iznose: 500.000 god.,¹⁸⁷ 680.000 ili 750.000 god. od kraja Mindela,¹⁸⁸ oko 1 mil. god. od nešto prije Günza,¹⁸⁹ oko 600.000 god.,¹⁹⁰ 800.000 god.,¹⁹¹ 350.000—400.000 god. od posljednje faze glacijala Elster (Mindel).¹⁹²

Ako je odnos trajanja recesije i ekspanzije glacijacije, kao cjeline, uvijek tačno određen (1 : 4), onda bi se iz toga i iz gornjih rezultata moglo najjednostavnijom matematičkom operacijom izračunati trajanje cjelo-

¹⁸⁷ G. Arrhenius, op. cit., str. 199.

¹⁸⁸ J. L. Hough, op. cit. str. 261.

¹⁸⁹ J. L. Hough, Pleistocene lithology of Antarctic Ocean-bottom sediments, *J. Geol.* 58, 1950, str. 257.

¹⁹⁰ A. Penck i E. Brückner, *Die Alpen in Eiszeitalter*, Leipzig 1909, str. 1169.

¹⁹¹ A. J. Eardley i V. Gvosdetsky, Analysis of Pleistocene core from Great Salt Lake, Utah, *Bull. Geol. Soc. America* 71, 1960, str. 1323.

¹⁹² J. F. Evernden, G. H. Curtis i R. Kistler, *Quaternaria* 4, 1957, str. 5.

kupne kvartarne glacijacije. To je tačno, i to bismo lako mogli ustanoviti kad bismo znali koji je glacijal bio maksimalan, ili kad bismo znali u kojoj smo sada fazi evolucije kvartarne glacijacije. A mi ne znamo tačno ni jedno ni drugo. Ukratko, morali bismo imati jednu čvrstu tačku. Jedno se ipak može sigurno tvrditi: kvartarna glacijacija još nije u fazi definitivne likvidacije. Isto tako iz gornjeg omjera možemo pretpostaviti da je preginčki period kvartarne glacijacije trajao barem 5 milijuna godina. To bi značilo da prvi počeci kvartarne glacijacije na Antarktici sežu duboko u pliocen; a to potvrđuju istraživanja. Pacifički dubokomorski profili pokazuju da je pleistocen počeo davno prije Günza i da je preginčki pleistocen vjerojatno znatno dulji nego Günz i post-Günz¹⁹³ ili, čak i više, Kalabriji je dulje trajao nego Siciliji i pleistocen¹⁹⁴ zajedno.¹⁹⁵

Na temelju gornjih pretpostavki odredit ćemo kronologiju najvećeg dijela kvartarne glacijacije. Za prvi glacijal u etapi recesije kvartarne glacijacije uzeli smo Günz, a za najdulji glacijal uopće, posljednji glacijal u etapi ekspanzije, uzeli smo Donau. (Prijelomna tačka, tj. tačka od koje je počela etapa recesije, bila je pred 874.000 god.) U skladu s našim mehanizmom pulsiranja glacijacije (sl. 12), tj. u skladu s pretpostavkom da se recesiona faza glacijacije prema fazi ekspanzije odnosi kao 1:4 i da su sve premaksimalne pulsacije drugoga reda trajale 4 puta dulje nego odgovarajuće pulsacije u fazi recesije kvartarne glacijacije, trajanje glacijala i interglacijala, te apsolutna kronologija kvartarne glacijacije, polazeći od današnjice kao nulte tačke, izgledala bi onako kako je prikazano na tabeli 1.¹⁹⁶

Kako smo vidjeli, trajanje i kronologija post-Günza je prilično realno određena, jer odgovara najpouzdanijim dosadašnjim podacima. Sasvim je drukčije s pre-Günzom. Koliko nam je poznato, dosad postoji samo jedno apsolutno datiranje preginčkih faza kvartarne glacijacije. K. Richter¹⁹⁷ je izotopskom analizom radioaktivnog fluora odredio da je interglacijal Tiglien bio pred $1,500.000 \pm 300.000$ god., a to odgovara našem računu da je on bio između 1,350.000 i 1,686.000 god.

Polazeći od gornjih pretpostavki, mogli bismo odrediti budući tok kvartarne glacijacije. Posljednji interglacijal, Sangamon, trajao je 40.000 god., prema tome, slijedeći interglacijal, interglacijal u kome se nalazimo već 10.000 godina morao bi trajati oko 34.000 god. Ako se to odbije, onda se vidi da bi današnji interglacijal imao trajati još 24.000 god. To znači: slijedeći glacijal (na sjevernoj hemisferi glacijacija) započeo bi za 24.000 god., ali samo u slučaju ako bi se tada termički izolirao Arktički ocean. Ako bi do toga došlo, onda bi glacijacija nastupila kao i u dosadašnjim slučajevima, a trajala bi 50.000 god. Ako se termička izolacija ne pojavi, glacijal bi nastupio samo na južnoj hemisferi, a na sjevernoj bi samo

¹⁹³ R. F. Flint, op. cit., str. 442.

¹⁹⁴ Pleistocen po staroj klasifikaciji (od Günza dalje). U tom slučaju riječ je o trajanju koje je vrlo blisko našoj procjeni.

¹⁹⁵ F. E. Zeuner, The lower boundary of the Pleistocene, XVIII Int. Geol. Congr. 1948, P. IX, London 1950, str. 129.

¹⁹⁶ T. Šegota, Absolute chronology of the Quaternary period, Bull. Sci., Conseil Acad. R. P. F. Yougoslavie, T. 6, No. 2, Zagreb 1961, str. 39.

¹⁹⁷ K. Richter, Fluorteste quartären Knochen in ihrer Bedeutung für die absolute Chronologie des Pleistozäns, Eiszeitalter u. Gegenwart 9, 1958, str. 18.

nastalo izvjesno zahlađenje, isto kao u velikom interglacijalu i u preginčkim glacijalima. Ako se pretpostavi da bi u sklopu kvartarne glacijacije moglo doći do ukupno još 2—3 glacijala na Antarktici, odnosno isto toliko glacijacija na sjevernoj hemisferi, onda bi cijela kvartarna glacijacija trajala oko 5 milijuna godina.

Kvartarne fluktuacije morske razine. Datiranje morskih terasa, odnosno određivanje fluktuacija morske razine, ima vanrednu važnost za kronologiju kvartara, jer su fluktuacije razine bile univerzalne.

Kauzalnu vezu između kvartarne glacijacije i promjene visine morske razine otkrio je C. Mac l a r e n 1842. On je prvi pretpostavio da je stvaranje velikih ledenih pokrova u kvartaru moralo biti praćeno povlačenjem golemih masa vode iz svjetskog mora. Međutim, uskoro se ustanovilo da to nije dovoljno da bi se objasnio cijeli mehanizam. Radom čitavog niza istraživača ustanovljeno je da je razina svjetskog mora u kvartaru nekoliko puta bila viša i nekoliko puta niža od današnje razine; to su tzv. glacioeustatičke fluktuacije, pa se u najširem smislu riječi ustanovilo da su visoke razine mora odgovarale interglacijama, a niske razine mora glacijalima. Ali ni time se nije moglo riješiti problem. Pokazalo se da su kvartarne glacioeustatičke fluktuacije morske razine superponirane¹⁹⁸ na opći pad razine svjetskog mora (eustatički pad razine) od pliocena do danas. To je u uskoj vezi s neotektonizmom,¹⁹⁹ koji je neposredno prethodio kvartarnoj glacijaciji i nastavio se i dalje u kvartaru (izdizanje kopna i tonjenje oceanskih basena). Upravo zbog takve kompleksne prirode, fluktuacije morske razine nisu dovoljno poznate; ne zna se još tačan broj visokih i niskih stanja, odnosno razina mora; ni kronologija još nije na čvrstim temeljima.

F. E. Z e u n e r²⁰⁰ pretpostavlja da u svjetskim razmjerima prosječna visina (u m) visokih razina mora iznosi (korelacija s alpskom kronologijom):

Kalabrien	oko 200	
Sicilien (Sicilien A)	103	
Milazzien	56	Günz/Mindel
Tirenien	32	Mindel/Riss
Glavni Monastirien	18	„
Kasni Monastirien	7,5	Riss/Würm
Interstadijal	oko 1	

Kasnije je isti autor²⁰¹ zaključio da je u Sicilienu bilo 5 relativno stabilnih morskih razina (80, 80—100; 85, 90 i 103 m). Poslije razine Siciliena A (103 m) morska razina je pala za 70 m, pa se u sedimentima obale abradirane na 30 m nalaze izraziti tragovi hladne klime. Tako se objašnjava zašto u sedimentima Siciliena ima moluska koji žive u hladnoj vodi. Cijeli Sicilien nije bio hladan, nego se izmijenilo nekoliko hladnih

¹⁹⁸ F. E. Zeuner, The Pleistocene Period, London 1959, str. 304.

¹⁹⁹ H. Baulig, The Changing Sea Level, London 1935, str. 31.

²⁰⁰ F. E. Zeuner, XVIII Int. Geol. Congr., str. 128.

²⁰¹ F. E. Zeuner, The Pleistocene Period, London 1959, str. 352.

i toplih faza kao i u pleistocenu od Günza dalje, pa bi navedenih pet faza Siciliena, po Zeuneru, vjerojatno trajalo dugo kao i pet faza samoga pleistocena. Još bi možda trebalo dodati jednu razinu Tireniena od 45 m^{202, 203} u velikom interglacijalu. Autor dodaje još razinu Epimona-stiriena od 4 m (prvi interstadijal posljednjeg glacijala) i postglacijalnu razinu od 2 m. K. Butzer²⁰⁴ smatra da se definitivno može uzeti da Glavni Monastirien od 15 m (po Zeuneru 18 m) pripada interglacijalu Riss/Würm. P. Woldstedt²⁰⁵ daje u suštini slične vrijednosti: 180 m za Kalabrien, 2 razine za Sicilien (80 i 100 m), 2 razine za Tirenien (30 i 45 m), 2 razine za Monastirien (15—18 m i 5—8 m; obje iz Riss/Würma) i postglacijalnu razinu Tapes na 3—6 m. Nešto pojednostavljene, ali u suštini slične, fluktuacije morske razine od Günza do danas pretpostavlja i H. Valentin.²⁰⁶ Visina interglacijalnih razina iznosi 15, 30 i 60 m, a glacijalnih razina iznosi —95, —110, —90 i —20 m.

