

Jan DYLIK

Przyczyny zmian klimatycznych w przeszłości geologicznej

WIELKIE OKRESY MROŻNE W DZIEJACH ZIEMI

Każdy student rozumie przyczyny przeciętnych zmian pogody w poszczególnych porach roku. Uczni natomiast po stuleciu intensywnych badań ciągle różnią się w poglądach na przyczyny potężniejszych zmian, które miały miejsce w stosunkowo niedawnej przeszłości plejstocenijskiej i holocenijskiej (G. J. Kukla, 1972).

Sprawa jest tym bardziej skomplikowana i przynajmniej pozornie trudniejsza, ale równocześnie ciekawsza, że ochłodzenie powodujące poważne skutki geologiczne i geomorfologiczne nie było bynajmniej wyłączną cechą czwartorzędu, względnie młodszego kenozoiku. Znane są bowiem jego ślady w daleko odleglejszej przeszłości geologicznej, a mianowicie w eokambryju oraz na przełomie karbonu i permu. Poza tymi najpowszechniej znanymi okresami zimnymi opisane są również ślady sy-lurskich zjawisk glacialnych i peryglacialnych w środkowej Saharze (P. Rognon, O. Charpel, B. Bijn-Duval, O. Garriel).

Uderzające jest, że okresy wielkich ochłodzeń — eokambryjskiego, karbońsko-permskiego i czwartorzędowego — są rozdzielone okresami nieprzerwanie ciepłymi o niemal identycznym trwaniu, a mianowicie 275 milionów lat dla każdego z tych ciepłych przedziałów. Jest to fakt niezwykle ważny dla lepszego zrozumienia zmian klimatycznych, bezpośrednio przede wszystkim dlatego, że wzbogaca naszą wiedzę o okresowości w przebiegu historycznym zjawisk klimatycznych. Czwartorzędowe wahania były o wiele częstsze i stosunkowo bardzo krótkotrwałe. Dopiero też uwzględnienie zimnych okresów w odległej przeszłości geologicznej w zestawieniu z oscylacjami zachodzącymi w młodszym kenozoiku pozwoliło na wydzielenie okresowości zmian klimatycznych w trzech kategoriach rzędów wielkości (M. Schwarzbach, 1968): długotrwałe — rzędu kilku dziesiątków i setek milionów lat, średnie — rzędu dziesiątków i stu tysięcy lat oraz krótkotrwałe — od kilkuset do tysiąca lat. Wymienione kategorie pozostają w stosunku 100 000 : 100 : 1.

Gdybyśmy wiedzieli o spadku temperatury jedynie w czwartorzędzie, traktowalibyśmy schyłek kenozoiku jako czas wyjątkowy, w którym na-

stąpiło wielkie i generalne pogorszenie klimatu. Obecnie możemy patrzeć inaczej i rozpoznawać w ochłodzeniu czwartorzędowym jedną z fluktuacji klimatycznych, które nawiedzały ziemię kilkakrotnie w różnych odcinkach jej dziejów i to nawet w rytmicznym porządku, jak się to może wydawać na podstawie istnienia owych magicznych 275 milionów lat oddzielających trzy największe okresy zimne.

Ów rytm najwyższego rzędu w następstwie zmian klimatycznych mógłby wyrażać istnienie systematycznego porządku rządzącego wahaniami klimatycznymi, w czym wolno by już było widzieć poważną podstawę do znalezienia przyczyn zmian klimatycznych różnego rzędu wielkości. Wystarczy jednak jedno stwierdzenie, aby zniweczyć te optymistyczne złudzenia albo co najmniej osłabić nadzieję na wykrycie jakichś prostych i jednorodnych wyjaśnień. Współczesne i czwartorzędowe obszary zimne są mniej lub więcej cirkumpolarne lub, inaczej mówiąc, skupiają się w wysokich szerokościach geograficznych. Natomiast ślady zimnego klimatu panującego w dalekiej przeszłości geologicznej są znajdowane w niskich szerokościach geograficznych, jak przede wszystkim na obszarach należących do dawnego wielkiego kontynentu Gondwany.

Wypadnie nam wrócić do tej sprawy, ale tymczasem nasuwa się nieodparcie myśl, że niepodobna wyjaśnić czwartorzędowych zmian klimatycznych w ten sam sposób, jak w wypadku dawniejszych zmian paleozoicznych. Już zaznaczone przesłanki rozumowania, nie licząc wielu innych, tłumaczą istnienie wielu poglądów na przyczyny zmian klimatycznych oraz wskazują prawdopodobieństwo tego, że istnienie różnych poglądów i mniej lub więcej rozbudowanych teorii nie wywodzi się jedynie z różnic subiektywnych, ale również, a nawet zapewne przede wszystkim, ze złożoności tych przyczyn. Możliwe jest, że przyczyny zmian klimatycznych składały się z różnorodnych elementów, które wiązały się i razem powodowały ochłodzenie lub ocieplenie. Wolno także sądzić, że w różnych wypadkach znanych w historii Ziemi o zmianach klimatycznych przesądzały nie zawsze te same przyczyny.

PRZEGLĄD HIPOTEZ

Zorientowanie się w rozlicznych poglądach na przyczyny zmian klimatycznych ułatwiają przeglądowe ujęcia podane przez R. F. Flinta (1971), J. J. Mitchella (1965), M. Schwarzbacha (1938), B. W. Sparksa i R. G. Westa (1972) oraz najnowsze konstrukcje paleoklimatyczne H. Flohna (1969) i G. J. Kukli (1972). Uzupełnieniem ich jest szereg innych publikacji, które nie są poświęcone hipotezom paleoklimatologicznym, ale sprawom związanym z tym zagadnieniem, jak np. problematyka rozpościerania się oceanów lub przesuwania się kontynentów.

Dobrą podstawę wyjściową daje bardzo przejrzyste napisany i pogładowo przedstawiony artykuł M. Schwarzbacha (1968), poświęcony najnowszym teoriom. Wyróżnia on siedem grup możliwych i rozważanych przyczyn zmian klimatycznych (fig. 1). W pierwszych pięciu zakłada się niezmienną wartość stałej słonecznej, czyli stałą wartość promieniowania przyjmowanego w stropie atmosfery. W pozostałych dwu wpływ energii słonecznej jest zmienny.

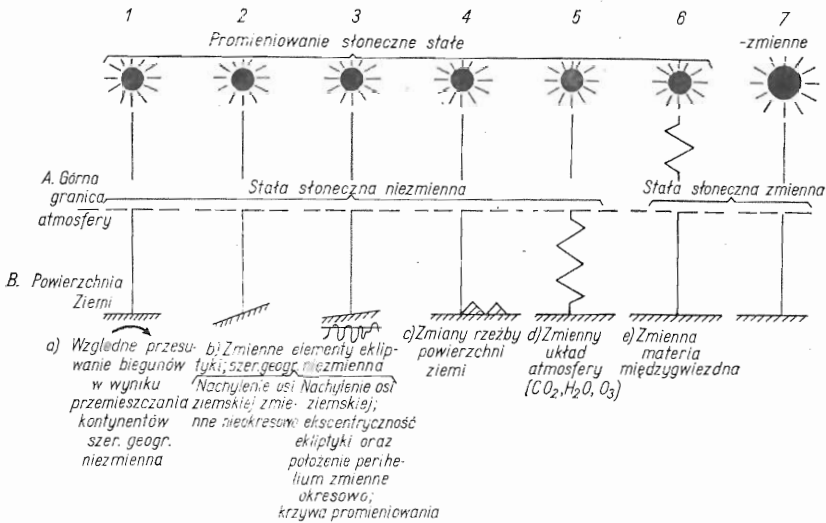


Fig. 1. Schematyczny przegląd hipotez wyjaśniających przyczyny zlodowaceń (wg M. Schwarzbacha, 1968)

Schémat des hypothèses portant sur les causes des changements climatiques (d'après M. Schwarzbach, 1968)

1-6 — radiation solaire primitive variable; 7 — radiation solaire primitive invariable; A — limite supérieure de l'atmosphère: constante solaire invariable, variable; B — surface de la Terre: a — déplacement relatif des pôles; b — inclinaison de l'axe terrestre: variable sans périodicité, avec périodicité; c — changements de l'écorce terrestre; d — construction de l'atmosphère variable; e — matière cosmique variable

WĘDRÓWKA BIEGUNÓW

Wspomniana poprzednio różnica między starszymi, paleozoicznymi okresami zimnymi, panującymi na obszarach położonych współcześnie w niskich szerokościach geograficznych i wiekami zimnymi czwartorzędowymi, które obejmowały wyższe szerokości geograficzne, nasuwa myśl o wędrówce biegunów wynikającej z przesuwania się kontynentów. Wegenerowska teoria dryftu kontynentalnego nabrała nowych rumieńców, ożywiła się i potwierdziła dzięki rozwojowi badań paleomagnetycznych, dokonanych w czasie ostatnich około piętnastu lat. Mamy już obecnie jasny obraz kierunków przesuwania się kontynentów (fig. 2) i datowanie poszczególnych etapów tych ruchów (E. M. Herron, 1972; W. C. III Pitman, 1972; W. C. III Pitman, M. Talvani, J. R. Heirtzler, 1971). Zgodnie z wypowiedzią P. Bellaira (1966), że zlodowacenie może się rozwinąć tylko wtedy, kiedy biegun przesuwa się po jakimś rozległym kontynencie, A. Dauvillier (1972a, b) wykazał, że zlodowacenie karbońsko-permskie było spowodowane przez wędrówkę bieguna od Ameryki Południowej do Południowej Afryki, Indii, Nowej Zelandii i Australii.

R. F. Flint (1971), wychodząc od powszechnie znanego faktu istnienia pokryw lodowcowych współcześnie i w wiekach zimnych plejstocenu właśnie w sąsiedztwie biegunów, uważa również za wielce prawdopodobne, że zimne klimaty prekenozoiczne były spowodowane przez dryft kontynen-

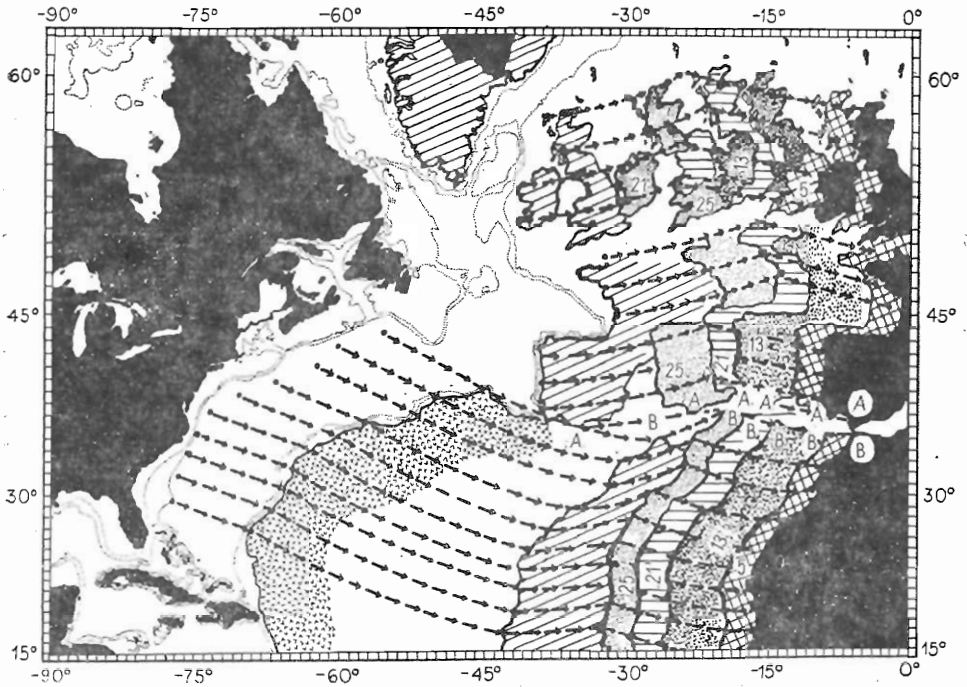


Fig. 2. Przemieszczanie Afryki i Europy w stosunku do Ameryki Północnej (wg W. C. Pitman, M. Talwani, 1972)

Déplacements de l'Afrique et de l'Europe par rapport à l'Amérique du Nord (d'après W. C. Pitman, M. Talwani, 1972)

Obecna pozycja lądów zaznaczona barwą czarną; dawniejsze pozycje w czasie wyrażonym w milionach lat na podstawie danych paleomagnetycznych; strzałki oznaczają kierunki odsuwania się Afryki i Europy od Ameryki Północnej; linia AB ilustruje względny ruch Eurazji i Afryki

tów w kierunku bieguna. Jednakże w żaden sposób teorią dryfu kontynentalnego niepodobna wytłumaczyć późnokenozoicznych wahań klimatycznych, a w szczególności plejstocenijskich i holocenijskich.