Iz spomenutih podataka vidi se da je današnje znanje o fluktuacijama morske razine prilično nepotpuno, pa se teško mogu izvući sigurni zaključci. Iz starijeg, »klasičnog« Zeunerova slijeda visina morskih razina (0, 7,5, 18, 32, 56, 103 i 200 m) vidi se da razlika između razina iznosi: 7,5, 10,5, 14, 24, 47, 97 m. Ako se ne uzme u obzir pre-Günz — kasnije ćemo vidjeti zašto ne — onda se vidi da je razlika u visini razina sve manja od Günza/Mindela prema kraju kvartara. Ako se pretpostavi da je eustatički pad razine svjetskog mora u spomenutom periodu bio manje-više kontinuiran — trajanje eustatičkih fluktuacija mnogo je dulje od glacioeustatičkih, pa se u tom relativno kratkom periodu ubrzanje ili usporjenje eustatičkog pada razine može zanemariti — onda bi se iz ovih razlika moglo zaključiti da se vrijeme između dvaju sukcesivnih interglacijala skraćivalo od Günza prema kraju kvartara.

Još nije započelo sistematsko istraživanje širina terasa abradiranih za vrijeme interglacijalnih razina svjetskog mora. One bi, po pravilu, morale biti šire u starijim a uže u mlađim interglacijalima. Da je to ispravno, moglo bi se zaključiti iz slijedećeg izvoda: »Sa Sicilienom je povezana značajna fiziografska promjena. More na razini od 103 m abradiralo je široku terasu, pa se iz toga može zaključiti da je ova faza dugo trajala... Kasnije abradirane terase relativno su uske, iz čega se može zaključiti da je visoka razina mora trajala kratko vrijeme.«²⁰⁷

Za tačnije prikazivanje fluktuacija morske razine važan je podatak kada se, u kojem dijelu interglacijala, morska razina nalazila na najvećoj visini, odnosno u kojem je dijelu glacijala razina bila na najnižoj tački. Na svim poznatim dijagramima fluktuiranja morske razine u kvartaru najviša razina se prikazuje u sredini interglacijala, a najniža razina u sredini glacijala. Iz mehanizma pulsiranja hipotetičkog ledenog pokrova (sl. 8) vidjelo se da povećanje površine ledenog pokrova ne teče paralelno

²⁰² F. E. Zeuner, Dating the Past. An Introduction to Geochronology, London 1952, str. 234.

²⁰³ F. E. Zeuner, Pleistocene shore-lines, Geol. R. 40, 1952, str. 39.

²⁰⁴ K. Butzer, op. cit., str. 28.

²⁰⁵ P. Woldstedt, Das Eiszeitalter... str. 288.

²⁰⁶ H. Valentin, Die Küsten der Erde, Gotha 1954, str. 89.

²⁰⁷ F. E. Zeuner, XVIII Int. Geol. Congr.... str. 128.

s porastom volumena leda; postoji razlika koja u izvjesnim slučajevima može biti znatna, dovoljno velika da može ostaviti traga u morfologiji morske obale. Takve fluktuacije morske razine karakteristične su za svaki glacijal, ali su, naravno, najjasniji tragovi ostali iz posljednjeg glacijala. Zato sve što je poznato za vrijeme fluktuacije morske razine vrijedi i može se primijeniti na sve ostale glacijale.

Ledeni pokrovi na sjevernoj hemisferi imali su maksimalnu površinu, tj. najdalje su prodrli na jug pred oko 20.000 god. Većina dubokomorskih profila pokazuje da je temperatura površinske vode Atlantika i drugih mora u periodu pred 11.000—18.000 god. porasla samo za 10—20%.^{208, 209} U tom intervalu skandinavski ledeni pokrov bio je smanjen na 1/3 površine, ali sjevernoamerički ledeni pokrov samo za 10%.²¹⁰ U istom tom periodu morska razina je porasla za barem 70%, tj. izdigla se na oko —30 m.^{211, 212} Do istog zaključka došlo se istraživanjima na obali Meksičkog zaliva.^{213, 214} Pokazalo se da s emorska razina dizala već preko 20.000 god., tj. prije maksimalnog površinskog razvoja sjevernoameričkog ledenog pokrova. To pokazuje da je barem 70% leda na sjevernoj hemisferi nestalo, a da se zapravo nije pojavila nikakva bitna promjena temperature ni bitno smanjenje površine ledenih pokrova na cijeloj sjevernoj hemisferi.²¹⁵ To znači da su ledeni pokrovi na sjevernoj hemisferi počeli nestajati relativno sporo, a nagla recesija je počela tek pred 11.000 god.²¹⁶ S ovakvim mehanizmom pulsiranja ledenih pokrova u suštini se slaže i Woldstedtov dijagram fluktuiranja morske razine u Würmu.²¹⁷ Dakle se opravdano pretpostavlja da je najniža razina vjerojatno bila negdje pred oko 40.000 god., tj. praktički u sredini Würma, znatno prije maksimuma površinskog razvoja njegovih ledenih pokrova. Za daljnje razmatranje uzet ćemo da ista zakonitost vrijedi i za svaki stariji glacijal; usprkos različitom trajanju, odnos 1 : 1 bio je uvijek isti.

Iz pretpostavke da je već sredinom interglacijala počinjala akumulacija snijega na Antarktici (rezerva za novi nalet leda u narednom glacijalu), realno bi se moglo pretpostaviti da je maksimalna razina svjetskog mora bila vjerojatno pri kraju prve trećine interglacijala. U daljem razmatranju pretpostavit ćemo da je tako bilo u svim interglacijalima, bez obzira na njihovo trajanje.

²⁰⁸ C. Emiliani, Pleistocene temperatures, J. Geol. 63, 1955, str. 538.

²⁰⁹ D. B. Ericson et al., op. cit., str. 387.

²¹⁰ D. B. Ericson, et al., op. cit., str. 387.

²¹¹ C. Emiliani, Temperature and age analysis of deep-sea cores, Science 125, 1957, str. 386.

²¹² F. E. Shepard i H. E. Suess, Rate of postglacial rise of sea-level, Science 123, 1956, str. 1082.

²¹³ H. N. Fisk i E. MacFarlan, Late Quaternary deltaic deposits of the Mississippi River, Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 62, 1955.

²¹⁴ H. Brannon, L. Simons, J. Perry, A. Daughtry i E. MacFarlan, Humble Oil and Refining Company radiocarbon dates II, Science 125, 1957, str. 919.

²¹⁵ Ovo bi mogla biti potvrda u početku iznijete pretpostavke da je opći porast temperature u fazi deglacijacije u suštini posljedica, a ne uzrok povlačenja ledenog (ledenih) pokrova.

²¹⁶ D. B. Ericson et al., op. cit., str. 387.

²¹⁷ P. Woldstedt, Das Eiszeitalter... sv. II, sl. 106.

Bitna je karakteristika kvartarne glacijacije činjenica da je ona bipolarna glacijacija, tj. veliki ledeni pokrovi su se razvili i na sjevernoj i na južnoj hemisferi, ali je fluktuiranje morske razine bilo vrlo komplicirano zahvaljujući kompleksnosti pulsiranja ledenih pokrova i općem toku kvartarne glacijacije, koji nije bio jednostavan.

Glaciogeni faktori bili su mnogo povoljniji na Antarktici nego na sjevernoj hemisferi, pa se prvi tragovi glacijacije na Antarktici mogu nazreti davno prije početka pleistocena. Antarktički ledeni pokrov je nastao spajanjem brojnih manjih planinskih ledenjaka. Pulsiranje tog embrionalnog ledenog pokrova bilo je uzrokom relativno slabih klimatskih oscilacija u gornjem pliocenu; te su promjene bile očite samo na južnoj hemisferi, a glacioeustatičke fluktuacije, uzrokovane takvim pulsiranjem, bile su neznatne. Klimatski uvjeti bili su povoljni za daljnju ekspanziju antarktičkog ledenog pokrova, pa je on poslije nekog vremena postigao goleme dimenzije. Atmosfera i oceani su vrlo osjetljivi mehanizmi, pa se spomenuti razvoj odrazio na temperaturi morske vode, što je imalo dalekosežne klimatske posljedice. To je bio vrlo dug period kad je kvartarna glacijacija bila ograničena isključivo na antarktički kontinent. Samim faktom svoga postojanja antarktički ledeni pokrov nastavio je i dalje hladiti Zemlju, pa su njegove pulzacije (plus pulzacije grenlandskog ledenog pokrova) bile osnovni uzrok relativno manjih klimatskih promjena najvišeg reda na sjevernoj hemisferi (pluvijali i interpluvijali). Prema tome, u toj fazi nisu postojali ledeni pokrovi na sjevernoj hemisferi; najveći dio kvartarne glacijacije bio je ograničen samo na južnu hemisferu, pa su najstarije glacioeustatičke fluktuacije bile kontrolirane isključivo pulsiranjem antarktičkog ledenog pokrova. U skladu s hipotetičkim mehanizmom pulsiranja ledenih pokrova (sl. 27), mogao bi se prikazati mehanizam glacioeustatičkih fluktuacija morske razine, uzrokovanih pulsiranjem samo antarktičkog ledenog pokrova. *Promjene volumena leda antarktičkog ledenog pokrova* (a time i glacioeustatičke fluktuacije) u smjeni glacijacija i interglacijala bile su relativno malene; one su iznosile tek oko 10% od ukupnih glacioeustatičkih fluktuacija u fazi kad su postojali ledeni pokrovi na sjevernoj hemisferi.²¹⁸ U skladu s mehanizmom pulsiranja, glacioeustatičke fluktuacije, uzrokovane pulsiranjem antarktičkog ledenog pokrova, nisu bile jednostavne (o u tab. 2); amplituda fluktuacija rasla je prema glacijalu Donau, a opadala je od Donaua nadalje. Uzeli smo da je volumen antarktičkog ledenog pokrova pravilno rastao za oko 3—4% (relativni porast iznosio je oko 20%) u svakom pre-Donau glacijalu ili interglacijalu, a za isti iznos je pravilno opadao u post-Donau glacijalima i interglacijalima. U skladu s takvim mehanizmom pulsiranja u svim post-Donau interglacijalima, količina vode i leda koja je oslobođena s Antarktike bila je veća nego u prethodnoj fazi. Obratno je bilo u pre-Donau fazama. S druge strane, uzeli smo da je *promjena volumena u ciklusu glacijal/interglacijal iznosila 16%*. Prema tome, na opći eustatički pad razine svjetskog mora treba superponirati glacioeustatičke fluktuacije uzrokovane pulsiranjem antarktičkog ledenog pokrova. Za naš prikaz gla-

²¹⁸ T. Šegota, Quaternary sea-level fluctuations, Bull. Sci., Conseil Acad. R. P. F. Yougoslavie T. 6, 1961, No. 3, str. 65.

	N / BIBER	BIBER	TIGLIEN (KALABRIEN)	DONAU	WALTIEN (SICILIEN)	GÜNZ	AFTONIAN (MILAZIEN)	MINDEL	YARMOUTH 1 (TIRENIEN 1)	MÜHLBERGIEN	YARMOUTH 2 (TIRENIEN 2)	RISS	SANGAMON (MONASTRIEN)	WÜRM	DANAŠNICA (+3.500 god.)
(a) Relativni pad ili porast razine uzrokovan pulsiranjem antarktičkog ledenog pokriva	18.9	26.9	22.7	27.2	27.2	22.7	26.9	18.9	22.5	15.8	18.7	13.2	15.6	11	13
(b) Relativni pad ili porast razine uzrokovan pulsiranjem ledenih pokriva na sjevernoj hemisferi	—	—	—	—	—	10	10	121.4	121.4	8.5	8.5	118.3	118.3	98.6	98.6
(c) Ukupni relativni pad ili porast razine (a + b)	18.9	26.9	22.7	27.2	27.2	32.7	36.9	140.3	143.9	24.3	27.2	121.5	139.9	109.6	111.6
(d) Visina morske razine	300	223	200	99	80	36	60	-90	45	11.4	30	-110	17	-100	5
(e) Razlika između sukcesivnih glacijala ili interglacijala	3.1	4.4	3.8	0.3	4.5	4.5	0.3	3.8	4.4	3.1	3.8	2.6	3.1	2.2	2.6
(f) faza deglacijacije-nekorigitirano	—	45.4	—	46	—	8.5	—	6	—	6.3	—	—	5	—	5
(g) -korigitirano	—	41	—	46.3	—	13	—	9.8	—	9.4	—	—	7.6	—	7.2
(f) Eustatički pad morske razine	54.6	—	74	—	11.5	—	9	—	8.7	—	8	—	7	—	—
(g) faza ekspanzije-nekorigitirano	50.8	—	69.6	—	11.8	—	13.5	—	12.5	—	11.1	—	9.6	—	—
(h) -korigitirano	6.8	9.7	8.2	9.8	9.8	8.2	9.7	6.8	8.1	5.7	6.7	4.7	5.6	3.97	4.69
(g) Relativni volumen vode vezan uz pulsacije antarktičkog ledenog pokriva	—	—	—	—	—	—	3.6	43.8	43.8	3.0	3.0	42.7	42.7	35.6	35.6
(h) Volumen vode vezan uz pulsacije ledenih pokriva na sjevernoj hemisferi	—	—	—	—	—	3.6	3.6	43.8	43.8	3.0	3.0	42.7	42.7	35.6	35.6
(i) Volumen vode vezan uz pulsacije ledenih pokriva u ciklusu glacijal/interglacijal	6.8	9.7	8.2	9.8	9.8	11.8	13.3	50.6	51.9	8.7	9.7	47.4	48.3	39.5	40.2
(j) Ukupni volumen vode vezan u antarktičkom ledenom pokr.	32.9	42.6	34.5	44.3	34.5	42.7	32.9	39.8	31.7	37.4	30.9	35.4	29.7	33.8	29.1
(k) Ukupni volumen vode vezan u svim ledenim pokriva	32.9	42.6	34.5	44.3	34.5	46.2	32.9	83.6	31.7	40.4	30.6	78.1	29.7	69.3	29.1
(l) Volumen vode antarktičkog ledenog pokriva	7.5	10.7	9	10.8	10.8	9	10.7	7.5	8.9	6.27	7.4	5.23	6.2	4.4	5.2
(m) oscilaciju (a)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(n) Volumen leda ledenih šitova na sjevernoj hemisferi	—	—	—	—	—	3.9	3.9	48.2	48.2	3.37	3.37	46.9	46.9	39.1	39.1
(o) Volumen leda koji je uzrokovao oscilaciju (c) (l + m)	7.5	10.7	9	10.8	10.8	12.9	14.6	55.7	57.1	9.64	10.7	52.1	53.1	43.5	44.3
(p) Volumen leda antarktičkog ledenog pokriva	36.2	46.9	37.9	48.7	37.9	46.9	36.2	43.7	34.8	41.1	33.7	38.9	32.7	37.1	31.9
(q) Volumen leda na Zemlji (m + o)	36.2	46.9	37.9	48.7	37.9	52.8	36.2	91.9	34.8	44.4	33.7	85.8	32.7	76.2	31.9

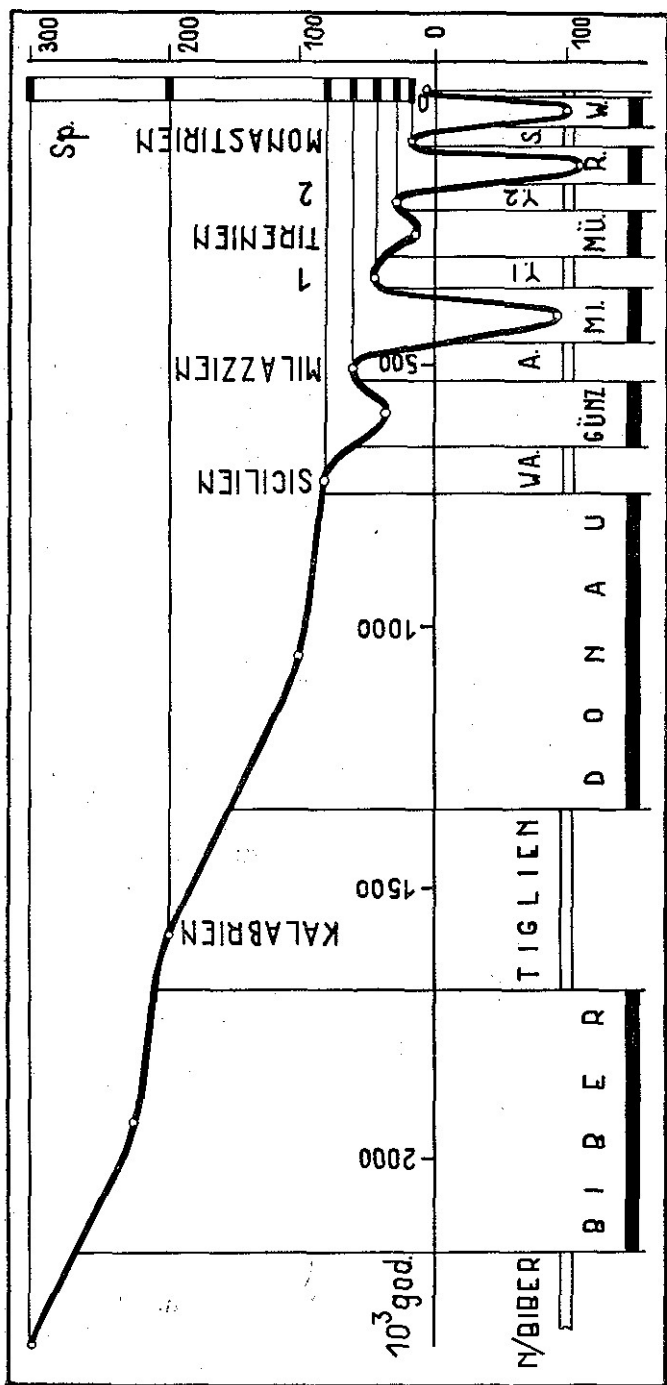
Tab. 2. Najvažniji numerički podaci o fluktuacijama morske razine (m), volumenu vode i leda (km³). Podaci nisu korigirani za veličinu izostatičke kompenzacije

Tab. 2. The most important numerical data about the fluctuation of the Quaternary sea-level position, the volume of the sea water and the glacier ice (in cu. km). Data are not corrected for isostatic adjustment

cioeustatičkih fluktuacija uzeli smo da današnji volumen antarktičkog ledenog pokrova iznosi 32,75 mil. km³ leda, što bi odgovaralo srednjoj debljini njegova ledenog pokrova od 2.500 m. Nestankom ovog leda morska razina bi se, bez izostatičke kompenzacije, izdigla za 81,6 m. To je veličina koju treba uzeti u obzir pri izračunavanju eustatičkog pada morske razine. Eustatički pad razine bio je ubrzan povećanjem volumena antarktičkog ledenog pokrova u pre-Donau fazama, odnosno usporavan u post-Donau fazama. Zato se eustatički pad morske razine mora korigirati za razliku (e u tab. 2) nastalu smanjenjem (u pre-Donau) volumena vode između dva sukcesivna glacijala ili interglacijala.