HIPOTEZY ASTRONOMICZNE

Astronomiczna teoria Milankowicza wykazuje dwie główne okresowości wpływające na rozmieszczenie ciepła na powierzchni Ziemi. Cykl precesyjny ulega zmianom w granicach od 13 000 do 29 000 lat z dość regularną średnią 26 600 w czasie ostatniego miliona lat. W przeciwieństwie do cyklu precesyjnego, który rządzi sezonową dystrybucją ciepła na każdej półkuli, cykl skośny, trwający 40 000 lat, rządzi zmiennym rozkładem ciepła między czasami polarnymi i strefą równikową (G. J. Kukla, 1972). Wreszcie zakłócenia powodowane przez inne planety, zwłaszcza Wenus, mogą powodować zmiany ekscentryczności orbity ziemskiej, która przechodzi od kształtu prawie kołowego do wyraźnie eliptycznego. Zmiany te oczywiście wpływają na względną intensywność i trwanie pór roku na różnych półkulach. Cykl ekscentryczny ma przebieg okresowy zmieniając się co 92 000 lat (B. W. Sparks, R. G. West, 1972).

Powiązanie koncepcji Milankowicza ze zmianami klimatycznymi bezpośrednio pozostaje nadal nie wyjaśnione (G. J. Kukla, 1972). Utrzymanie się tej teorii wynika przede wszystkim z tego, że zmiany temperatury o odpowiednim trwaniu, zaznaczone na krzywych promieniowania, są również widoczne w rdzeniach osadów głębokomorskich. Można oczekiwać stwierdzenia dalszych zbieżności, ale — zdaniem R. F. Flinta (1971) — jeśli nawet ta koncepcja zostanie sprawdzona, jako odgrywająca rolę w zmianach klimatycznych, to będzie ona miała raczej funkcję uruchomienia złożonego mechanizmu powodującego zmiany klimatyczne, a nie jedynej przyczyny tych zmian. Okaze się później, że nie jest to pogląd odosobniony.

Oddzielną grupę stanowią teorie zmiany stałej słonecznej. M. Schwarzbach (1968) omawia hipotezy Jordan i Steinera. Według P. Jordan promieniowanie słoneczne zmniejsza się wraz z malejącą wartością stałej grawitacyjnej, która jest spowodowana przez postępujący wzrost objętości Ziemi. Początkowo więc, w dawniejszych dziejach geologicznych, promieniowanie słoneczne było większe, a równocześnie gruba powłoka chmur powodowała istnienie na całej Ziemi równomiernego klimatu. Złodowacenie Gondwany i towarzyszące mu oczywiście ochłodzenie klimatu było wynikiem potężnych opadów gradu na obszarze równikowym. Hipoteza Jordan nie liczy się z faktami geologicznymi i jest całkiem nieprawdopodobna z meteorologicznego punktu widzenia. Należy również stwierdzić, że w rzeczywistości promieniowanie słoneczne, poza pojedynczymi wahaniami, wzrasta równoległe z biegiem dziejów naszej planety.

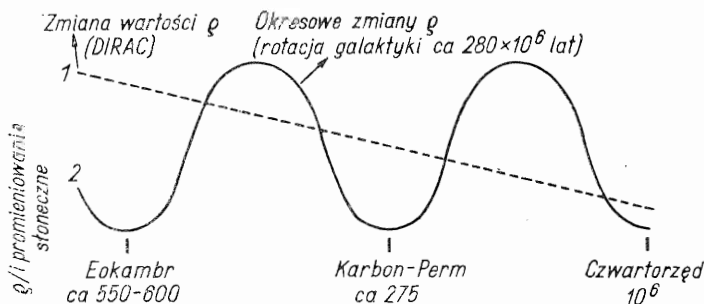


Fig. 3. Hipoteza Steinera (wg M. Schwarzbacha, 1968)

Hypothèse de Steiner (d'après M. Schwarzbach, 1968)

1 — changement continu de la constante de gravitation selon Dirac; 2 — changement périodique de la gravitation selon Steiner

Steiner (1967, zob. M. Schwarzbach, 1968) stoi również na stanowisku zmienności stałej słonecznej i stałej grawitacyjnej. Zmiany te pozostają w ścisłym związku z rotacją galaktyki. Jest to koncepcja niezwykle interesująca, gdyż wyjaśnia wszystkie trzy wielkie ochłodzenia klimatu znane w historii Ziemi. Jest zadziwiające, że rotacja drogi mlecznej wynosi około 280 milionów lat, czyli niemal dokładnie tyle, ile mierzają przedziały pomiędzy okresami zimnymi — eokambryjskim, karbońsko-permskim i czwartorzędowym (fig. 3). Znane są jednak wypowiedzi, że efekty rotacji galaktyki są zbyt małe, aby mogły wywołać istotne zmiany w wartości promieniowania słonecznego.

Więcej zwolenników w tej grupie hipotez mają te, które przypisują zmiany stałej słonecznej zjawiskom występującym na Słońcu. Podstawa tych poglądów znajduje się w obserwacji plam słonecznych oraz wybuchów czy pochodni (*faculae*, *solar flares*, *fulgurations*). Zdaniem R. F. Flinta (1971) podstawa ta jest dostatecznie silna, aby zapewnić tej grupie teorii poważne miejsce i aby przypisać jej wpływy na zmiany klimatu w sposób co najmniej jakościowy.

Ostatnio G. J. Kukła (1972) stwierdził, że zmiany klimatyczne wynikają głównie z mechaniki niebieskiej systemu słonecznego. Dowodzi zarówno zmienności produkcji energii słonecznej, jak również modulacji promieniowania przez przyciąganie planet objawiające się w postaci zjawisk podobnych do przypływów i odpływów morza. Ważne miejsce w rozumowaniu G. J. Kukły zajmują zmiany rozmieszczenia dopływu ciepła słonecznego na Ziemię rządzone przez mechanizm Milankowicza. Zrozumienie zjawisk związanych ze zmianami klimatycznymi, a przede wszystkim zagadnienia okresowości, wymaga możliwie równoczesnych obserwacji w skali całego globu. Stało się to możliwe tylko dzięki sztucznym satelitom, które zaczęły funkcjonować zaledwie przed 5–6 laty.

Obecnie mało jeszcze wiadomo, jakie szczególne zmiany produkcji słonecznej są związane ze stosunkiem plam słonecznych do *faculae* (pochodni, *solar flares*). Indeks lub wskaźnik słoneczny określa stosunek przestrzenny między jasnymi pochodniami i ciemnymi plamami na słońcu. Ten stosunek jest jednym z czterech bezpośrednich wskaźników plam słonecznych wykazujących wysoki poziom korelacji z wskaźnikami klimatu ziemskiego. Ścisłe powiązania między indeksem solarnym i intensywnością promieniowania słonecznego, mierzonego na powierzchni ziemi po 1900 roku, dowodzi, że współczesne zmiany klimatyczne są pochodzenia pozaziemskiego. Niestety, okresowość indeksu solarnego nie może być przedstawiona wskutek zbyt krótkiego okresu obserwacji. Nie mniej jednak ścisły związek między indeksem słonecznym i temperaturami globu podczas ostatnich 50 lat pozwala założyć, że podobne zależności istniały również w dalekiej nawet przeszłości.

Stałą słoneczną, czyli wartość promieniowania na jednostkę powierzchni, mierzy się w langley'ach. Jeden langley — $Ly = 1 \text{ cal cm}^{-2}$. Obecnie przyjmuje się, że wartość stałej słonecznej wynosi około 2 Ly na minutę. Wartość tej stałej zmienia się zależnie od indeksu słonecznego. Trzeba jednak wielu pomiarów poza atmosferą, aby stwierdzić czy stała słoneczna jest rzeczywiście stała.

Naładowane cząsteczki emisji słonecznej zmieniają się zależnie od indeksu słonecznego; wpływają one na magnetosferę ziemską i przez jakiś pośredni mechanizm na radiacyjną przejrzystość jonosfery. Mało można powiedzieć na poparcie tej teorii z wyjątkiem znanej zależności między wytwarzaniem się C^{14} wskutek dopływu promieni kosmicznych i wzrostem intensywności ziemskiego pola magnetycznego.

Również i emisja promieni UV i X zmienia się zgodnie z indeksem solarnym. Promienie krótkie rządzą wytwarzaniem się ozonu w stratosferze. Większa emisja UV powinna powodować zwiększoną koncentrację O_3 i wzmocnienie „cieplarnianej” osłony uchodzącego promieniowania. W ten sposób Ziemia traci mniej energii, co powoduje ocieplenie. Obecnie właśnie ten mechanizm polegający na wytwarzaniu się ozonu wydaje

się najprawdopodobniejszy. Zmiany w dopływie promieni UV i X znane są w okresach szczególnie silnych wybuchów słonecznych.

Mimo całego nacisku na zjawiska pozaziemskie ze względu na ich znaczenie dla klimatu ziemskiego G. J. Kukła, podobnie jak R. F. Flint, podkreśla, że absolutne wartości promieniowania mają małe znaczenie w ocenie amplitudy wahań klimatycznych. Gradienty zmieniające się z roku na rok i z jednej pory roku na drugą mają znaczenie wyzwalacza wszelkich pomnażających i potęgujących mechanizmów związanych z insolacją. Wobec tego bezpośredniej przyczyny zmian klimatycznych trzeba szukać gdzie indziej, a mianowicie w zjawiskach zachodzących na powierzchni Ziemi.

WYSOKI STOPIEŃ STAŁOŚCI KLIMATU I ZASADA CIĄGŁOŚCI BIOLOGICZNEJ

M. Schwarzbach (1968) po dokonaniu przeglądu najnowszych hipotez dochodzi do wniosku, że żadna teoria zmierzająca do wyjaśnienia zmian klimatycznych jednym zjawiskiem lub warunkiem nie rozwiązuje tego ważnego i skomplikowanego zagadnienia. Wnosi przy tym niezwykle interesujące uwagi, a mianowicie: we wszystkich hipotezach bierze się pod uwagę nie tylko pojedyncze przyczyny, ale rozważa się niemal wyłącznie raczej jaskrawe przeciwieństwa klimatyczne, których główną domeną była Europa i Ameryka Północna. Sądzi on również, że nie tylko i nie przede wszystkim powinno się wychodzić od tych obszarów, które w najnowszych czasach były arenami najbardziej kontrastowych zmian klimatycznych i gdzie się narodziły wszystkie hipotezy usiłujące wyjaśnić te zmiany.

Inny obraz uzyska się, jeśli — pozostawiając na stronie wypadki skrajne — porównamy temperatury na powierzchni całej Ziemi:

obecnie	15,5° C
wieki zimne czwartorzędu	11,0° C
czasy przedczwartorzędowe	23,0° C—24,0° C

Wynika stąd, że różnice w czasie ostatnich 600 milionów lat nie przekraczały 12—15° C, z czego można wyciągnąć wniosek zaskakujący, a mianowicie, że stałość klimatyczna jest jedną z najbardziej uderzających cech dziejów Ziemi. Koincyduje z tą cechą zasada ciągłości biologicznej, która się przejawia w tym, że na głównych obszarach życia warunki termiczne są względnie mało zmienione od prekambriu do chwili obecnej. Obecnie prawie wszystkie organizmy żyją w temperaturze, której średnie najcieplejszego miesiąca mieszczą się w granicach +5 do +35° C, a średnie roczne — od —15 do +30° C.

Fakty przedstawione w tym rozumowaniu przemawiają raczej za opiniami, w myśl których promieniowanie słoneczne pozostało prawie niezmienione przez setki milionów lat. Nie wyklucza to oczywiście drobnych wahań w wytwarzaniu energii słonecznej. Z tymi drobniejszymi wahaniami mogły się wiązać inne przyczyny przyjmowane w rozlicznych hipotezach.

ZMIANY PRZEWODNICTWA I ABSORPCYJNOŚCI ATMOSFERY

Przyczyn tych szuka się między innymi w zmianach przewodnictwa i absorpcyjności atmosfery ziemskiej, które zależą od zmiennych w czasie rozmieszczenia i zawartości dwutlenku węgla, ozonu oraz cząstek stałych w postaci pyłu, zwłaszcza wulkanicznego. Obserwacyjne sprawdziany teorii opartych na wymienionych zmiennych są możliwe. Trzeba jednak więcej wiadomości o zawartości i położeniu CO₂ i O₃ oraz o ich związkach ze zmianami radiacyjnymi, mimo wnikliwych badań Plassa w odniesieniu do roli atmosferycznego dwutlenku węgla w zmianach klimatycznych i studiów Willeta i Prohaski poświęconych wzmiankowanemu już problemowi zmienności zawartości ozonu i jego powiązaniu z plamami słonecznymi (R. F. Flint, 1971). Szybki wzrost zawartości CO₂ w atmosferze na półkuli północnej w ostatnim stuleciu zdawał się przemawiać za jego znaczną rolę w ociepleniu klimatu (H. R. Wilkinson, 1963), ale ochłodzenie po 1940 roku, mimo dalszego i jeszcze znacniejszego wzrostu dwutlenku węgla, skłania do ostrożnego i raczej sceptycznego poglądu na rolę tej zmiennej atmosferycznej w zmianach klimatycznych (G. J. Kukla, 1972). Publikacja Lamba z 1969 roku wywołała wielkie zainteresowanie pyłem wulkanicznym, jako jednym z elementów atmosfery mogącym mieć znaczenie dla wahań klimatycznych. Wkrótce jednak zjawily się wątpliwości, kiedy się okazało, że pył wulkaniczny utrzymuje się w atmosferze najwyżej 15 lat. Prócz tego trudno sobie wyobrazić, aby nawet bardzo wielka erupcja mogła oddziaływać na rozległe obszary obydwu półkul. Warto dodać, że składniki atmosfery mają różny potencjał wpływu na przebieg promieniowania. Promieniowanie emitowane przez Słońce dochodzi na powierzchnię Ziemi w postaci fal krótkich, które są w małym stopniu absorbowane przez składowe atmosfery. Natomiast wypromieniowanie jest długofalowe, pozaczerwone, które w wysokim stopniu podlega absorpcji przez parę wodną, CO₂ i inne składniki atmosfery. Stąd wynika, że zubożenie składu atmosfery, zwłaszcza zanik pary wodnej i CO₂, może doprowadzić do ochłodzenia powierzchni Ziemi (B. W. Sparks, R. G. West, 1972).