Treći faktor koji je bitno utjecao na glacioeustatičke fluktuacije svjetskog mora bila je glacijacija sjeverne hemisfere. Za razliku od antarktičkog ledenog pokrova, ledeni pokrovi na sjevernoj hemisferi naglo su se širili, akumulirali su golemu količinu leda i u interglacijalima su bili svedeni samo na grenlandski ledeni pokrov. Tako bi na spomenute dvije krivulje trebalo superponirati i fluktuacije, uzrokovane postankom i nestankom ledenih pokrova na sjevernoj hemisferi. U skladu sa sve opsežnijim materijalom i dokazima, uzeli smo da u Günzu nisu na sjevernoj hemisferi postojali ledeni pokrovi, pa je i pad morske razine bio relativno malen. Ovaj je pad uzrokovan samo ekspanzijom antarktičkog i grenlandskog ledenog pokrova, te nešto malo i razvojem planinskih ledenjaka. Prvi veliki, pravi glacijal na sjevernoj hemisferi uzeli smo da je bio Mindel. Kombiniranjem ovih triju krivulja dobili smo realnu krivulju glacioeustatičkih fluktuacija morske razine u najvažnijem dijelu kvartara (sl. 36).

Promatranjem dijagrama kvartarnih glacioeustatičkih fluktuacija može se vidjeti da je *eustatički pad razine svjetskog mora u pre- Günzu bio vanredno važan faktor; trajanje pre-ginčkih faza bilo je tako dugo da je eustatički pad razine mora potpuno poništio utjecaj glacioeustatičkih dizanja razine uzrokovanih otapanjem leda u toku djelomičnih deglacijacija antarktičkog ledenog pokrova u interglacijalima Tiglien i Waalien* (i u ostalim starijim fazama). Uzet ćemo jedan primjer. U skladu s prijašnjom pretpostavkom, najniža glacijalna razina u toku Donaua bila je negdje u sredini toga glacijala, a bila je na visini od 99 m. Od toga momenta počela je djelomična deglacijacija antarktičkog ledenog pokrova. Međutim, od sredine Donaua do kraja prve trećine interglacijala Waaliena morska je razina pala (eustatički pad) za 46 m. Da nije bilo djelomične deglacijacije Antarktike, razina bi pala na 53 m ($99 - 46 = 53$). Ali, u istom razdoblju djelomičnom deglacijacijom Antarktike morska razina se digla za 27 m, pa je na kraju prve trećine Siciliena morska razina bila na visini od 80 m ($53 + 27 = 80$). Kako se vidi, eustatički pad morske razine bio je znatno veći od glacioeustatičkog izdizanja razine, pa je ona i dalje — usprkos djelomičnom otapanju antarktičkog ledenog pokrova — postepeno ali konstatno padala sve do najniže razine Siciliena, koja bi faktički morala odgovarati maksimalnoj interglacijalnoj razini. Vidi se, dakle, da za Kalabriju i za Sicilien (i za sve starije razine) vrijedi paradoks da su »najviše« interglacijalne razine niže od »najnižih« glacijalnih razina; to bi bila posljedica dugog trajanja starijih faza kvartarne glacijacije kada je eustatički pad razine *poništavao* dizanje razine uzrokovano djelomič-



Sl. 36. Fluktuacije morske razine u kvartaru. Sp., spektar interglacijalnih terasa. Wa., Waalien; A., Aftonian; Mi., Mindel; Y 1, Yarmouth 1; Mü, Mühligergian; Y 2, Yarmouth 2; S. Sangamon; W. Würm

Fig. 36. Sealevel fluctuations during the Quaternary. Sp. spectrum of the interglacial sealevel positions, or the spectrum of the interglacial shorelines

nom deglacijacijom Antarktike. Tako se nameće rješenje problema iz stratigrafije starijeg dijela pleistocena; naime, mogao bi se riješiti problem postojanja borealne faune u Kalabrienu i Sicilienu. Riješen je — kako se vidi na grafikonu — konstantiranjem činjenice da Kalabrien i Sicilien najvećim dijelom pripadaju glacijalima (Biber, odnosno Donau), a tek najniži i najviši dijelovi pripadaju interglacijalima; tj. najveći dio Siciliena i Kalabriena mora sadržavati hladnu faunu između horizonata s toplom faunom. Predloženim mehanizmom rješava se i paradoks da pojava tople faune u gornjim dijelovima Kalabriena i Siciliena nije praćena transgresijom postglinčkih razmjera; transgresiju je poništio pad razine mora. To je u skladu s Woldstedtovim zaključkom²¹⁹ da donje dijelove Kalabriena i Siciliena karakterizira hladna fauna, a gornje dijelove bi trebalo priključiti interglacijalima; donji dio Kalabriena paralelizira s glacijalom Brüggem (Biber), a gornji dio s interglacijalom Tiglien, dok donji dio Siciliena paralelizira s Eburonom (?), a mlađi dio s interglacijalom Waalien (?).²²⁰

Na dijagramu se vidi da su sve razine Siciliena i Kalabriena zapravo spojene u jedan neprekinut niz, jer je pad razine bio vrlo polagan, a glacioeustatičke fluktuacije malene u poređenju s eustatičkim padom razine. Tako se objašnjava zašto su Sicilien i Kalabrien abradirali vanredno široke terase (ili bolje: niveoe), neusporedivo šire od terasa abradiranih u postglinčkim interglacijalima.

Nešto slično vrijedi i za recesione faze kvartarne glacijacije. Kao primjer uzet ćemo posljednji ciklus. Krajem prve trećine interglacijala Sangamon morska razina je bila na visini od 17 m (Monastirien). Do sredine glacijala Würm, samo zbog općeg eustatičkog pada, razina je morala pasti za 9,6 m. U istom periodu došlo je do ekspanzije svih ledenih pokrova, pa je morska razina pala na —100 m. To znači da je pad razine iznosio $100 + 9,6 = 109,6$ m). Od sredine Würma započeo je obratan proces — faza deglacijacije. Konstrukcijski smo došli do zaključka da će maksimalna interglacijalna razina biti za 3.500 god.²²¹ U fazi od minimalne razine u Würmu do naredne maksimalne interglacijalne razine (za 3.500 god.) doći će do potpunog nestanka virmskog leda (ekvivalentno stupca vode od 109,6 m). U isto doba, zbog progresivne deglacijacije antarktičkog ledenog pokrova, morska razina će se u istom periodu izdići još za 2,6 m, što bi zajedno iznosilo $112,2$ m ($109,6 + 2,6 = 112,2$). Međutim, u periodu od

²¹⁹ P. Woldstedt, op. cit., str. 302.

²²⁰ Prema tome, najveći dio Siciliena pripada glacijalu Donau, a tek jedan manji (najstariji i najmlađi dio) interglacijalu Tiglien i Waalien. Kad bismo — kao i u post-Günzu — bili dosljedniji, onda bismo za Sicilien morali označiti samo razinu od 99 m; nikako se ne bi smjelo reći da Sicilienu pripadaju razine na 80—100 m. To bi isto bilo kao kad bismo, npr., za Monastirien rekli da mu pripadaju razine —110 do +17 m. Tako bi i Kalabrienu pripadala razina od 200 m, i tim bi dijelovima u oba slučaja morala odgovarati topla fauna.

²²¹ Iako smo do ovog zaključka došli konstrukcijski, on se dobro slaže s većinom procjena recentnog izdizanja morske razine, koje iznose (prosječna vrijednost) oko 1,18 mm/god., što bi — uz pretpostavku da će izdizanje razine i dalje teći kontinuirano — iznosilo 4,19 m. (Iscrpan prikaz ovog problema vidi u H. Wexler, Ice budgets for Antarctica and changes in sea-level, J. Glaciology 3, 1961, str. 867.)

minimalnog stanja razine u sredini Würma do maksimalnog položaja razine za 3.500 god. nivo će, zbog eustatičkog pada razine, morati biti niži za 7,2 m. Prema tome, najviša razina sadašnjeg interglacijala (za 3.500 god.) bit će 5 m viša od sadašnje razine ($112,2 - 7,2 = 105$; $105 - 100 = 5$ m). Slično je bilo i u svim ostalim ciklusima (podaci su na tab. 2).

Regresija u Mühlbergieniu bila je uglavnom posljedica glacijala na Antarktici; zato je pad razine bio mnogo manji (24,3 m) nego u drugim susjednim glacijalima. To je regresija reda veličine preminidelskih glacio-eustatičkih fluktuacija; jer ih je uzrokovao isti faktor.

ZAKLJUČAK

Teorija uzroka klimatskih promjena ide u red najkompleksnijih nauka, jer je klima rezultanta djelovanja brojnih faktora koji se neprekidno mijenjaju i u vremenu i u prostoru, pa se teško može kvantitativno odrediti njihova veličina i predvidjeti njihov budući tok. U ovom radu pokušali smo najprije utvrditi osnovni uzrok klimatskih promjena najvišeg reda, klimatske promjene koje su kulminirale u ledenim razdobljima. Došli smo do zaključka da ledena doba nastaju samo na kontinentima u visokim geografskim širinama, kontinentima koji su potpuno ili djelomično okruženi oceanским masama; neposredni povod za postanak ledenih pokrova bili bi orogeni i epirogeni pokreti. Termička izolacija i posebna atmosferska i morska cirkulacija razvijaju se u smjeru povoljnog za ekspanziju ledenih pokrova, koji prelaskom izvjesne granice prestaju biti samo pasivna posljedica klime. Ledeni pokrovi kontinentskih dimenzija pulsiraju u skladu sa svojim dimenzijama, odnosno s veličinom ablacije i akumulacije; budući da oni postaju aktivan klimatski faktor, svojim postojanjem postepeno mijenjaju (»hlade«) klimu, koja nakon određenog vremena postaje nepovoljna za daljnju egzistenciju leda. Opće zahlađenje bio je jedan od uvjeta za nastup glacijacije; preveliko zahlađenje počinje negativno djelovati na razvoj ledenih pokrova, koji se počinju povlačiti i konačno nestaju pod djelovanjem faktora što su ih oni sami stvorili. Klimatske promjene u toku glacijacije posljedica su pulsiranja ledenih pokrova, tj. one se mogu objasniti bez djelovanja ekstraterestričkih faktora. Prema tome, za nastup glacijacije potreban je povoljan prostorni razmještaj kopna i mora u visokim geografskim širinama, a klimatske promjene u okviru jedne glacijacije (smjena glacijala i interglacijala, stadijala i interstadijala) jesu posljedica, a ne uzrok pulsacija ledenih pokrova.