Przyczyn zmian klimatycznych szuka się również wyżej, w przestrzeni kosmicznej, mając przede wszystkim na uwadze zasłony pyłów międzyplanetarnych. Brak jednak jakichkolwiek obserwacji i koncepcja owych zasłon międzyplanetarnych nie ma żadnego oparcia faktycznego. Jej podstawy są postulowane *a priori* właśnie w poszukiwaniu wyjaśnień ziemskich zmian klimatycznych.

HIPOTEZA SIMPSONA

Jeszcze przed końcem XIX wieku wyrażano poglądy, że ekspansja lodowców wymaga większych opadów śnieżnych, a więc większej wilgotności atmosferycznej oraz intensywniejszego parowania i wyższej temperatury atmosfery.

Wśród wielu wariantów tej koncepcji znalazła się zmodyfikowana hipoteza Simpsona, który w pracach z 1934 i 1940 r. umieszcza zlodowacenia między maksimami i minimami krzywej termicznej atmosfery.

R. F. Flint (1971) referując przedstawione hipotezy sądzi, że teoria Simpsona nie odpowiada danym w przeszłości geologicznej. Nie wyjaśnia np. obniżenia izotopowo określanych temperatur w morzach tropikalnych podczas wieków zimnych, ani ekspansji lodowców w wysokich górach równikowych, a w szczególności na takich szczytach, jak Mauna Kea na Hawajach, w środku oceanu, gdzie w myśl hipotezy Simpsona winno być w tym czasie cieplej.

Koncepcja Simpsona była krytykowana przez wielu badaczy i trzeba uznać prawdopodobieństwo ekspansji lodowców podczas ochładzania klimatu mimo zmniejszonej ogólnej wartości opadów na lodowcach. Trzeba jednak wziąć pod uwagę proporcjonalnie zwiększony udział opadów w postaci śniegu i zmniejszoną ablację.

SOLARNO-TOPOGRAFICZNA KONCEPCJA FLINTA

W latach 1947 i 1953 R. F. Flint rozwijał koncepcję solarno-topograficzną, którą podtrzymuje również w roku 1971. Podkreśla on, że koncepcja ta opiera się na dwóch założeniach wspartych na mniej lub więcej bogatym materiale faktycznym: podnoszeniu kontynentów i tworzeniu się gór, które wykraczają powyżej granicy śniegu oraz fluktuacji promieniowania słonecznego wpływającej na zmienność klimatu i na zachowanie się lodowców. R. F. Flint nie daje swej koncepcji rangi teorii, lecz mówi o modelu, który nadaje się do przyjęcia. Za poglądem autora przemawia zbieżność procesów górotwórczych w miocenie i pliocenie z równoczesnym tworzeniem się lodowców. Podobną wymowę mają stwierdzone ostatnio koneksje między aktywnością solarną i zmianami klimatycznymi w czasie ostatnich 100 lat.

Koncepcja ta jest prawdopodobniejsza obecnie niż przed 25 laty. Nie pozostaje też w sprzeczności z teoriami obejmującymi zmienność wymiany ciepła między niskimi i wysokimi szerokościami geograficznymi w atmosferze i w oceanach. Różni się od nich jedynie tym, że przypisuje zmiany raczej aktywności słonecznej niż samoczynnym mechanizmom. Pod tym względem, jak pisze R. F. Flint, model ten jest najodpowiedniejszy do wyjaśnienia rozległej, globalnej synchroniczności zmian klimatycznych. W tym świetle łatwiej zrozumieć przeciwieństwo wielkich czasów lodowcowych późnokenozoicznych i rozproszonych lodowców prekenozoicznych. Wolno przypuszczać ze znaczną dozą pewności, że fluktuacje słoneczne oddziałujące na klimat były zdolne do stworzenia rozległych zlodowaceń tylko wtedy, kiedy podniesienie lądów osiągnęło granice, w których temperatura opadła dostatecznie. Nietrudno zauważyć, że w koncepcji Flinta implikowana jest myśl, wysuwana w wielu teoriach, że zmiany dopływu energii słonecznej nie wywołują bezpośrednio zmian klimatycznych, ale wyzwalają ziemskie procesy, które o tych zmianach decydują.

HIPOTEZY AUTOCYKLICZNE

Wspomniane procesy, wyzwolone przez zmianę dopływu energii słonecznej lub przez inne siły, są przedstawione w wielu hipotezach w ten sposób, że prowadzą do narastania i nasuwania się lodowców do jakiegoś

określonego maksimum, po którym następuje nieunikniony zanik lodowca i znów do określonego minimum. Mechanizm, który decyduje o rozwoju i zaniku lodowca, działa stale i powtarza się, dając w rezultacie cykliczny rozwój zdarzeń i związany z nim cykl zmian klimatycznych. Dlatego też grupę hipotez opartą na takim mechanizmie nazwano hipotezami autocyklicznymi (M. Schwarzbach, 1968).

Według Tannera (M. Schwarzbach, 1968) alimentacja europejskich i północnoamerykańskich lodowców dokonywała się za pomocą wiatrów osadzających opady śnieżne na południowych krańcach lodowców. Lodowce posuwały się wobec tego w kierunku źródeł ich zasilania. Z biegiem czasu jednak lodowce przekraczały właściwe im szerokości geograficzne, dostawały się na obszary zbyt ciepłe i ulegały wytopieniu. Z omówionymi procesami egzogenicznymi wiązały się również zdarzenia endogeniczne. Narastające czasy lodowcowe wywierały nacisk na podłoże skalne i powodowały jego izostatyczne obniżenie, które sprzyjało ociepleniu interglacjalnemu. Jednakże w wyniku zaniknięcia masy lodowcowej dochodziły do głosu ruchy wyrównawcze w odwrotnym kierunku. Podłoże, znów izostatycznie, dźwigało się do poziomu pierwotnego i wytwarzały się ponownie dogodne warunki do gromadzenia się osadów śnieżnych dostarczanych przez wiatry z kierunków południowych, co prowadziło do rozwoju następnego lodowca i zlodowacenia. W ten sposób tłumaczy się fluktuacje powtarzane cyklicznie w czasie całego czwartorzędu.

W przeciwieństwie do Europy i Ameryki Północnej, Antarktyda i Grenlandia pozostały izolowane i nie podlegały tak żywym procesom cyklicznym; lodowce utrzymywały się tam permanentnie. Wynika to stąd, że lodowce antarktyczny i grenlandzki nigdy nie docierały do obszarów cieplejszych, co oczywiście uniemożliwiało działanie mechanizmu autocyklicznego.

A. T. Wilson (1964, 1966) umieścił źródło zdarzeń wywołujących autocykliczny przebieg zmian klimatycznych na Antarktydzie. Lodowiec antarktyczny tracił stabilność i poruszał się wtedy, kiedy jego miąższość osiągała takie rozmiary — większe niż obecnie — że w spągu lodowca panowały temperatury dodatnie. W wyniku rozpościerania się lodowca na wszystkie strony i bliskiego sąsiedztwa oceanu dochodziło do wytwarzania się wielkich mas lodu szelfowego. Lód szelfowy wędrował na północ do strefy konwergencji z wodami cieplejszymi. Przekraczał przy tym znacznie dzisiejszą granicę tej strefy, położoną na około 50° szerokości południowej. Masy lodu szelfowego przyczyniały się do ogromnego wzrostu ziemskiego albedo i w konsekwencji powodowały obniżenie temperatury całego globu. Jednym z najbardziej uderzających objawów tego ochłodzenia były zlodowacenia tworzące się i rozwijające się na północnej półkuli, na obszarach północnej Europy i Ameryki Północnej.

Tymczasem postępujący ubytek lodu na Antarktydzie doprowadzał do zmniejszenia się miąższości lodowca, który w ten sposób nabierał cech lodowca „zimnego”. Oznaczało to stagnację lodowca i zanik produkcji lodu szelfowego. Niechybnym następstwem tego był spadek albedo, zwiększona absorpcja promieniowania słonecznego i ogólny wzrost temperatury na całej Ziemi. Przedstawiona hipoteza przewiduje więc automatyczne następstwo cykliczne kolejnych okresów, a raczej wieków zimnych i ciepłych, sterowanych przez zdarzenia dokonywane się na Antarktydzie.

Taki przebieg zdarzeń sterujących zmianami klimatycznymi na całej ziemi jest możliwy jedynie na wielkich czasach lodowych pokrywających całość rozległych kontynentów. Jest prawdopodobne również, że opisane funkcjonowanie Antarktydy stało się możliwe dopiero wtedy, kiedy jej obszar uzyskał położenie symetryczne w stosunku do bieguna.

GEOFIZYCZNY MODEL FLOHNA

Główną, ale nie bezpośrednią przyczyną zmian klimatycznych był według H. Flohna (1969) dryft kontynentów, który powodował przesuwanie się kontynentów — Gondwany w dewonie, a Antarktydy w trzeciorzędzie — w kierunku bieguna.

Bezpośrednią przyczyną zmian klimatycznych był mechanizm o charakterze również autocyklicznym. U podstaw tej koncepcji leżą: pokrywa śnieżna na jakimś kontynencie w pobliżu bieguna; wytapianie tej pokrywy, w następstwie czego denna, tysiącmetrowej miąższości woda oceanów ochładza się o 1°C w czasie setek tysięcy do miliona lat; rozprzestrzenianie się tej chłodnej wody we wszystkich oceanach, z najmniejszym skutkiem w wodach powierzchniowych strefy tropikalnej; stopniowe ochładzanie wyższych szerokości geograficznych przy prawie stałej — w trzeciorzędzie — temperaturze tropików.

Najpóźniej w pliocenie tworzą się lodowce na Antarktydzie. Wraz z postępującym ochładzaniem rozwija się lodowiec antarktyczny i pod koniec pliocenu zjawiają się lodowce na północnych kontynentach, czemu towarzyszy eustatyczne obniżanie oceanu. Narastanie czaszy lodowcowej na Antarktydzie prowadzi do osiągnięcia krytycznej miąższości, przy której w następstwie wielkiego ciśnienia lodowiec nabiera cech „ciepłego”. Jest to mechanizm znany z hipotezy Wilsona: lodowiec rozpościera się aż po krańce kontynentu, gromadzi się lód szelfowy, który daleko na północ przekracza granicę współczesnej strefy konwergencji; równocześnie też poziom oceanów wzrasta eustatycznie.

Wzrost albedo, opisany już przez A. T. Wilsona, powoduje globalne ochłodzenie o około 5°C . Tworzą się wtedy rozległe lodowce na kontynentach północnej półkuli i w ślad za tym następuje eustatyczne obniżenie poziomu oceanów, maksymalnie do 145 m. Tymczasem lodowiec antarktyczny traci na miąższości w rezultacie produkcji lodu szelfowego, a odciążenie spągu lodowca sprawia, że przechodzi on do typu „zimnego”. Oznacza to całkowitą stabilizację i przejście do fazy suchej.

Równocześnie od północy i od południa postępuje ochładzanie prądów oceanicznych i powietrznych. W obszarze mórz tropikalnych następuje adwekcyjne obniżenie temperatury o 5 do 6°C , czego następstwem jest zmniejszenie parowania o około 30%. W ten sposób zostały stworzone warunki suchej fazy pełni wieku zimnego. Oczywiście w warunkach tej suchej fazy wszystkie czasze lodowcowe stagnują całkowicie lub wykazują rozwój minimalny.

Automatyzm cyklicznego rozwoju postępuje dalej. W suchej fazie pełni wieku zimnego ożywiają się procesy eoliczne i rozpościeranie się pyłu lessowego. Wzmaga się absorpcja promieniowania na powierzchniach lodowców pokrytych pyłem. Powoduje to wzrost tajania i stopniowo znikania lodowców, co prowadzi do eustatycznego podnoszenia poziomu ocea-

nów, a równocześnie do zamknięcia cyklu. H. Flohn podkreśla istnienie okresowości w przebiegu opisanych zdarzeń. Od rozpoczęcia masowej produkcji lodu szelfowego, przez wzrost albedo, zanikanie wytwarzania się lodu szelfowego aż do suchej fazy pleniglacialnej przyjmuje czas w granicach od 30 000 do 50 000 lat. Uznaje współdziałanie wahań elementów ekliptyki za możliwe, ale bynajmniej nie konieczne.