Koristeći se općim poznavanjem prirode, mora se poći sa stanovišta da je i glacijacija zakonomjeran proces svoje vrste, pa smo pretpostavili da je pulsiranje glacijacije kao cjeline manje-više pravilan proces, koji je tačno određen u odnosu na njeno ukupno trajanje i trajanje pulsacija nižeg reda. To je bila osnova za opis mehanizma kvartarne glacijacije, izračunavanje apsolutnog trajanja pojedinih njenih faza i dr. Opisani hipotetički mehanizam može se primijeniti na sve glacijacije, bez obzira na njihovu starost. Na to upućuju i eventualno poznati detalji.

SUMMARY

THE GEOGRAPHICAL BACKGROUND TO ICE AGES

A CONTRIBUTION TO THE THEORY OF CAUSE AND EFFECTS OF GLACIATIONS

by T. Šegota

Glaciation is a colossal natural process which influenced all processes on the earth. On the basis of certain results and known facts the author describes the glaciation as a regular process, i. e. the evolution of the glaciation as a whole, the duration of all glacial phases, and the dimensions of erosional and accumulated forms caused by the glaciation. These are more or less strictly determined inside the general frame of the glaciation, or they are proportional to the duration of corresponding phases of the glaciation. Like all natural processes of the same order of magnitude, the glaciation was subjected to some irregularities which to a certain degree masked the main course of the process; however, such secondary processes were neglected in order to discover the main trend of the evolution of all glaciations. The glaciation is a spatial-temporal dynamic system in endless change in which the cause and effect are not synchronous. Just by this temporal difference one can explain the regime and the basic pulsations of the ice sheets. In accordance with the terrestrial view on the causes of the glaciations the author supposed that the active climatic influence of the ice sheets and the frozen sea is by far the most important factor determining the evolution of the glaciation. The ice sheets pulsated solely under the influence of their physical and morphological properties inherent in themselves, as well as under the influence of climatic changes caused by their existence.

The origin of the glaciation can be defined as the creation of geographic environment for the optimal relation between the quantity of precipitation and the temperature, or the accumulation and the ablation. Optimal glaciogenic combinations of precipitation and temperature can be achieved by the interrelation between three factors: (a) the vicinity of the pole, (b) favourable geographic distribution of land and sea, and (c) orogenetic and epirogenetic movements. The vicinity of the pole determines the annual march of the temperature, i. e. the amount of summer ablation which is a very important regulator of the regime of the ice sheets. Extremely slow movement of the pole towards the continent, which will be glaciated, is responsible for equally slow cooling of the earth in the preglaciation period. Suitable distribution of land and sea enables the transport of humid maritime air to continent which will be glaciated. Orogenetic and epirogenetic movements create a high relief, and close relationship between a high relief and the glaciation is a well-known fact; mountain glaciation acts as a »trigger« on a continental glaciation (the known succession: mountain glaciers-piedmont glaciers-ice sheet). Accordingly, the ice sheet (sheets) can be formed only by the combined, synchronous action of all three factors, i. e. the mountain-building processes alone cannot originate the glaciation, as neither the other two factors by themselves. The said combination is rarely achieved, and this is the reason why glaciations are an extremely rare phenomena. So we can conclude that the glaciation originates when the land-mass (or masses) of continental dimension in a moment of orogenetic and

epirogenetic movements is located in high latitudes. Hence, the most intense orogenic and epirogenetic movements cannot initiate the glaciation on a continent in low latitudes in spite of the fact it is surrounded by the oceans (e. g. the continents on the northern hemisphere during the Permo-carboniferous times). Just so one must suppose that Gondwana during Permo-carboniferous glaciation was in the high latitudes.

Due to the combination of the initial factors the glaciation can be: (a) monopolar, if the conditions for the origin of the glaciation exist only in one hemisphere (in the same time the other hemisphere is not glaciated; such a situation was apparent during the Permo-carboniferous times), and (b) bipolar, if the ice sheets developed on both hemispheres (as during the Quaternary time). Accordingly, the existence of the glaciation in one hemisphere, and the existence of both desert and tropical luxuriant vegetation in the other, is quite a natural state; this is only one of the three possible combinations.

The magnitude and the geographic distribution of glaciated continents and seas determine the geographical structure of the glaciation, which can be of: (a) Antarctic or continuous type, if the glaciated continent is more or less a unique circular land-mass surrounded by the ocean. Because the ice sheet is continuous it pulsates as a whole; and (b) Arctic or cellular type, if the individual ice sheets surround the central or mediterranean sea which is frozen during the glaciation. The ice sheets and the frozen sea unite in one enormous ice body. The ice sheets pulsate more or less synchronously because the whole system makes a climatic unity.

In the first chapter the author describes the mechanism of the pulsation of hypothetical ice sheet to discover the fundamental process characteristic for all ice sheets. There are two fundamental types of pulsation: expansion and recession which in essence are very similar, but the relation between the accumulation and the ablation is different. Fig. 2. describes the elemental pulsation of a relatively small circular ice sheet with equal accumulation from all sides. In a state of quasi-static equilibrium there operate two processes: (a) due to the ablation below the snowline the ice front retreats (—), and (b) above the snowline accumulation of a certain amount of snow and ice (+). But, due to inertia the ice sheet does not react immediately with relatively small changes. Only after a certain length of time does a bigger volume of ice (greater height) together with a smaller radius of the ice sheet create a new situation: the ice sheet expands, and in the phase of the next quasi-static equilibrium the radius and the height of the ice sheet are bigger than in phase (a).

Equal accumulation from all sides is rather the exception than the rule (Fig. 3.). In this case the snow (or the ice) will accumulate mainly on one side of the ice sheet as it grows towards the snow-bearing wind. The mechanism is quite similar to the previous case; after a temporal retreat the ice sheet will expand, but mainly in one direction, and the profile of the ice sheet in this phase (c) will be quite different from that in phase (a).

In both cases the retreat and the advance is not the result of climatic change; the elemental pulsation is the result of the relation between the radius and the height of the ice sheet. Climatic change is caused by the advance (cooling) and the retreat (warming) of the ice sheet and is in fact the effect of the pulsation of the ice sheet.

The expansion of the ice sheet consists of many elemental (static) pulsations. The ice sheet (Fig. 4.) becomes an enormous ice body which by the mere fact of its existence slowly changes the climate. One of the most important changes introduced by it is the orographic distribution of precipitation which increases greatly on the border of the ice sheet. In a certain moment of time it became even higher than the geometric center of the ice sheet, which lost any importance for the future development of the ice sheet. Its central part is »fossilized« and the pulsation of the ice sheet is restricted to its border: that is the active part of the ice sheet. In spite of its huge dimensions even in this phase the ice sheet pulsates due to a favourable relation between the radius and height of the ice sheet (which governs the flow of the ice and the fluctuations of the terminus of the ice sheet). Accordingly, in a mathematical treatment of the mechanism of the ice sheet's

pulsation one should neglect the existence (dimensions) of the central part of the ice sheet. Similar processes characterize the evolution of the Arctic (cellular) type of ice sheet (Fig. 5). The difference is the expansion in one direction.

The immediate effect of the existence of a huge ice sheet (sheets) is a pronounced cooling and drying of the climate. Such fundamental change of the environment must influence the evolution of the ice sheet. In a recessional phase of the ice sheet's evolution the elemental pulsation (Fig. 6. and 7.) is in essence similar to the elemental pulsation of the expanding ice sheet. But the difference between the ablation and (feable) accumulation is unfavourable. The accumulation cannot compensate loss of the ice caused by the ablation; the ice sheet rhythmically retreats, but in the phase (c) the dimensions of the ice sheet are smaller than those in phase (a) in spite of certain advances after phase (b). Like in a previous case the retreat of the ice sheet consists of the series of static elemental pulsations. The characteristic of the recessional phase is a constant deficiency of the ice; the ablation exceeds the accumulation. Quite contrary to the phase of the expansion when the accumulation exceeds the ablation.

The immediate effect of the ice sheet's growth is the change of its profile, and one should conclude that the elliptic profile (or the combination of two half-parabolas) is a profile of a small ice sheet of Antarctic type, with equal accumulation from all sides. But, an enormous ice sheet of the same type (like the Antarctic to-day) due to the orographic effect of its ice body has a quite different profile; the central part of the ice sheet is concave, and the profile of the ice sheet is a corresponding curve. On the other side, the profile of the ice sheet of the Arctic type is very similar to the ballistic curve. Accordingly, there exists no »Normalprofil« (W. Meinardus) of the ice sheet; the profile is quite different in each stage of the ice sheet's evolution; besides this, it is determined by the direction of the snow-bearing wind.

From the schematic representation of the elemental pulsation of the ice sheet one can see that volume of the ice (Fig. 8.) does not grow synchronously with the areal extension. This is the result of the inertia; the ice sheet does not react immediately to external influences. Maximum volume of the ice pre-dates the maximum areal extension of the ice sheet. The volume of the ice increases side by side with the retreat of the ice sheet, or the area of the ice sheet increases synchronously with the diminution of the volume of the ice. This means that during the retreat of the ice sheet there is an accumulation of ice for a future expansion of the ice sheet. In practice this means that the majority of ice which caused the advance of the ice during the glaciols (and stadials) was accumulated during the interglacials (and interstadials). From the known facts (Fig. 9.) one can conclude that the phase of the expansion of the ice sheet was much longer than the recession; it seems that the ice sheets retreat 4 times faster than they advance. However, the maximal volume of the ice is attained in the middle of the glacial (stadial), and the minimum is in the first third of the interglacial (interstadial). Hence, the temperature curve of the glaciation is not a sinusoidal curve, but an asymmetrical one.

In accordance with the described mechanism, the flow of the ice in the ice sheet is complex (Fig. 10.). The ice flows radially only in the phases when the ice sheet is relatively small. In an enormous ice sheet (B) the ice in the central part is immobile, and it flows only in the border zone. This means that glacial erosion attacks the ground below the central part of the ice sheet two times, at the beginning and at the end of the glaciation; during the phase of maximal areal extent of the ice sheet the ground is protected by the ice. Beyond the cone of the immobile ice the ground is not protected by the ice; this is the zone of strong glacial accumulation and erosion.

The intensity of the glaciation is in fact its »cooling power«, it is the result of radial evolution of the ice sheet (sheets). Intensity of the glaciation is closely connected with the areal extension of the ice sheet, and not the volume of the ice. On the basis of some fundamental facts one can draw some peculiar conclusions (Fig. 11.). One of the results of the existence of the ice is a cooling and drying of the climate. Hence, the bigger the glaciated area, the faster the cooling and drying of the climate, and this process is unfavourable for the existence of the ice. This

means that there exists a certain limit to the cooling (warming) and drying (or of humidity) which is important for the existence of the ice. A cool and moist climate is the first prerequisite for the extension of the ice. However, an enormous areal extension of the ice causes unfavourable conditions (cold desert climate) for the existence of the ice. It seems that the Antarctic ice sheet has very nearly reached optimal dimensions, but the area of the ice on the northern hemisphere in each glaciations was too big. Hence, the bigger the glaciated area, the shorter duration of the ice age, or the duration of the glaciation is inversely proportional to the glaciated area. In spite of enormous differences in the duration of the glaciations the relation between the phases of the expansion and the phase of the recession is always the same (4:1).

The evolution of the glaciation is not a continuous process, but it consists of a series of retreats and advances; on a general curve of the glaciation the pulsations due to glacials and interglacials must be superimposed (Fig. 12.). The duration of glacials and interglacials is not equal and also there exist the difference in the duration between the glacials and interglacials in the pre-maximum and post-maximum phase of the glaciation. In general, the duration of the glacials and the interglacials augments towards the maximum of the glaciation, and diminishes from the maximum towards the end of the glaciation.

Schematic representation of the spacial relation between the ice sheet of the Antarctic type and the chionosphere is given in Fig. 13. The uplift of the continent surrounded by the sea at the time when the pole was in the vicinity caused the glaciation. The expansion of the ice sheet creates a special glacial atmospheric circulation which in the beginning is favourable for the expansion of the ice sheet. Enormous dimensions of the ice sheet (c) are responsible for excessive cooling of the sea and the atmosphere and the result is the total depression of the chiosphere. By far the greatest part of the ice sheet (note the importance of a frozen sea!) is under cold desert conditions with very small accumulation. The ice sheet disappears in the sea due to stronger ablation than accumulation. The expansion of the ice sheet is a result of the accumulation of the ice before it reaches maximal area. Accordingly: (a) the expansion (or the recession) of the ice sheet is not the result solely of the amount of the precipitation in a given moment of time but it is due to a certain degree to the effect of a former accumulation, and (b) the belt of maximal precipitation must coincide with the active belt of the ice sheet to influence the mass balance of the ice sheet. The ice sheet can retreat in spite of a certain increase in precipitation around the coast belt. Only the substantial increase of the precipitation in the zone of the »ice ridge« after a certain time can reverse the process.

The cellular glaciation is much more complex (Fig. 14.). Two land-masses are separated by the inland sea. Like in a previous case the uplift of the continents in a moment when the pole is inside the inland sea is necessary for the initiation of the glaciation, but that is not enough. In a case of a cellular glaciation the inland sea must be isolated from the ocean in lower latitudes. Thermal isolation of the inland sea is a *conditio sine qua non*, and the immediate cause of the isolation is the uplift of the submarine sill. Due to the lack of the land in the central area, the ice sheets can expand only in the neighbouring continents, and they cannot be united in one system, but they are separated by a frozen sea. The enormous dimensions of the glaciated area together with the rapid and strong cooling and drying of the climate, are the reasons why some parts of the continents (and the islands) in high latitudes are not glaciated, but on the other side the ice sheets advanced far to the equator. They expand mainly towards the snow-bearing wids' and their profiles are similar to the ballistic curve. The separate ice sheets, as an unity in the climatological sense of the word, should pulsate more or less synchronously but there must be some temporal differences due to the different dimensions of the ice sheets.

All that has been said can be summarized in a schematic representation of the general course of the glaciation (Fig. 15.). The favourable distribution of land and sea, the vicinity of the pole, and the uplift of the land, enable the continents and the oceans to be thermally isolated in high latitudes, and thus the final result is the glaciation. From a moment when the ice sheet (and the frozen sea) became

a geographic factor, all three initial factors lose any significance for the future evolution of the glaciation. The ice sheet is no more just a passive consequence, it becomes an active geographic factor which changes the natural environment. In this phase the course of the glaciation is determined by very complex interactions between the glacial atmospheric circulation, the intensity of the oceanic circulation, the extension of the glaciated area, and the height, and horizontal extension of the land-masses. The relative importance of the said factors change in time and space and the tendency of Nature is to develop some processes to the last extremity. Certain cooling of the sea and the atmosphere, as well as strengthening of the atmospheric circulation was a prerequisite for the glaciation. However, in the extreme aridity of the climate and cooling of the sea water far below a certain limit is the fundamental cause of its final disappearance. The glaciation itself creates the mechanism which governs both the pulsation of the ice sheets, its evolution, and the factors which are responsible for the disappearance of the ice sheets. The disappearance of the glaciation is in fact its annihilation, and no extraterrestrial factors are necessary to explain the evolution of the glaciation.

The glaciation creates a special glacial atmospheric circulation. The existence of the glaciated land and sea is responsible for the development of a glacial semi-permanent anticyclone and the intensifying of the frontal activity. A highly developed glacial anticyclone is an impermeable barrier to the depressions and this is one of the reasons for the thermal isolation of the ice sheet, and one of the final reasons for the diminution of precipitation in the glaciated areas. Accordingly, the glacial atmospheric circulation is a thermally isolated system with a semipermanent anticyclone in the centre and a belt of travelling depressions on the periphery.

The drop of temperature in the pre-glaciation period was very slow and it was caused by the migration of the poles to the future glaciated lands. Relatively rapid expansion of the glaciated areas was responsible for the catastrophic cooling in a brief period. So one must discriminate two factors which caused the cooling during the glaciation.

The temperature of the air during the glaciation (Fig. 16.) is a function of the radial extension of the glaciated area. Due to the pulsations of the ice sheet the drop (in the first phase) or the increase (in the second phase) of the temperature was not continuous but it was temporarily interrupted by cooling or by warming of the climate (glacials and interglacials). It is important to note that the temperature when the ice is waning is much lower than during the beginning of the glaciation. Accordingly, the glaciation is characterized by general cooling of the climate (Fig. 16.); deglaciation is not a simple return to the situation immediately before the glaciation.

The Quaternary glaciation of the Antarctic was not in perfect agreement with the theory, because the dimensions of the land mass which is buried by its ice is limited, and in many glacials the area of the ice sheet was equal (Fig. 18.). In spite of these, the mere existence of the ice sheet was quite enough to continue the cooling of the climate; even in such a case a general continuous drop of the temperature is evident (Fig. 17.); one can conclude that the glaciation of the Antarctic is still far from the phase of complete waning. The temperature curve of the Würm glacial (Fig. 19.) is in essence similar to the hypothetic curve (Fig. 16.):

The precipitation curve (Fig. 20.) is very complex, because the maximum precipitation does not coincide with the areal extension of the ice; the amount of the precipitation grows until the middle of the glaciation, and then slowly decreases, but the ice sheet expands in spite of slow diminution of the amount of precipitation. After a certain time there appears a consequence of a disproportion between the accumulation and the ablation. A certain increase of the precipitation at the end of the glaciation cannot change the general course of the evolution. One must note that when the ice is waning the amount of the precipitation is somewhat smaller than at the beginning of the glaciation and far smaller than at the maximum. Smaller precipitation and a lower temperature is a cause of the disappearance of glaciation. The glaciation (in »normal« cases) is an irreversible process; the glaciation cannot be repeated in spite of the fact that the initial geographic factors practically do not change during the glaciation.

A quite peculiar pulsation of the Antarctic ice sheet did not change the general course of the precipitation (Fig. 22.), due to the same reasons as in the case of the temperature.

The synchronism between the glacials and the pluvials is out of the question. Graphical representation of the relation between the expansion and the retreat of the ice sheet and the pluviation is given in Fig. 21. In the first phase one must note two synchronous processes: (a) the belt of maximum precipitation being pushed to the equator, and (b) the amount of the precipitation increases until phase (b). After that phase the amount of precipitation diminishes in spite of the advance of the ice sheet. At the end of the glaciation the belt of maximum precipitation returns to its previous position but the absolute amount of precipitation is smaller than at the beginning of the glaciation.

From this conclusion that the dimensions of the Antarctic continent are relatively small, one can arrive at the results that the area of the Antarctic ice sheet during the largest part of the Quaternary glaciation was in fact more or less equal (Fig. 22.). In spite of this, the mere existence of the ice sheet was a sufficient reason to suppose that the general course of the glaciation in the southern hemisphere as not essentially disrupted. Climatograms from Africa (Fig. 23. and 24.) are in clear agreement with our schematic diagram (Fig. 22.), and one sees clearly the damped pulsation of the pluviation. However, it is necessary to note the fact that the climatograms of Africa represent the younger part of the Quaternary pluviation (after a new chronology of the Pleistocene, i. e. the right part of the curve A in a Fig. 22.). Besides this, our diagram represents only the absolute amount of the precipitation, and not the degree of aridity or humidity as was done in the climatograms.