Znany fakt zdecydowanie intensywniejszego rozwoju zlodowaceń na tych obszarach Eurazji i Ameryki Północnej, które położone są bliżej Atlantyku, H. Flohn tłumaczy dwójako: antarktyczny lód szelfowy wdzierał się najdalej na południowe obszary Oceanu Atlantyckiego; pewną rolę odegrało również wytworzenie się pomostu lądowego w Morzu Beringa, który hamował wymianę mas i ciepła między Pacyfikiem i Oceanem Arktycznym. Druga z wymienionych okoliczności miała znaczenie drugorzędne.

Model Flohna jest geofizyczny, ale oparty wyłącznie na zjawiskach ziemskich; hipotezy oparte na zdarzeniach kosmicznych odrzuca lub nie bierze ich pod uwagę. Na tym polega oryginalność schematu.

Astrofizyczne hipotezy, np. zmienność energii słonecznej dostrzegalna w widzialnym spektrum lub w emisji krótkofalowych promieni ultrafioletowych, są świadomie pominięte przez H. Flohna. Nie są jeszcze dostatecznie dowiedzione, a oprócz tego przeciw nim przemawia częstotliwość wahań klimatycznych czwartorzędowych. Skala czasowa zjawisk astrofizycznych mierzy się co najmniej milionami i dziesiątkami milionów lat. Jednostek tego rzędu niepodobna zastosować do plejstocенских zmian klimatycznych, które przebiegały w czasie dziesiątków i setek tysięcy lat.

Omawiany model przypisuje szczególne znaczenie gospodarce cieplnej atmosfery i oceanów. Anomalie cyrkulacji atmosferycznych łatwo sobie wyobrazić dla jakiegoś wieku zimnego, jeśli tylko uświadomimy sobie podstawową rolę zmiennych w czasie granic otwartego lądu i morza oraz obszarów pokrytych śniegiem lub lodem. Stąd bowiem wyrastają różnice wartości albedo, zawartości ciepła i podział mas powietrznych decydujący o ich cyrkulacji.

Krótkookresowe plejstocенские zmiany wieków zimnych i ciepłych, o skali czasowej 10^4 — 10^5 , obejmowały całą Ziemię równocześnie. Przemawia to jednoznacznie, w każdym razie dla ostatniego wieku zimnego, przeciw decydującej roli zmiennych elementów ekliptyki.

Zgodnie z dawniejszymi wypowiedziami, o których wspomniano już powyżej, H. Flohn przypomina, że normalną, dominującą w czasie cechą klimatu Ziemi były warunki termiczne, które nie dawały możliwości tworzenia się zlodowaceń. Obydwa obszary polarne były zlodowacone łącznie od eokambriu, przez zaledwie 10% całej historii globu liczonej od początku paleozoiku.

W czasach najnowszych doszło do ochłodzenia średnich i wysokich szerokości geograficznych, w każdym razie na północnej półkuli. Stosunkowo małe oziębienie dokonało się mniej więcej przed 30 milionami lat, a więc w dolnym miocenie. Wyraźnie silniejsze nadeszło dopiero w pliocenie i plejstocenie. W pliocenie, przed 2,5—3 milionami lat — lodowce górskie na Islandii, w Sierra Nevada w Kalifornii i na Antarktydzie.

Lodowiec kontynentalny tworzy się najwcześniej na Antarktydzie, najprawdopodobniej już w pliocenie. Miększość antarktycznej czaszy lodowej na początku plejstocenu przekracza dzisiaj o około 300 m. Na najwięk-

szych kontynentach północnej półkuli rozwijają się i zanikają lądolody według przedstawionego mechanizmu sterowanego przez lodowiec Antarktydy. Tworzenie się zlodowceń na północnej półkuli trwało okragło 20 000 lat, zanikanie ich natomiast przebiegało znacznie szybciej, bo od 13 000 do 15 000 lat. Podane liczby są najpewniejsze dla würtmu, ale zapewne niewiele się one różniły w przypadku innych zlodowceń kontynentalnych, których zdaniem H. Flohna było co najmniej 6—8.

Nie jest pewne, czy grenlandzki lodowiec utrzymywał się w wiekach ciepłych, natomiast dla sterującej zmianami klimatycznymi Antarktydy przyjmuje się, że jej czasa lodowa przetrwała, chociaż przy zmniejszonej miąższości, przekraczającej jednak 2000 m.

INSOLACYJNA TEORIA KUKLI

G. J. Kukła (1972) twierdzi, że mechanika niebieska jest jedynym prawdopodobnym źródłem okresowości zmian klimatycznych, chociaż — jak przyznaje — powiązanie pomiędzy zjawiskami pozaziemskimi i procesami tworzącymi klimat bezpośrednio nie są wyjaśnione wystarczająco.

Oryginalne i cenne jest aktualistyczne podejście G. J. Kukli, który za punkt wyjścia przyjmuje rozwój klimatu w czasach najnowszych. Stwierdza on, że podczas pięćdziesięciolecia 1890—1940 klimat się ociepiał o około $0,1^{\circ}\text{C}$ co dziesięć lat. Od 1940 r. natomiast zapanowało ochłodzenie o wartości $0,2^{\circ}\text{C}$ na dziesięć lat. Kilka stuleci takiego oziębienia wystarczy, aby budżet cieplny Ziemi znalazł się na poziomie ostatniego maksimum glacialnego przed 23 000 lat, co oznacza stan największego zasięgu ostatniego zlodowacenia.

W rezultacie obecnego ochładzania dokonano się ogólne przesunięcie stref klimatycznych ku południowi. Ekspansja lodu morskiego, szczególnie widoczna dokoła Islandii, osiągnęła w 1969 r. maksymalną granicę, nie znaną nigdy w ostatnim stuleciu. Pokrywa śnieżna sięga dalej na południe i zalega dłużej, co zbiega się z ogólnym obniżeniem temperatury zimowej na północnej półkuli. Zmiany klimatu w ostatnim stuleciu wywołane są przez zdarzenia na północnej półkuli. W tym samym czasie obserwuje się wzmożenie ruchów cyklonalnych, wywodzące się głównie z ogrzewania wód północno-środkowego Pacyfiku latem. Stąd wywodzą się cyklony jesienne i większe opady zimowe w postaci śniegu na kontynentach.

Budżet cieplny Ziemi zależy od głównych zmiennych: zmian w intensywności promieniowania słonecznego; wartości i rozmieszczenia energii słonecznej, zgodnych z matematycznymi regułami Milankowicza; radiacyjnej przejrzystości i odbicia w atmosferze wraz z chmurami, które mogą reagować na odbieranie fal krótkich i powodować utratę fal długich; albedo na powierzchni Ziemi, zwłaszcza pola śnieżne, lodowce, lód morski, piaszczyste pustynie, burzliwe morza w przeciwieństwie do małego albedo na spokojnych oceanach, taflach jezior oraz na powierzchniach leśnych i innych pokrytych gęstą szatą roślinną. Odbijanie lub absorbowanie, którym podlega więcej niż połowa całego promieniowania, stanowi krytyczny czynnik wartości bilansu cieplnego.

Znane są geologiczne dowody okresowych nawrotów zimniejszych podczas ostatniego miliona lat. Najmłodszy z nich przypada na czas 23 000—

10 000 lat przed teraźniejszością. Ten przedział czasowy — późny würm, późny wisconsin — jest standardowym modelem glacialnego trybu klimatycznego. Przedział rozpoczęty natomiast przed 10 000 lat posiada treść wzorcowego modelu trybu interglacialnego. W wiekach zimnych i ciepłych znane są drugorzędne oscylacje, co jednak nie zmienia faktu, że podział ostatniego miliona lat opiera się na jednostkach pierwszego rzędu, reprezentowanych przez podstawowe tryby — glacialny i interglacialny, albo też wieki ciepłe i zimne.

Ostatnia gwałtowna zmiana od skrajnie zimnych do skrajnie ciepłych warunków miała miejsce przed 10 000 lat. Momenty, w których dokonują się takie zmiany, nazywane są: *anathermal time* (Emiliani), *termination* (Broecker, van Donk), lub *markline* (Kukla). Przedostatnia *termination* miała miejsce przed 127 000 lat. Przebieg zmian klimatycznych podczas epoki Brunhesa normalnego pola magnetycznego, czyli w czasie ostatnich 700 000 lat, objawia się w krzywej zębatej z drugorzędnymi oscylacjami. Zazwyczaj w wiekach ciepłych maksymalne temperatury dodatnie zjawiały się wkrótce po rozpoczęciu wieku ciepłego, natomiast maksymalne temperatury ujemne objawiały się krótko przed końcem wieku zimnego.

Jak już wspomniano poprzednio, G. J. Kukla twierdzi, że podstawowe zasady radiacyjnej teorii opierają się na mechanice niebieskiej Milankowicza z uzupełnieniami van Voerkoma i Vernekara. Przyznaje jednakże, że powiązanie teorii Milankowicza z klimatem ziemskim nie jest jeszcze wyjaśnione.

W mechanizmie transformacji zmian nasłonecznienia na klimat należy wziąć pod uwagę, że poza wartościami amplitud nie ma wielkich różnic między wiekami zimnymi i ciepłymi. Współczesne zmiany klimatyczne można uważać za wzorzec wielkich procesów i tendencji meteorologicznych do rekonstrukcji ostatniego wieku zimnego. Zasadniczą pod tym względem wielkością jest czas, który może pozwolić, aby długotrwałe tendencje wywołały wyniki w skali globalnej. Zmiany wyrażone w obecnym ochładzaniu zaczynają się na półkuli północnej. Oceany ogrzane latem dostarczają śniegu kontynentom w miarę postępującego ochładzania.

Zmiana dopływu ciepła wynikająca z mechanizmu Milankowicza jest tak mała, że nie może prowadzić do wieku zimnego, ani ciepłego bezpośrednio. Jedynie przez sprzężenie zwrotne zjawisk meteorologicznych lądowych i morskich wpływ insolacji może ulec takiemu powiększeniu, które może wywołać zmianę klimatu. W przeciwieństwie do małych różnic, a w konsekwencji małego znaczenia dla amplitud wahań klimatycznych absolutnych wartości napływającego promieniowania, ważną rolę odgrywały gradienty termiczne, liczone z roku na rok i z jednej pory roku na drugą. One właśnie spełniają funkcję wyzwalacza (*trigger, relais*) wszelkich mechanizmów pomnażających rolę insolacji.

Dla holocenu, czyli współczesnego interglacialu stwierdza się ocieplający kierunek w zmianie zimowej insolacji. Przeciwnie, w ostatniej fazie glacialnej późnego würmu i wisconsinu panował ujemny kierunek w zmianach nasłonecznienia zimowego. Przejścia pomiędzy kierunkami dodatnimi i ujemnymi w efektywnym promieniowaniu zimowym były synchroniczne w czasie ostatnich stuleci ze zmianami od podstawowego trybu interglacialnego do glacialnego klimatu globalnego.

Ostatnie 3 zwroty miały miejsce: przed 228 000 lat — od dodatniego

kierunku do ujemnego; 11 000 — od ujemnego do dodatniego i w roku 1900, kiedy nastąpiło przejście od dodatniego do ujemnego kierunku insolacji zimowej. Podobne są korelacje początków zimowego ochłodzenia we wczesnym würmie, przed 71 000 lat i początków ostatniego ocieplenia — eemskiego — przed 127 000 lat.

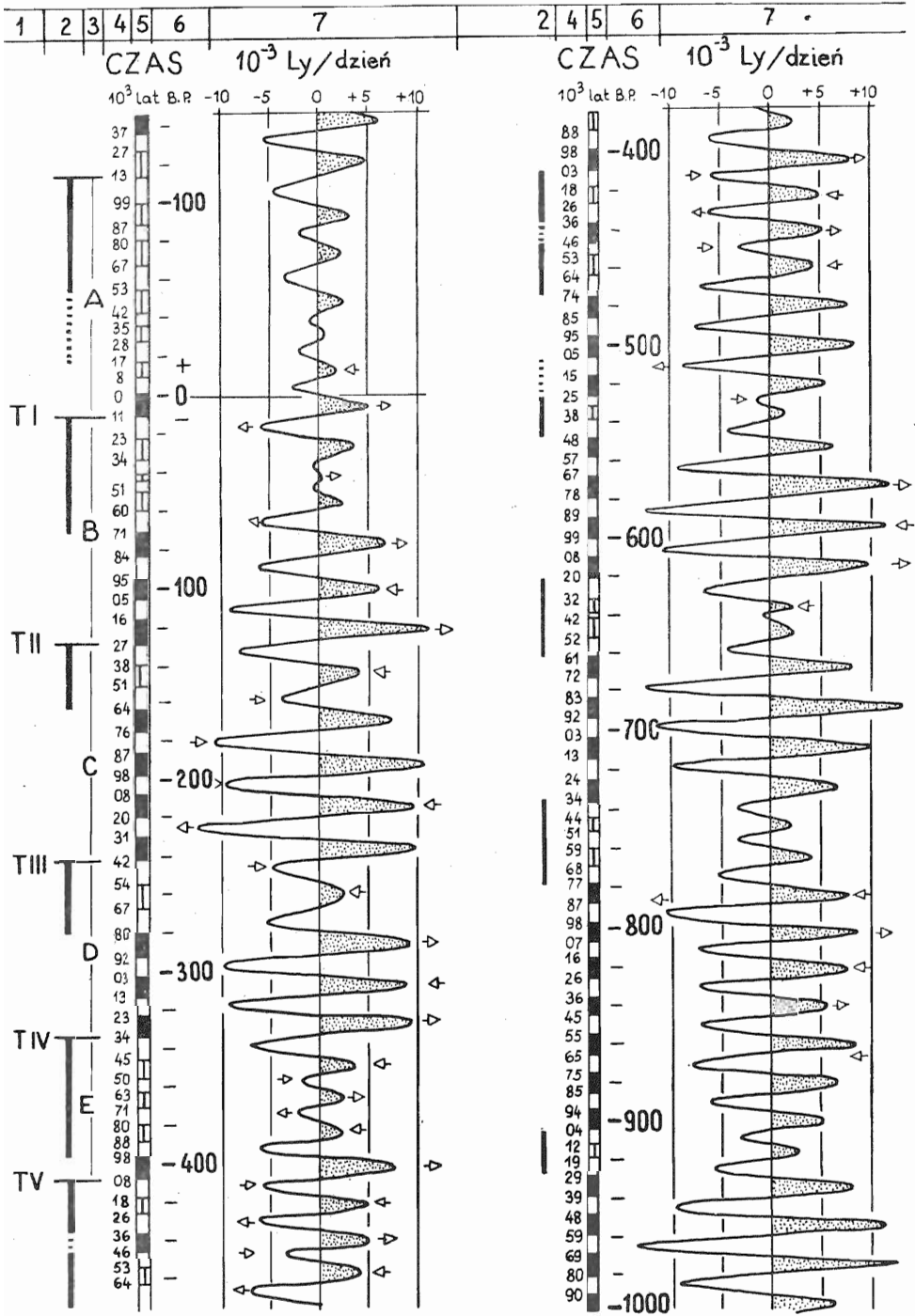
Kulminacje ciepłych i zimnych warunków przypadają na czas największych gradientów w zmianie sezonowej insolacji: holocenne optimum klimatyczne przed 6 500 lat; minima termiczne ostatniego wieku zimnego — przed 17 000 lat i przed 65 000 lat; kulminacja ciepła wyrażona przez transgresję Barbados — przed około 80 000 lat i pełnia ostatniego interglacjału — przed 120 000 lat. Pod koniec obydwu podstawowych trybów miały miejsce krótkotrwałe oscylacje, a mianowicie przed około 14 000 i 3 600 lat.

O korelacji zmian klimatycznych ze zmianami insolacji świadczy, między innymi to, że holocen i eem przypadały na czas, kiedy ocieplenie pasa równikowego zbiegało się z dodatnim kierunkiem insolacji. Podobnie obydwie kulminacje ostatniego glacjału występowały w czasie opadania krzywych insolacyjnych w kierunku ujemnym. Przedziały wysokie zmiany sezonowej i wielkiego gradientu termicznego w zimowym nasłonecznieniu występują na przemian z okresami małych gradientów (fig. 4). Ostatni odcinek z małym gradientem, rozdzielający przedziały ujemnego kierunku, jest paralelizowany z ostatnim pleniglacjałem. Podobne odcinki zjawiają się w okresach około 100 000-letnich. Korelacja insolacyjnych zmian odpowiada zmianom w cyklu glacjał—interglacjał.

Związek między insolacją i zmianą klimatu wynika z drobnych oscylacji promieniowania, które zmieniają globalny bilans cieplny wskutek interwencji i amplifikacji wywołanej przez sprzężenie drobnych zjawisk meteorologicznych. Uwidocznia się to na kontynentach północnej półkuli za pośrednictwem zmian w położeniu granicy śniegu reagującej na dopływ ciepła.

Bardzo mały wzrost dopływu ciepła wystarcza do wytopienia śniegu na silnie odbijających polach śnieżnych w zasięgu znacznego obszaru w sąsiedztwie granicy śniegu. Śnieg, podobnie jak lód lądowy i pakowy, odbija około 50—70% całego dopływu promieniowania, natomiast obszary wolne od tych pokryw — zaledwie 15%, czego rezultatem jest absorpcja trzy- lub nawet czterokrotnie wyższa. Pochłanianie promieni powoduje retencję nadwyżki w budżecie cieplnym Ziemi i atmosfery na obszarze sąsiadującym z granicą śniegu. Zatrzymana energia sprzyja dalszemu wytapianiu sąsiednich pól śnieżnych. Przy utrzymującym się ociepleniu przebiegają samoczynne reakcje łańcuchowe likwidujące reżim śnieżny. Opisane zjawiska powtarzają się w każdej wiosnie. Podobne procesy przebiegają na skalę znacznie większą przy wzrastającym dopływie ciepła z roku na rok. Odwrotnie, postępujące zmniejszanie się dopływu ciepła powoduje coraz większe rozszerzanie się pól śnieżnych.

Tylko pokrywa śnieżna wprowadza zmiany do efektywnego bilansu cieplnego, a rozwój tej pokrywy zależy od zmiennego, sezonowego rozmieszczenia wartości promieniowania słonecznego. Z zachowania się, transgresywnego lub regresywnego, pól śnieżnych wynika, że główną zmienną w bilansie cieplnym Ziemi jest albedo. Wzrost globalnego albedo o około 0,01 powoduje spadek średniej temperatury o 1° C.



Średnie rozprzestrzenienie pokrywy śnieżnej jest funkcją wykładniczą: znaku zmiany dopływu ciepła, czyli w kierunku dodatnim lub ujemnym; gradientu z roku na rok ocieplania lub ochładzania oraz trwałości tendencji dodatnich albo ujemnych.

Pola śnieżne przesuują się ku równikowi w okresach ochładzania lub ku biegunom w okresach ocieplania. Teoretycznie mogłyby one przesuwać się od biegunów do równika i odwrotnie, gdyby były spełnione dwa nierealne warunki, a mianowicie: gdyby cała kula ziemską była kontynentem i gdyby było dosyć wilgoci atmosferycznej.

Oceany i polarne czasy lodowe ograniczają zasięg pokryw śnieżnych, które nie mogą rozwijać się aż do równika i w odwrocie nie są w stanie osiągnąć biegunów. Istnieją dwie strefy równowagi głównej granicy śniegu na północnej półkuli. Strefa północna przebiega mniej więcej w pasie między 50 i 55° szerokości północnej, a południową strefę wyznacza w przybliżeniu 30° szerokości północnej. Strefa północna jest osiąganą po długim okresie ocieplenia, a południowa — w wyniku długiego okresu ochładzania.

Zgodnie z teorią odwrót granicy śniegu w kierunku bieguna powinien przyspieszać się do maksimum w czasie dziesiątków, a najwyżej setek lat; później przesuwa się wolniej. Linia śnieżna, która dotarła do polarnej lub równikowej granicy, musi automatycznie przesuwać się w kierunku odwrotnym. O marszu w kierunku północnym decyduje wielka strata wskutek wzrostu albedo na powierzchni śniegu; o kierunku przeciwnym — postępujące ocieplenie zim.

Zachowanie się pokrywy śnieżnej, a raczej wędrówka jej granicy miała znaczenie dla zębatego obrazu krzywej oscylacji klimatycznych w późnym plejstocenie i holocenie, które rozpoczynały się gwałtownym ociepleniem, później wygasającym. W ostatnim odcinku tych oscylacji można wykazać znaczące daty gwałtownego ocieplenia w latach radiometrycznych: 13 700, 12 400 i 10 000.

W uproszczonym modelu reakcji śnieżnej granicy na zmiany insolacji pominięto rolę dopływu wilgotności do kontynentów. Trzeba jednak wziąć pod uwagę procesy sprzężenia zwrotnego przebiegające w oceanach i w atmosferze. Ułatwiają tę sprawę najnowsze badania układów cyrkulacyjnych w tak zwanych anormalnych latach, jak np. w roku 1960, który się różnił, odbiegając od cech przewidywanych na podstawie danych długoterminowych. Rok ten odznaczał się nienormalnie ciepłymi powierzchniowymi wodami oceanów w okresach letnim i jesiennym. Zimą wskutek tego pojawiły się nienormalnie wielkie opady. Wzdłuż zachodnich, pacy-

Fig. 4. Gradienty usłonecznienia zimowego i zmian klimatu w czasie ostatniego miliona lat i przyszłych 140 000 lat (wg G. J. Kukli, 1972)

Gradients d'insolation et les changements climatiques pendant le dernier million et le prochains 140 000 ans (d'après G. J. Kukla, 1972)

1 — próba korelacji danych astronomicznych z *Terminations* — przejścia od przedziałów zimnych do ciepłych; 2 — odcinki zimnych klimatów glacialnych o podobnym charakterze jak w przedziale 11 000—71 000 BP, zaznaczone grubą linią ciągłą; 3 — korelacja danych astronomicznych z „cyklami glacialnymi”; 4 — czas w latach $\times 10^3$ n.e. lub BP; 5 — przedziały z gradientami równymi lub większymi od holocenicznych zaznaczone czarnymi prostokątami, przedziały z gradientami mniejszymi, ale dodatnimi — zakreskowane; 6 — czas w latach $\times 10^3$ n.e. lub BP; 7 — zimowe gradienty usłonecznienia dla szerokości 25 — 75° N w stropie atmosfery — obliczenia oparte na tablicach Milankowicza zmodyfikowanych przez Vernekarę; strzałki oznaczają zakłócenia wzmagające lub osłabiające reakcje klimatyczne

ficznych wybrzeży Stanów Zjednoczonych zjawisku temu towarzyszyły mroźna zima i opady śniegu na rozległych obszarach. Samoczynne procesy wywołone w ten sposób wzmogły anomalie w następnych latach. Większa aktywność cyklonalna i opady zimowe były wywołane przez zwiększony gradient termiczny między oceanem i kontynentem. Gradienty te powstawały w wyniku postępującego ogrzewania oceanu w lecie i wzrastającego ochładzania zimowego kontynentów. Podobne procesy przebiegały zapewne wzdłuż wschodnich wybrzeży Ameryki Północnej podczas tzw. małego zlodowacenia.

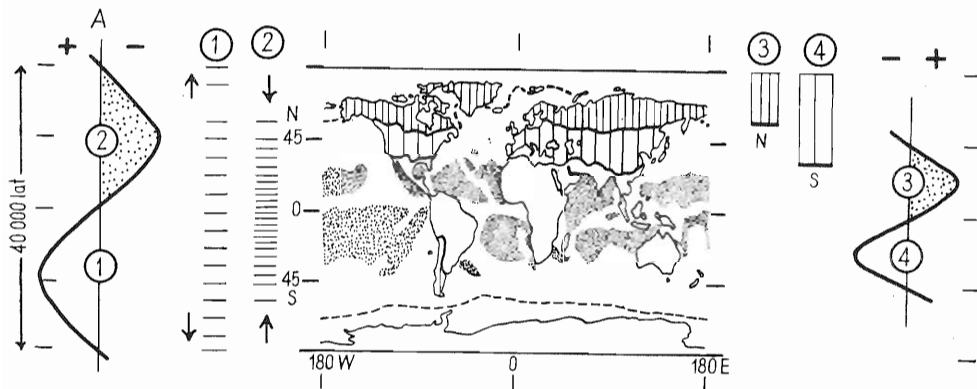


Fig. 5. Wpływ zmian usłonecznienia na ciepły budżet Ziemi w czasie około 40 000 lat (wg G. J. Kukli, 1972)

Influence des changements de l'insolation sur le budget thermique de la Terre pendant les derniers 40 000 ans (d'après G. J. Kukla, 1972)

A — krzywa w czasie ostatnich 40 000 lat: 1 — ciepło rozpraszające się w kierunku polarnych czasz lodowcowych, 2 — ciepło absorbowane w niskich szerokościach geograficznych obydwu półkul, głównie w oceanach, 3—4 — strefa równowagi pół śnieżnych

Zakropkowane obszary najwyraźniejszego dodatniego bilansu radiacyjnego w latach 1962—1963 od czerwca do czerwca wg satelitów Tiros VII; kreska przerywana — granica lodu pakowego wg zdjęć satelitarnych

A — courbe des gradients d'insolation: 1—2 — chaleur dispersée vers les pôles et celle qui est absorbée dans les latitudes plus basses, 3—4 — zone d'équilibre des couvertes neigeuses. Les surfaces pointillées représentent des régions à bilan positive de radiation dans la période 1962—63, du juin au juin, selon les satellites Tiros VII; ligne discontinue marque la limite du pack ice selon les photos satellitaires

Zdaniem G. J. Kukli ten sam mechanizm dostarczał wilgotności niezbędnej do rozwoju pół śnieżnych i lodowców przy starcie każdego globalnego nasunięcia lodowców w kierunku równika.