In accordance with our presuppositions about the Quaternary glaciation's mechanism (see the text below) the fluctuations of Lake Bonneville (Fig. 25.) is in agreement with previous examples. One sees that the highest level of the water (i. e. the maximum pluviation) was much earlier than the maximum of the last glacial on the North American continent.

The fluctuation of the sealevel is an effect of the volume of water bounded (and released) for the ice in the ice sheet. Fig. 26. shows the relation between the sealevel fluctuation and the evolution of the ice sheet during the hypothetical glaciation (without the superimposed glacial / interglacial changes). It is important to note the fact that the lowest position of the sealevel is not at the time of the maximum areal extension of the ice sheet, but much earlier. After the lowest position, the sealevel rises synchronously with the expanding ice sheet, and when the maximum areal extension of the ice sheet has reached the biggest part of the ice melted away.

The fluctuation of the sealevel (Fig. 27.) is caused by two processes: (a) the pulsation of the ice sheet, and (b) the eustatic drop of sealevel. The actual curve representing the fluctuation of the sealevel is a combination of two curves. Due to the enormous differences in the duration of the glaciation, the curve representing the sealevel fluctuation can be very different because the eustatic fluctuation in some cases can overcompensate the rise of sealevel, or accelerate its fall.

One of the most important factors determining the formation of shorelines is the duration of the abrasion. In such a case (Fig. 28.) the difference in the height between two successive terraces diminishes seaward together with their horizontal dimensions which are more or less regular.

The deposition of the moraines is not a chaotic process. It is possible that during the phase of the advance the ice sheet will destroy the moraines, but recessional moraines will stay for a certain time. The height and the distance as well as the volume of the deposited material (Fig. 29.) will regularly decrease from the maximum glacial stage to the last glacial phase. The deposition of the loess is something more complex because the aridity of the climate is no less important than the duration of the deposition (Fig. 30.). The thickness of loess layers decreases from the layer belonging to time of maximal glacial, towards the beginning and the end of the glaciation.

The altitude of the show-line in the mountains is in fact governed by the pulsations of the ice sheets. The altitude of the snow-line and the spacial distri-

bution of the moraines (Fig. 31.) are closely connected. The moraines deposited during the phase of expansion of the mountain glacier will probably be destroyed by the expanding ice, and only the moraines of the recessional phase will be preserved. Both the volume and the altitude of the moraines as well as the distance between the successive moraines decreases regularly from the lowest to the highest moraine.

Lake shorelines (Fig. 32.) correspond to the changes in the volume of the lake's water. Accordingly, the highest terrace corresponds to the moister first phases of the glaciation, and the shorelines abraded during the maximum of the glaciation and in the phase of the recession of the ice sheet have been much smaller and lower because this period corresponds to the dry glacial climate. In some cases the oldest shorelines can be connected as one big shoreline, and each successive younger shoreline is lower and narrower. Hence, the highest and the broadest shoreline was not abraded during a maximal areal extent of the ice sheet but much earlier.

The formation of the river terraces (Fig 33.) is one of the most complex processes induced by the glaciation, and one must suppose that the main factor which was responsible for their formation was the fluctuation of the climate. Due to the fact that the duration of accumulation and erosion have never been equal, the dimensions of the river terraces are different. Like in a previous case the difference in the altitude and the horizontal dimensions of the terraces decrease from the oldest to the youngest.

The Quaternary glaciation is an extremely complex problem because it is a bipolar glaciation and the structure of the glaciation is different (cellular glaciation in the northern hemisphere and the continuous glaciation in the Antarctic Continent), an ideal combination to enable the endless complexity of the processes.

In accordance with recent scientific results the evolution of the Quaternary glaciation can be imagined in a following manner. The climatic conditions, which were favourable for the expansion of the ice sheets are the final result of a general cooling of the Earth during the Tertiary. The glaciogenic conditions were much more favourable on the Antarctic Continent than in the northern hemisphere, and the beginning of the glaciation in the Antarctic Continent can be traced well before the beginning of the Quaternary as commonly defined in the northern hemisphere, and the mountain glaciation probably started long before the vast ice sheet was formed, probably a few million years before, i. e. much earlier than in the northern hemisphere. The Antarctic Ice Sheet had come into existence as the result to the growth and coalescence of many local glaciers. The pulsations of this embryonic Antarctic. I. S. (which, naturally, must have been a more or less regular process) was the ultimate cause of relatively slight climatic pulsation in the Upper Pliocene which, however, influenced the climate only in the southern hemisphere (K, L, M, N glacials in the Tab. 1.). All the glaciogenic factors were favourable for the expansion of the ice sheet, and the ultimate result was an enormous Antarctic I. S. The atmosphere and the oceans are extremely sensitive mechanisms, and it was not possible that such a fundamental change of equilibrium did not influence the meteorologic parameters and the temperature of the ocean water. This was a very long period when the Quaternary glaciation was confined exclusively to the Antarctica. By the mere fact of its existence the Antarctic I. S. continued the rapid cooling of the Earth (Fig. 17.) and its pulsations (plus the influence of the Greenland I. S.) were the cause of the earliest slight climatic changes of the higher order in the northern hemisphere. Accordingly, this was a very long period (5 or more glacials and 4 or more interglacials) when glaciation was confined only to the southern hemisphere. This is the explanation of a problem why the traces of the pre-Günz glacials are so scanty: there were no ice sheets in the northern hemisphere. Hence, slight climatic changes, the invasion of the »northern guests« in the Calabrian and the Sicilian, first pluvials and first traces of the mountain glaciations (Biber and Donau) as well as many other signs of periodic slight cooling and warming in the northern hemisphere were mainly the effect of the pulsation of the Antarctic (and Greenland) I. S. By far the greatest part of the Quaternary glaciation was confined only to the southern hemisphere.

It is important to remember the following 3 facts: (a) From the beginning of the glaciation much time had passed, and the sealevel had fallen at least by 200 m. (b) The Antarctic I. S. had become an enormous ice body, and the glacial eustatic fluctuations caused by it had a certain importance. (c) Vertical movement of the sea bottom in the region of the Wyville Thomson Ridge, combined with two the other factors, created an extremely critical situation. A new glacial phase in the Antarctic Continent (Günz) caused a certain drop of the sealevel; this was a direct cause of a thermal isolation of the Arctic Ocean which in fact was caused by the interruption of an influx of warm Atlantic waters into the Arctic Ocean, the impulse which initiated the first universal glaciation — Günz. This was in the full sense of the word the beginning of the Quaternary glaciation in the northern hemisphere; the Quaternary glaciation became a bipolar glaciation. The same mechanism initiated all post-Günz glacials in the northern hemisphere. However, in the last few years there have been accumulated a lot of facts which undoubtedly disprove the belief that there were extensive ice sheets in the northern hemisphere during the Günz glacial. In such a case all processes which initiated the first universal glacial should have occurred a little later, at the beginning of the Mindel glacial; i. e. the first universal glaciation — and at the same time the first glacial phase in the northern hemisphere — was the Mindel glacial. Like all other pre-Günz »glacials« in the northern hemisphere, Günz was only a relatively cool climatic phase somewhat cooler than the »glacials« before it. This conclusion one can prove by the diagram showing the intensity of the atmospheric circulation (Fig. 34.). It is clear that the intensity of the circulation was much stronger in the phase 2, 4, 6 and even 8 than in the older phases. The factor which intensified the circulation was the glaciation of the northern hemisphere. (The dotted line added by the author represents the intensity of the circulation in a case of non existence of the ice sheets in the northern hemisphere.)

It is clear that the glacial eustatic lowering of the sealevel which was caused by the pulsation of the Antarctic I. S. can but need not have initiated the thermal isolation i. e. the glaciation in the northern hemisphere (it must be combined with the depth of the Wyville Thomson Ridge). One can suppose many possible combinations, for instance, in such a case were the Wyville Thomson Ridge had been very deep the ice sheets in the northern hemisphere could not have been formed at all and the Quaternary glaciation would have been confined only to the Antarctic Continent. It was also possible that the ice sheets in the northern hemisphere could have been formed only once during the Quaternary, or that one glacial phase has been omitted. This might be the clue to the problem of the so-called »Great Interglacial« (Fig. 35.). It is quite possible that the Wyville Thomson Ridge was too deep during the lowering of sealevel in the first post-Mindel glacial of the Antarctic Continent; the new Antarctic glacial had no equivalent in the northern hemisphere because the interchange of the water between the Atlantic and the Arctic Oceans was not interrupted. This means that the Arctic Basin was not thermally isolated (like in all pre-Mindel times). After this glacial in the southern hemisphere there came a new interglacial; all in all one can suppose this was a very long interglacial in the northern hemisphere, and at the same time there were two »normal« interglacials and one »normal« glacial in the southern hemisphere. If all this is correct one must conclude that in the post-Mindel time in the southern hemisphere must be added 1 glacial (hypothetical Mühlbergian according to the Alpine chronology) and 1 more interglacial. To summarize, during the Quaternary period in the northern hemisphere there were probably 3 (or 4) glacials, 2 (or 3) interglacials, 8 cool phases and 8 warm phases, and at the same time 11 glacials and 10 interglacials in the southern hemisphere. This means that in the genetic sense one can suppose that — on a worldwide scale — during the Quaternary period there were about 11 glacials (or corresponding cool phases) and 10 interglacials (or corresponding warm phases).