Warto przypomnieć, że już Croll w 1875 r., Enquist w 1916 i Simpson w 1930 r. zakładali potrzebę wyższych temperatur do powstawania zlodowaceń. Długotrwałe oddziaływanie wzajemne oceanów i kontynentów oraz powstająca w jego wyniku cyrkulacja atmosferyczna prowadziły do oscylacyjnego formowania się lądolodów w cyklu glacialnym. Na fig. 5 podano przykład dwóch złożonych okresów pół śnieżnych. Widać tam, że średnie przemieszczenie granicy śniegu jest zależne od gradientu termicznego, od czasu i od strefy równowagi.

Istnieje wysoki stopień korelacji wskaźników astronomicznych z klimatem ziemskim. Zmiany orbitalne wpływają na globalny bilans energetyczny przez modulację emisji energii słonecznej oraz przez zmienne roz-

mieszczanie promieniowania zależnie od pory roku i szerokości geograficznej. Należy przyznać, że jest jeszcze wiele braków w naszej wiedzy o szeregu ważnych elementów.

Mimo tych braków krzywe gradientów termicznych oparte na tablicach Vernekara (fig. 4) są pomocne, niezależnie od danych radiometrycznych. Granice astronomiczne mogą się różnić od początków ich odpowiednich oddźwięków klimatycznych o ± 1000 lat, co wynika z wtrąceń drobniejszych wahań insolacyjnych ocenianych zazwyczaj na około 2000 lat.

Wstecz, do około 350 000 lat, obserwuje się wyraźne korelacje tendencji dodatnich z interglacjami względnie interstadialami oraz korelacje tendencji ujemnych z oziębieniem klimatu. Widoczna jest również zbieżność, na ogół ciepłych, pierwszych części każdego z cyklów glacialnych z fazami wyraźnej zmiany sezonowej i na odwrót.

W ten sposób w okresie ostatnich 350 000 lat sprawdzają się granice przejść od glacialów do interglacialów, czyli *terminations* (fig. 4).

Czasy odleglejsze od 350 000 lat są poza zasięgiem datowań radiometrycznych. Niemniej jednak liczba glacialów, szacowana według danych astronomicznych, może wynosić 7 podczas ostatnich 700 000 lat, czyli o jeden mniej niż to wynika z przekrojów datowanych magnetycznie.

Na podstawie ekstrapolacji minionych okresowości można podjąć próbę oceny prawdopodobnego rozwoju klimatu w przyszłości. Dane dostarczone przez Lamba, Manleya i innych wskazują, że ścisłym odpowiednikiem ciepłych lat trzeciej dekady XX wieku są te, które przypadały na pierwszą połowę XVIII wieku, niemal dokładnie przed 200 laty.

Dalsza ekstrapolacja na przyszłość zapowiada prawdopodobne ochłodzenie około 1990 r., lekkie ocieplenie prawdopodobnie w latach 2030 i 2070, ponowne ochłodzenie około 2090 r. i względnie ciepłe maksimum około 2130 r. Kontynuacja obecnego ochładzania w czasie najbliższych lat 20 doprowadzi do obniżenia średniej temperatury rocznej o $0,3\text{--}0,4^\circ\text{C}$ w stosunku do 1970 r., później (do około 2040 r.) temperatura może się podnieść o około $0,5^\circ\text{C}$.

Współczesna tendencja w promieniowaniu słonecznym może być skuteczną w potęgowaniu ochładzających oscylacji i ograniczyć ogrzewanie. Dwa fakty są wysoce prawdopodobne: 1 — w 2100 r. Ziemia będzie chłodniejsza niż obecnie i 2 — ocieplenie spowodowane działalnością ludzką będzie w tym czasie zaledwie dostrzegalne w skali całego globu.

WNIOSKI I UWAGI KRYTYCZNE

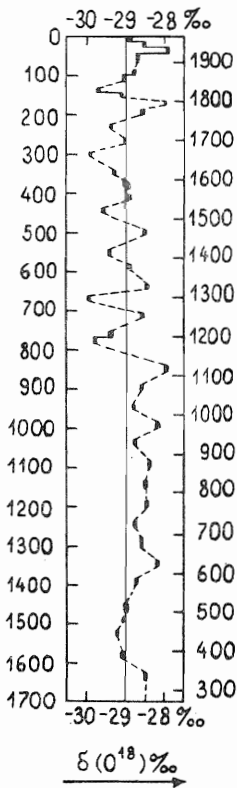
KRZYWE PALEOTEMPERATUR I OGÓLNA OCENA HIPOTEZ

Najbardziej uderzającym zjawiskiem jest okresowość, a nawet cykliczność w przebiegu zmian klimatycznych, które są szczególnie widoczne w czasie późnokenozoicznego ochłodzenia. O tej okresowości świadczą doskonale różnego typu osady śródlądowe oraz ślady ruchów eustatycznych zachowane w rzeźbie i w osadach nadbrzeżnych.

Zmiany podstawowych elementów ruchu Ziemi dokoła Słońca, a mianowicie: precesja punktów równonocy, nachylenie ekliptyki i zmiany ekscentryczności orbity ziemskiej przebiegają okresowo, a w oparciu o te okresowości Milankowicz dokonał obliczeń i sporządził wykresy zmodyfikowane ostatnio przez Vernekara. Poza tym mechanizmem astronomicznym okresowość zmian klimatycznych przejawia się w zmiennej pro-

dukcji C^{14} , większej w okresach chłodniejszych, mniejszej w cieplejszych oraz w zmiennym stosunku zawartości izotopów tlenu w osadach głębokomorskich, co pozwoliło C. Emilianiemu (1955, 1956) na wykreślenie krzywych paleotemperatur, tzn. temperatur oceanicznych wód powierzchniowych w następujących, jedne po drugich przedziałach czasowych.

Ostatnio pojawiła się metoda określania paleotemperatur na podstawie stosunku zawartości O^{18} do O^{16} w rdzeniach lodowcowych. Wypracowali ją Duńczycy (W. Dansgaard, S. J. Johnsen, J. Møller, 1969; W. Dansgaard, H. Tauber, 1969) mając do dyspozycji rdzeń uzyskany z wierceń w Camp Century na Grenlandii, gdzie przewiercono całą masę lądolodu aż do podłoża na głębokości 1390 m.



Opady, głównie śnieżne, spadając na powierzchnię Grenlandii i grenlandzkiego lodowca, zawierały taki stosunek zawartości O^{18} do O^{16} , który zależał od temperatury w danym momencie. Czas obliczono na podstawie średniego tempa akumulacji z uwzględnieniem sposobu i kierunku ruchu mas w różnych częściach lodowca. Wskaźnik zawartości O^{18} i O^{16} został obliczony w porównaniu do zawartości tych izotopów w standardowej wodzie oceanicznej (*Standard Mean Ocean Water*) i oznaczonego jako $\delta(O^{18})\text{‰}$. Wyższe wartości $\delta(O^{18})$ wskazują na wyższe temperatury w czasie powstawania opadów. $\delta(O^{18}) = 30\text{‰}$ jest przybliżoną granicą wieków ciepłych i zimnych. O dokładności tej metody świadczy fig. 6, gdzie widać odchylenie krzywej $\delta(O^{18})$ sięgające niemal do -28‰ w ciepłych latach dwudziestych i trzydziestych bieżącego stulecia. Przy pomocy tej samej krzywej odkryto po raz pierwszy na zachodniej półkuli oscylacje allerödu i böllingu (fig. 7). Paleotemperatury lodowca grenlandzkiego wykazują zmiany okresowe 120, 940, 13 000-letnie (fig. 8).

Fig. 6. Zmiany wartości $\delta(O^{18})$ w najwyższych 470 m wiercenia rdzeniowego w lodowcu grenlandzkim pod Camp Century (wg W. Dansgaard, S. J. Johnsen i J. Møllera, 1969a)

Valeurs variables du $\delta(O^{18})$ dans le core supérieur jusqu'à la profondeur de 470 m dans la calotte glaciaire à Camp Century (d'après W. Dansgaard, S. J. Johnsen, J. Møller, 1969a)

W. Dansgaard, S. J. Johnsen, J. Møller (1969) sądzą, że przyczyną wahań $\delta(O^{18})$ jest najprawdopodobniej zmienność wytwarzania energii słonecznej. W uzasadnieniu tego poglądu podają, że podobne przyczyny rządzą wytwarzaniem się C^{14} . W okresach wysokiej aktywności plam słonecznych zmniejsza się produkcja C^{14} , natomiast w tych samych cieplejszych okresach zwiększa się wartość $\delta(O^{18})$. Jednakże większość uczonych wyraża daleko idącą rezerwę w ocenie omawianej przyczyny zmian klimatycznych. Wynika to z niedostatecznej znajomości procesów słonecznych, a zwłaszcza efektów plam i pochodni.

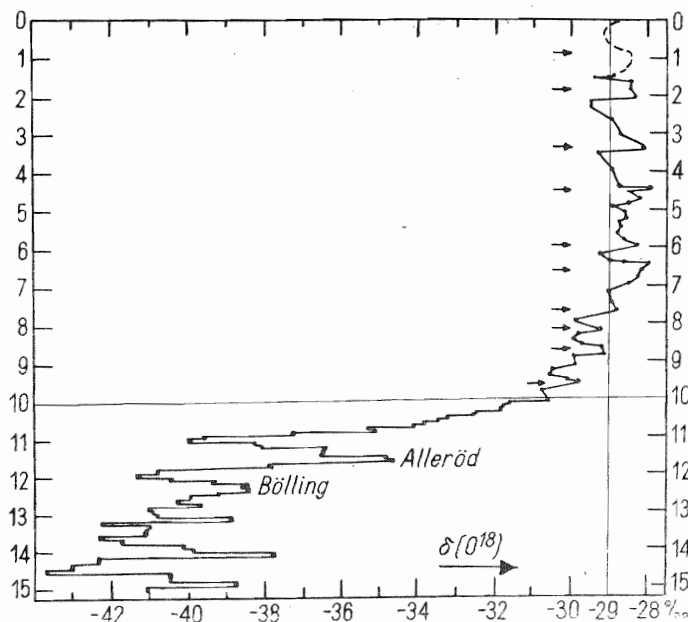


Fig. 7. Zmiany klimatyczne zinterpretowane na podstawie wartości $\delta(O^{18})$ w czasie ostatnich 15 000 lat (wg W. Dansgaard, S. J. Johnsen i J. Møllera, 1969a)

Changements climatiques reconstruits selon les valeurs du $\delta(O^{18})$ pendant les derniers 15 000 ans (d'après W. Dansgaard, S. J. Johnsen, J. Møller, 1969a)

Na ogół sądzi się, że zmiany te są prawdopodobne, ale wątpi się, aby były one wystarczające do wywołania poważniejszych zmian w klimacie Ziemi.

Wreszcie i w argumentacji W. Dansgaard i współautorów (1969) można znaleźć słabe strony hipotezy o zmiennej produkcji energii słonecznej. Autorzy stwierdzają, że w ostatnim tysiącleciu było 5 minimów wytwarzania się C^{14} , z czym koincydowały ściśle maksma wartości $\delta(O^{18})$, a mianowicie w latach: 980, 1110, 1460, 1600—1700. Jednakże dwa inne minima C^{14} w 680 i w 820, nie znalazły odpowiedniego wyrazu na krzywej $\delta(O^{18})$.

Wyjaśnienia autorów, że lata 680 i 820 przypadają na okres klimatycznej stagnacji, nie przemawia chyba za słusznością popieranej przez nich teorii.

O wiele pełniejsze i ściślejsze są wiadomości o cyklicznych zmianach w dopływie na Ziemię promieni słonecznych, których zmienne rozmieszczenie na różnych obszarach naszego globu wynika z okresowych i regularnych zmian różnych i złożonych ruchów Ziemi dookoła Słońca.