In accordance with these assumptions one suppose the following possibility. In a case that during the Quaternary glaciation of the northern hemisphere the ice sheets were formed only once, the Quaternary glaciation in the strict sense of the word would not last much more than about 100,000 years. In spite of its short duration such a glaciation would leave the traces of its existence (fossil soils, loess,

shorelines and terraces etc.) as the result of the pulsations of the ice sheet. If we recall the conclusion that the duration of the glaciation is inversely proportional to the areal extension of the ice and that the glaciation of the northern hemisphere during each glacial phase has begun practically from the embryonic mountain glaciation (contrary to the Antarctic. I. S. which was preserved during the interglacials) one can conclude that the glacials in the northern hemisphere (Würm, Riss, Mindel) in fact have been complete glaciations, and not glacials. Due to these quite unusual possibilities for the multiple isolation of the northern hemisphere the glaciation originated few times in a relatively short time, i. e. quite contrary to the all previous cases (at least 230 million years between two successive glaciations). In the usual, »normal« case, the thermal isolation of the Arctic Ocean would initiate a glaciation with a duration inversely proportional to the area of the ice, and after the disappearance of the ice the intense interchange of the water would not enable the initiation of a new glaciation. The multiple Quaternary glaciation of the northern hemisphere was caused by the unusual, in the geologic past probably unique, combination of the initial geographic factors.

Accordingly, if the glacials (Würm etc.) have been the complete glaciations, all secondary pulsations of the ice sheets in the northern hemisphere have been in fact the glacials and the interglacials (and not the stadials and interstadials according to the present terminology). Hence, the areal extent of the ice does not determine only the duration of the glaciation, but even the duration of the pulsations of the lower orders. It seems, that due to the exponential relationship between the area and the duration of the glaciation one can conclude that the duration of the glaciation of the optimal dimensions (the Quaternary glaciation of the Antarctica) is of the order of 5 million or even more years, and that of the excessively developed glaciation (like Mindel in the northern hemisphere) is of the order of 100,000 years. (This is not in direct contradiction with the fact that the Mindel was longer than the Würm in spite of the bigger area of the ice during the Mindel; the existence of the ice in the previous glacials, as well as the remnants of the Greenland I. S. were responsible for the climate immediately before the expansion of the Würm ice sheets was not as favourable as before for the expansion of the Mindel ice sheets when the climate was optimal for the origin of the glaciation. It is a known fact that the climatic maximum of the Würm was much colder than the maximum of the Mindel in spite of the fact that the area of the Mindel ice sheets were bigger than there of the Würm. Therefore, the duration of the Antarctic glacial have been of the same order of magnitude as the glaciations (Würm etc.) in the northern hemisphere, and the stadials in the Antarctica correspond to the glacials (Brandenburg, Pomeranian and other corresponding pulsations) in the northern hemisphere. (Glaciation is the first order, the glacials and interglacials the second order, and the stadials and interstadials the third order of pulsations.) The detailed study of the varves deposited during the Permocarboniferous glaciation in Brazil (R. Maack) reveal that the duration of the fluvioglacial sedimentation lasted somewhat more than 100,000 years, and each of the four phases of the sedimentation lasted in average 25,000 years. If we suppose that the duration of the Permocarboniferous glaciation was much longer it is possible to conclude that the glaciated area was much bigger than the recent area of the Antarctic I. S. but something smaller than the glaciated area in the northern hemisphere during the Quaternary.

Our hypothetical absolute chronology of the Quaternary glaciation (Tab. 1) is based on the assumption that the pulsations of the ice sheets were not an irregular chaotic proces as one concludes from the present theories. On the contrary, one can speak about a profound, astonishing regularity of all pulsations of the ice sheets or the duration of all climatic changes of the higher order. Our hypothetical chronology is based on the assumption that; (a) The curve of the glaciation is not a sinusoidal, symmetrical curve because the duration of the glacials and interglacials in the phase of the expansion of the glaciation was not the same as the duration of the glacials and interglacials during the phase of the recession (Fig. 11. and 12.), and (b) The maximal Quaternary glacial was the Donau glacial. (This statement is valid in spite of the fact that during the Donau glacial there were no ice sheets in the northern hemisphere; the Donau glacial was a maximal

or the longest glacial stage in the southern hemisphere, and at the same time, the first cool period before the Günz glacial was the longest cool period in the northern hemisphere.) Hence, by the study of all known chronologies one concludes that each older post-Donau glacial (or cool) and interglacial (or warm) phase was by as much as 20 per cent. longer than the younger one. In addition, if one suppose that the duration of the pre-Donau glacials and interglacials was four times that of the corresponding post-Donau glacials or interglacials (at the same time this means that each younger pre-Donau glacial and interglacial was 20 per cent. longer than the older one) it is not difficult to calculate the duration of all glacials and interglacials. The basis for the calculation was the assumption that the ultimate glacial began about 70,000 years B. P., it was in its maximum areal extent about 22,000 years B. P., its end was about 10,000 years B. P., and the duration of last interglacial was probably about 40,000 years. If we suppose that the last (as well as all other) glacials (Würm) in the northern hemisphere were in fact a complete glaciation one concludes that the phase of the expansion was 4 times longer than the duration of the recessional phase (relation 4 to 1). This temporal relationship would be a fundamental law for all glaciations.

From this one can see that the beginning of the glaciation in the northern hemisphere (if one supposes that Günz was the first glacial in the northern hemisphere), i. e. the beginning of the Günz glacial was about 671,000 years B. P. The apex in the evolution of the Quaternary glaciation (the moment of the maximal extent of the Antarctic I. S.) was about 874,000 years B. P. This was the turning point in the evolution of the Quaternary glaciation, the boundary between the phase of slow expansion and the phase of rapid recession of the Antarctic I. S. If the assumption that the phase of expansion is 4 times longer than the phase of the recession in all glaciation, is correct, one can conclude that the pre-Günz Quaternary embraces a span of at least 4 million years. Similarly, if one supposes that the Günz glacial probably is not the last glacial phase of the Quaternary glaciation one concludes that the duration of the whole Quaternary glaciation would be about 5 million years. Very important confirmation of our assumption is the dating of the Tiglian interglacial by means of the fluorine method, namely, K. Richter placed the Tiglian warm interval at $1,500,000 \pm 300,000$ years B. P. which excellently fits the authors' calculation that the Tiglian was begun 1,686,000 years B. P. and its end was about 1,350,000 years B. P.

If our assumptions are correct it is possible to trace the future evolution of the Quaternary glaciation. The duration of the ultimate interglacial was about 40,000 years. Accordingly, the duration of the next interglacial -the interglacial in which the man lives about 10,000 years- will be about 34,000 years. This means that the end of the recent interglacial would be in 24,000 years, i. e. the next glacial (its duration would be about 50,000 yrs) would begin in 24,000 yrs, but only in the case of a thermal isolation of the Arctic Ocean. In the case if the Arctic Basin will not be thermally isolated the ice sheet would expand only in the southern hemisphere, and the effect would be only a certain cooling of the northern hemisphere (like in all pre-Mindel »glacials« and during the Mühlbergian). However, it seems that the Antarctic I. S. is not in the stage of definitive recession; it is quite real to suppose 2 or even 3 future pulsations of the Antarctic I. S. before the ultimate waning of the Quaternary glaciation.

The Quaternary sealevel fluctuation was very complex (Tab. 2. and Fig. 36.) because it was influenced by the following synchronous processes: (a) More or less continuous eustatic drop of sealevel, (b) Fluctuations which were caused solely by the pulsations of the Antarctic I. S. and (c) Fluctuations which were caused by the waning and waxing of the ice sheets in the northern hemisphere. The expansion of the ice sheets in the northern hemisphere were the ultimate cause of marked differences in the amplitude of sealevel fluctuations in the younger part of the Quaternary period. One can suppose that the amount of water released from or absorbed by the Antarctic I. S., compared with those of other ice sheets, was relatively small, it was in the magnitude of 10 per cent. of the total glacial eustatic fluctuation. Owing to the mechanism of the pulsation of the Antarctic I. S. the amount of water (or ice) released or absorbed by it, was not same in all phases; the total volume of the Antarctic I. S. regularly increased by about

3—4 per cent. (the relative increment was about 20 per cent.) in each pre-Donau glacial or interglacial phase, and regularly decreased in each post-Donau glacial or interglacial phase. This is the reason why the amount of water released by the Antarctic I. S. during the post-Donau interglacial phases was bigger than the volume of water absorbed in the preceding glacials (the reverse appears in the case of pre-Donau phases). At the same time the variations of ice volume in the glacial / interglacial cycle was about 16 per cent. The main ice body of the Antarctic I. S. was preserved in the interglacial ages, and the recent volume of the ice is of the order of about 32.75 million cu. km. of ice, which corresponds to the mean thickness of 2,500 m., and this amount of the ice by complete melting would raise the sealevel by about 81.6 m. without isostatic adjustment. The eustatic drop of sealevel was accelerated by the progressive glaciation of the Antarctic Continent in the pre-Donau times, and retarded by its deglaciation in the post-Donau phases. The eustatic drop of sealevel in pre-Günz times was an extremely important fact; the duration of all pre-Günz phases was so long that the glacial eustatic sealevel fluctuation was completely overcompensated by the eustatic lowering of sealevel. Water released by partial deglaciation of the Antarctic I. S. was not able to compensate the eustatic lowering of sealevel, because the eustatic lowering of the sealevel was much greater than is the glacial eustatic rise. This is the clue to the paradox that in the pre-Günz times the »highest« interglacial sealevels were lower than the preceding glacial sealevel position. One can conclude that the Sicilian coincided with the Waal interglacial, the uppermost part of the Donau glacial and the lowermost part of the Günz glacial, and the Calabrian must be correlated with the Tiglian interglacial, the uppermost part of the Biber glacial and the lowermost part of the Biber glacial and the lowermost part of the Donau glacial. Accordingly, by far the greatest parts (»cold« sections) of the Donau and Biber glacials cannot be correlated with the Sicilian and the Calabrian respectively. Calabrian and Sicilian strata which contain cold-loving and warm-loving species must be subdivided into separate »cold« and »warm« units.

(Translated by the author)