Wszystkie te zmienne elementy astronomiczne obliczone przez Milankowicza, a później uzupełnione i zmodyfikowane, dają obraz graficzny zmian w czasie ostatniego miliona lat. Jednakże zmiana dopływu ciepła wynikająca z mechanizmu Milankowicza jest zbyt mała, aby mogła spowodować zlodowacenie lub deglacjację, czyli — inaczej i lepiej — nie jest

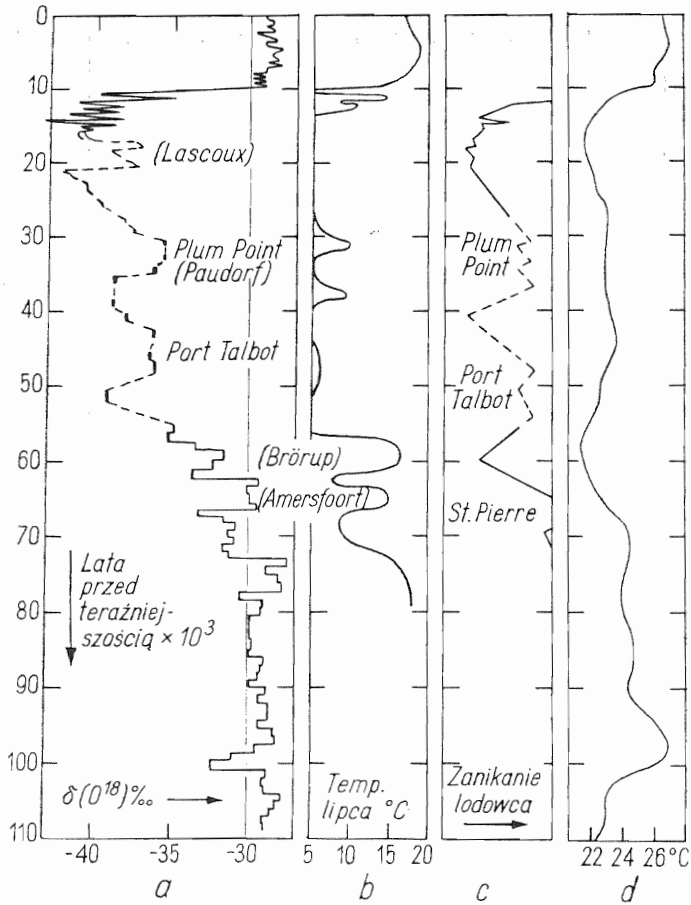


Fig. 8. Zmiany klimatyczne podczas ostatnich 110 000 lat (wg W. Dansgaard, S. J. Johnsen i J. Møllera, 1969a)

Changements climatiques pendant les derniers 110 000 ans (d'après W. Dansgaard, S. J. Johnsen, J. Møller, 1969a)

a — zmiany wartości $\delta(O^{18})$ w lodowcu grenlandzkim na podstawie wiercenia w Camp Century; b — temperatura lipca na podstawie holenderskich badań palinologicznych; c — położenie krawędzi lodowca laurentyjskiego w kotlinach Ontario i Erie, datowane przy pomocy C^{14} ; d — paleotemperatura wód powierzchniowych Morza Karaibskiego na podstawie izotopów tlenu w osadach głębokomorskich

a — valeurs $\delta(O^{18})$ à Camp Century; b — température du juillet d'après les analyses palynologiques hollandaises; c — position de la glaciation laurentienne dans les bassins d'Ontario et d'Erie, fondée sur datations du C^{14} ; d — paleotempérature des eaux superficielles de la Mer des Antilles d'après les isotopes de l'oxygène

w stanie wywołać zmian klimatycznych. Zmiany insolacji mogą natomiast odegrać rolę wyzwalacza zmian klimatycznych jedynie wtedy, kiedy są wspomagane przez sprzężenia zwrotne (feedback), np. przez wydźwiganie łądów lub wzmożone wartości albedo.

Fascynujące hipotezy autocykliczne nie opierają się w istocie rzeczy na mechanizmach całkowicie samoczynnych. Teorie względnie modele A. T. Wilsona (1964, 1966) i H. Flohna (1969) wymagają dodatniego sprzężenia zwrotnego w postaci ruchów płaszcza ziemskiego, bowiem sterująca zmianami klimatycznymi Antarktyda musiała znaleźć się w pozycji biegunowej i trzeba było, aby jej obszar był rozmieszczony symetrycznie w stosunku do bieguna południowego. Hipoteza Tannera nie wymaga przesunięć płaszcza, tylko zakłada ruchy izostatyczne w dół lub w górę, zależnie od obecności i nacisku czasz lodowcowych lub ich zaniku. Jest to więc hipoteza rzeczywiście autocykliczna, wydaje się jednak, że hipoteza ta może się sprawdzać dla dłuższych okresów rzędu glacjałów i interglacjałów, trudniejsze natomiast jest jej przyjęcie dla krótszych oscylacji, takich jak bölling lub alleröd.

Teorie dryftu kontynentów i rozpościerania się oceanów mają zastosowanie w wyjaśnianiu zmian klimatycznych tylko wtedy, jeśli spowodowały przesunięcie kontynentów na obszary biegunowe, jak to miało miejsce prawdopodobnie w przypadku Gondwany, a ostatnio Antarktydy. Ruchy te odegrały rolę dodatniego sprzężenia zwrotnego, ale o ochłodzeniu klimatu i wytworzeniu się lodowców zadecydowały zjawiska meteorologiczne.

Nie inaczej przedstawia się sprawa ruchów pionowych, choć ich rola jest bardziej skomplikowana. W ich wyniku części powierzchni Ziemi są podnoszone do wyższych, chłodniejszych poziomów atmosfery, a wskutek tego, zależnie od szerokości geograficznej i rozmieszczenia intensywności insolacji oraz od krążenia mas powietrznych, ulegają oziębianiu i mogą być zlodowaczone. Na tym polega istota hipotezy solarno-topograficznej, która, jak widać, musi się liczyć więcej niż z jedną przyczyną. Złożona hipoteza solarno-topograficzna jest bardzo atrakcyjna, gdyż może wytłumaczyć nie tylko kenozoiczne, ale również i dawniejsze wielkie ochłodzenia klimatu. C. E. P. Brooks (1949) wyróżnił aż siedem wielkich ochłodzeń odpowiednio do siedmiu okresów orogentycznych w historii Ziemi. Słusznie jednak zauważa się, że nie wszystkie orogenezy miały miejsce w szerokościach geograficznych podatnych na ochładzanie (B. W. Sparks, R. G. West, 1972).

Ruchy górotwórcze spełniały jeszcze inną pośrednią rolę w zmianie warunków klimatycznych. Obecność gór, zależnie od ich wysokości, a przede wszystkim od kierunku, wpływa na skuteczność wymiany mas powietrznych oceanicznych i kontynentalnych. Wielce pouczające w tym względzie jest porównanie zlodowacenia północnoamerykańskiego z europejskim. Ładolody amerykańskie były znacznie większe, rozleglejsze od europejskich, gdyż wędrowały swobodnie w kierunku źródeł alimentacji opadów śnieżnych na Atlantyku i w Zatoce Meksykańskiej. Inaczej było z lodowcami skandynawskimi, które były w znacznym stopniu odgradzone od Atlantyku przez Góry Skandynawskie, a od ciepłego Morza Śródziemnego przez średniogórza środkowoeuropejskie i przez potężny wał systemu alpejskiego.

Hipoteza solarno-topograficzna ma wielu zwolenników dzięki prostocie założeń i staje się coraz prawdopodobniejsza wobec postępu badań neotektonicznych, w rezultacie których zmniejszą się, być może, trudności wytłumaczenia znacznego opóźnienia ochłodzeń w stosunku do okresów

orogenetycznych. Ruchy pionowe mogą wyjaśnić ochłodzenie obszaru wyniesionego oraz tych, które zostały odcięte od dopływu cieplejszych mas powietrza oceanicznego. Nie można natomiast wyłącznie przy ich pomocy wytłumaczyć okresowości zmian klimatycznych. Do wytłumaczenia zmian okresowych, nawet cyklicznych, trzeba włączyć sprzężenia zwrotne, dodatnie i ujemne, których źródło można znaleźć w zmiennym rozmieszczeniu insolacji oraz w szeregu samoczynnych procesów, jak np. albedo, parowanie, transport drobnego materiału eolicznego i ablacja.

Z dokonanego przeglądu wynika, że raczej nie ma pojedynczych przyczyn zmian klimatycznych, ale ich powiązane zespoły. Wykazano to dla tzw. hipotez autocyklicznych, a wydaje się, że można uzasadnić podobne stanowisko w stosunku do autorów reprezentujących skrajne poglądy w dylemacie przyczyn wyłącznie ziemskich lub odwrotnie, jedynie pozaziemskich. Nie warto wracać do omówionych już opinii W. Dansgaard'a i współautorów (1969) o zmiennej produkcji energii słonecznej.

Poza argumentami przedstawionymi poprzednio wystarczy stwierdzenie, że obecnie nie rozporządzamy dostatecznymi danymi o procesach słonecznych. Z tego samego powodu poza dyskusją pozostaną poglądy M. Stuivera (1972) o zmiennej intensywności promieni wysyłanych przez Słońce.

R. W. Fairbridge (1972, p. 283) stwierdza, że wszystkie ochłodzenia znane w dziejach geologicznych spowodowane są wyłącznie przez geotektonikę a nie przez zdarzenia pozaziemskie. Jednakże wyrażając dalej wątpliwości co do tego czy mechanizm Milankowicza mógł być dostatecznym wyzwalaczem zmian klimatycznych, stwierdza, że najnowsze badania satelitarne wykazały decydującą rolę promieni ultrafioletowych i koncentracji ozonu w stratosferze w wytwarzaniu cieplarnianej osłony *green-house factor* (l. c., p. 297).

Skrajnie różny pogląd wyraża G. J. Kukla (1972), który pisze, że jedynym prawdopodobnym źródłem okresowości zmian klimatycznych może być mechanika kosmiczna (l. c., p. 66), ale dalej dowodzi, że zmiany klimatyczne zależą w pierwszym rzędzie od rozciągłości pól śnieżnych oraz lodu kontynentalnego i morskiego. Ostatecznie we wnioskach stwierdza, że zmienne pozaziemskie inicjują tylko małe zmiany w efektywnej insolacji, która wpływa na zmiany klimatyczne przez sezonowe pola śnieżne wzmagające albedo, przez oceany dostarczające opadów oraz przez zmiany radiacyjnej przejrzystości uwarunkowanej zmiennym przepływem promieni UV i X, które rządzą produkcją ozonu (l. c., p. 88).

Można wątpić o istotnie skrajnych różnicach omawianych poglądów, jeśli będzie się pamiętało o głębokich i zasadniczych powiązaniach Ziemi z układem słonecznym. Żadne zdarzenia meteorologiczne nie są odcięte od insolacji, a jedynie ich przebieg lub raczej zakłócenia mogą zależeć ściślej od procesów wyłącznie ziemskich albo też od zdarzeń pozaziemskich.

JEDNOSTRONNOŚĆ POJMOWANIA OBJAWÓW ZIMNEGO KLIMATU W HIPOTEZACH PRZYCZYN ZMIAN KLIMATYCZNYCH

We wszystkich omawianych pracach i w wielu innych pisze się o przyczynach zlodowaceń, choć najczęściej z toku rozumowania wynika, że ma się na myśli przyczyny ochładzania klimatu w różnych rozdziałach dzie-

jów Ziemi, a przede wszystkim w późnym kenozoiku. Nie jest to bynajmniej sprawa jedynie formalna używania „lodowca” czyli zlodowacenia jako synonimu „zimnej epoki” lub „zimnych wieków”, gdyż najczęściej myśl autorów jest zaprzątnięta warunkami mechanizmu tworzenia się lodowców oraz ich zanikania. Rozważa się wprawdzie także zagadnienia okresów pluwialnych i akumulacji lessu, ale wszystko to jest podporządkowane tematyce glacialnej lub dokładniej zjawiskom tworzenia się i zanikania lodowców.

Trzeba się zgodzić z tym, że zjawianie się i przede wszystkim ekspansja wielkich lodowców kontynentalnych na obszary średnich szerokości geograficznych była zjawiskiem najbardziej typowym i bodaj najważniejszym w okresach wielkich ochłodzeń, z których najlepiej znane jest czwartorzędowe. Można natomiast stwierdzić z całą pewnością, że zlodowacenia nie są synonimami epok czy wieków zimnych, że nie są jedynymi objawami ochłodzeń klimatycznych i że różne postacie zachowania się lodowców nie zawsze są jednoznacznymi wyrazami towarzyszących im cech klimatycznych ani, tym bardziej, tendencji zmian klimatycznych.

Wątpliwości podpisanego na temat jednoznaczności świadectwa klimatycznego lodowców, a zwłaszcza wyrażane już dawniej uwagi (J. Büdel, 1951; J. Dylík, 1963, 1967) o synchronizacji zjawisk glacialnych z przyczynami tych zjawisk, znalazły niedawno poparcie w pracy M. F. Meiera (1965). Według tego autora lodowce mogą objawiać lub wyznaczać zmiany klimatyczne, ale związki między zjawiskami glacialnymi i klimatycznymi są złożone i nie bezpośrednie. Na ogół środowisko meteorologiczne rządzi opadami śniegu, ale wpływy lokalne, głównie topograficzne mogą modyfikować w wysokim stopniu akumulację mas lodowcowych. Drobne zmiany sezonowe temperatury lub rozmieszczenia opadów mogą wpływać na całość akumulacji. Zmiany różnicy akumulacji i ablacji powodują zmiany miąższości lodowców, szybkość ruchu i długość przebytej drogi. Te trzy parametry rządzą szerokością ciała lodowca oraz jego właściwościami kinetycznymi. W obecnym stanie wiedzy nie można wyciągnąć wniosków o zmianach klimatycznych na podstawie zachowania się lodowców.

Wszelkie rozumowania w tym zakresie mogą prowadzić jedynie do wniosków przybliżonych i wyłącznie hipotetycznych. Opóźnienie dynamicznych reakcji lodowców na zmiany klimatyczne może trwać setki i tysiące lat.

Lodowce powstają w warunkach wilgotnego klimatu, na tyle tylko chłodnego, aby opady atmosferyczne występowały w fazie stałej. Zlodowaceniem wschodniej części Ziemi Baffina rządzą opady śnieżne a nie temperatura (J. T. Andrews, R. G. Barry, R. S. Bradley i in., 1972). Ci sami autorzy stwierdzili, że zlodowacenie Ziemi Baffina miało największe rozprzestrzenienie w najwcześniejszym stadium. Fakt ten powtarza się na wszystkich obszarach arktycznych. Wzrastająca surowość klimatu powodowała zmniejszenie się opadów, czego następstwem było kurczenie się lodowców. Zmniejszanie się objętości lodowca następowało wobec tego wtedy, kiedy świat wchodził w pełnię glacialnego trybu lub poprawnie — w pełnię wieku zimnego.

Do podobnych wniosków doszedł K. K. Markow i inni uczeni radzieccy. Zlodowacenia wzrastają w miarę zjawiania się obfitszych opadów śnieżnych. Większe opady śnieżne na Spitsbergenie sprzyjają rozwojowi

lodowców mimo wyższych temperatur letnich niż na Wyspie Wrangla, gdzie jest chłodniej, ale niedostatek śniegu przesądza o niedorozwinięciu lub braku lodowców (K. K. Markow, G. J. Łazukow, W. A. Nikołajew, 1965). Rozprzestrzenienie lodowca północnoamerykańskiego i europejskiego zależało w większym stopniu od dopływu opadów niż od stopnia ochłodzenia klimatu (K. K. Markow, A. A. Wieliczko, G. I. Łazukow i in., 1968). W tej samej pracy stwierdza się zbieżność lokalnych faz zlodowacenia północnowschodniej Syberii z ogólnoziemskim ocieplaniem klimatu. Natomiast w kontynentalnych fazach mroźnego klimatu lodowce kurczyły się i zamierały w rezultacie nikłej alimentacji.

Warunki tworzenia się i ekspansji lodowców są określone również termicznie, opady śnieżne wymagają temperatury powietrza poniżej 0°C . Średnia roczna ilość wytworzenia się lodowców musi być ujemna (B. N. Dostowałow, W. A. Kudriawcew, 1967).

Również termicznie jest określona granica wiecznego śniegu. Podobnie krawędzie zasięgu lodowców kontynentalnych w danym czasie muszą się znajdować w takich warunkach termicznych, przy których byłaby zachowana równowaga budżetu mas lodowcowych, zapewniająca zawsze względną stagnację lodowców. Nie wynika jednak z tego bynajmniej, aby na zewnątrz lodowców musiała panować wyższa temperatura.

Przeciwnie, w historii czwartorzędu stwierdzano niejednokrotnie, że poza lodowcami rozciągała się wieczna zmarzlina, w obrębie której przebiegały procesy wymagające niskich temperatur. Lodowiec nie wkroczył na te obszary wskutek braku dopływu mas lodowcowych, a więc i śnieżnych, a nie z powodów termicznych.

Jest wielce znamienne, że wszystkie hipotezy przyczyn zlodowaceń biorą pod uwagę obszary położone w sąsiedztwie Atlantyku. Chyba nie ulega wątpliwości, że wynika to z zadawnionego kompleksu glacialnego w pojmowaniu czwartorzędu i zjawisk czwartorzędowych. Istotnie bowiem w miarę narastania odległości od Atlantyku, zwłaszcza w kierunku wschodnim w Eurazji, dawne lodowce kontynentalne wykliniały się, sięgały coraz mniej w głąb lądu i wreszcie w północno-wschodniej Azji nie było ich nawet nad samym morzem.

Badania czwartorzędu, a zwłaszcza przyczyn zmian klimatycznych, prowadzono przede wszystkim na obszarach nazwanych bardzo trafnie i zgrabnie przez R. W. Fairbridge'a wrażliwymi średnimi szerokościami geograficznymi — *sensitive middle latitudes* (G. J. Kukla, 1972). Wydaje się, że obszarom tym należy przeciwstawić mało wrażliwe, stabilne obszary północno-wschodniej Azji wraz z przyległymi terenami zmarzlinowymi Ameryki Północnej.

Warto przypomnieć, że Wschodnia Syberia, a w szczególności Patomskoje Nagorje, była obszarem, na którym — niemal równolegle z hipotezą Torella — narodziła się koncepcja Kropotkina o zlodowaceniu kontynentalnym. Koncepcja była słuszna, ale obszar na którym została wypracowana, nie był najodpowiedniejszy. Stwierdził to Jan Czerski (1882), który w oparciu o własne badania i upewniony poglądami znakomitego klimatologa Wojejkowa, dowiódł, że na tym obszarze rozwinęła się wieczna zmarzlina, natomiast ostrość klimatu i suchość nie sprzyjały rozwojowi zlodowaceń. Późniejsze badania usunęły wszelkie wątpliwości przemawiając za zmarzlinową koncepcją Czerskiego (K. K. Markow, G. I.

Łazukow, W. A. Nikołajew, 1965). Największa na globie masa kontynentalna, odcięta od ciepłych oceanów i sąsiadująca z zamarzającym Północnym Oceanem Lodowatym, wykluczała tworzenie się lodowców, stwarzała natomiast doskonałe warunki do tworzenia się głębokiej wiecznej zmarzliny i do jej przetrwałego zalegania niemal nie wrażliwego na wszystkie, nawet najpoważniejsze oscylacje ciepła.

Podkreśla się stale, zwłaszcza w pracach traktujących o przyczynach zmian klimatycznych — raczej w redakcji przyczyn zlodowaceń — trwałość istnienia lądolodów Grenlandii i przede wszystkim Antarktydy. Czy nie należy równocześnie podkreślać trwałości wiecznej zmarzliny w diametralnie różnych warunkach, gdzie oceaniczności i obfitości opadów przeciwstawia się skrajny kontynentalizm i wielkie ubóstwo opadów?. Wydaje się, że świadomość tych skrajnie różnych faktów powinna ułatwić rozwiązanie problemu przyczyn zmian klimatycznych.

O Antarktydzie i Grenlandii wiadomo, że ich zlodowacenia istnieją od końca trzeciorzędu. Wiek wiecznej zmarzliny północno-wschodniej Azji nie jest znany dokładnie i bezpośrednio. Istnieje jednak szereg faktów, które pośrednio świadczą o wytworzeniu się wiecznej zmarzliny w trzeciorzędzie (W. W. Baulin, 1958, 1962; W. W. Baulin, E. B. Biełopuchowa, G. I. Dubikow i in., 1967; B. N. Dostawałow, W. A. Kudriawcew, 1967; K. K. Markow i współpracownicy, 1965, 1968; A. I. Popow, 1957).

Klimat neogenu w miocenie i pliocenie stawał się coraz bardziej kontrastowy, chłodniejszy i suchszy, w miarę zbliżania się do czwartorzędzu. Wzmagało się działanie zimnego antycyklonu i pojawiały się coraz częściej inwersje w zagłębieniach między górami. Sprzyjały temu narastające ruchy neotektoniczne. W rezultacie, być może, już w neogenie a z całą pewnością w eoplejstocenie, lasy szerokolistne w Syberii Północnej ustąpiły miejsca tajdze.

Na obszarze północno-wschodniej Azji zjawia się nowa strefa geograficzna, która z czasem przesuwa się coraz bardziej na południe. Strefę tę, pomyślaną początkowo glaciologicznie w nawiązaniu do poglądów Jana Czerskiego, nazwał Turaninow w 1938 r. eoarktyką (K. K. Markow, G. J. Łazukow, W. A. Nikołajew, 1965). Koncepcję eoarktyki poparli botanicy i zoologowie znajdując na jej obszarze ślady tundry i ustalając równocześnie jej charakter strefowy oraz położenie cirkumpolarne. Eoarktyka jest formacją stosunkowo młodą, gdyż rozwinęły się w niej endemiczne gatunki, natomiast nie zdołały jeszcze wytworzyć się endemiczne rodziny. Oczywiście, powstawanie eoarktyki jest następstwem zmian klimatycznych w kierunku chłodnym i kontynentalnym, a równocześnie jest ona świadectwem pośrednim wytworzenia się wiecznej zmarzliny. Jest to zapewne wiek wczesnoplejstoceni (K. K. Markow i współpracownicy, 1968), za czym przemawiają m. in., a raczej przede wszystkim, resztki organiczne znalezione w Mamuciej Górze nad Ałdanem (E. M. Katasonow, 1969; K. K. Markow, 1973).

Wraz z zanikaniem zlodowaceń ku wschodowi Eurazji, gdzie lodowce kontynentalne są zastępowane przez wieczną zmarzlinę lub, według terminologii radzieckiej, przez zlodowacenie podpowierzchniowe, zmniejsza się żywość reakcji na zmiany klimatyczne, zwłaszcza w wiekach lub dobach (interglacjalach i interstadialach) ciepłych, względnie cieplejszych. Stabilność, znacznie większa niż lodowców Antarktydy i Grenlandii, osiąga maksimum w NE Syberii, gdzie wieczna zmarzlina trwa nieprzerwa-

nie prawdopodobnie od końca trzeciorzędu, a na ocieplanie reaguje jedynie przez krótkotrwałe wzrastanie miąższości strefy czynnej.

Nie należy wnosić pochopnie, że tylko zlodowacenia najpełniej wykształcone w Europie Zachodniej i Środkowej były wrażliwe na zmiany klimatyczne. Znaczniejsza wrażliwość, większy dynamizm wywoływany przez zmiany klimatyczne był cechą ogólną zachodnich obszarów Eurazji i odnosił się zarówno do lodowców jak i do wiecznej zmarzliny. Istniała jednak zasadnicza różnica w trybie dynamicznych zdarzeń lodowcowych i zmarzlinowych. Lodowce reagowały szczególnie wyraźnie na ocieplenia, zmarzlina natomiast — na ochłodzenia.

Plejstocenska zmarzlina zanikała przede wszystkim wtedy, kiedy nasunęły się na nią lodowce kontynentalne o znacznej miąższości. Najbardziej jednak charakterystycznym dla niej zjawiskiem było jej transgredowanie na obszary opuszczone przez zlodowacenia, co dokonywało się oczywiście w warunkach mroźnego i kontynentalnego klimatu. A. I. Popow (1957) podaje przykład wytworzenia się wiecznej zmarzliny, zachowanej do chwili obecnej, na osadach morenowych na obszarze górskim w okolicach Norylska. W Europie znane są podobne fakty w młodziej części ostatniego wieku zimnego, kiedy zmarzlina transgredowała na obszary północnej Polski i południowej Szwecji.

Wieczna zmarzlina istniała w Europie przed maksymalnym nasunięciem się zlodowacenia skandynawskiego, co wraz z takimi zjawiskami peryglacjalnymi, jak tworzenie się wieloboków szczelin mrozowych i pingo świadczy o wielkiej surowości klimatu. Nie przypadkiem też krzywe paleotemperatur (np. W. Dansgaard, S. J. Johnsen, J. Møller, 1969; G. J. Kukla, 1972) wykazują minima termiczne, które nie zbiegają się z maksymalnym zasięgiem ostatniego zlodowacenia, przypadają natomiast na czasy poprzedzające maksimum rozciągłości tego zlodowacenia lub później, po wycofaniu się lodowca, za którym przesunęła się ku północy wieczna zmarzlina. Są to zresztą fakty znane z wielu rekonstrukcji paleogeograficznych (J. Dylík, 1966, 1967; A. Jahn, 1969; T. Hammen, G. C. Maarleveld i in., 1967; T. Hammen, T. A. Wijmstra i in., 1971; W. H. Zagwijn, 1961; R. Paepe, A. Pissart, 1969).

Od dawna wiadomo, że najpełniejsze kolumny stratygraficzne skonstruowano na podstawie osadów nieglacjalnych, a przede wszystkim peryglacjalnych. Nie ulega wątpliwości, że reakcje zjawisk peryglacjalnych na zmiany klimatyczne były szybsze i bardziej bezpośrednie niż zjawisk glacialnych. Wynika stąd chyba niewątpliwy wniosek, że w badaniach przyczyn zmian klimatycznych, zwłaszcza ochłodzeń, powinno się brać pod uwagę ślady dawnych zjawisk peryglacjalnych, a w szczególności zmarzlinowych. Bogaty arsenał materiałów bardzo różnorodnych, nagromadzony przez autorów niezliczonych hipotez, winien być uzupełniony faktami peryglacjalnymi. Wolno się spodziewać, że uwzględnienie tych materiałów może się walnie przyczynić do pogłębienia wiedzy o przyczynach zmian klimatycznych i do ujednoczenia poglądów.

OGÓLNE WNIOSKI

Przedstawione uwagi wraz z szeregiem faktów upoważniają do wyciągnięcia kilku ogólnych wniosków.

Poza nielicznymi autorami, jak R. W. Fairbridge (1972), R. F. Flint

(1971), a przede wszystkim K. K. Markowi A. A. Wieliczko (1967), niemal wszyscy inni wypowiadający się na temat przyczyn zmian klimatycznych, identyfikują pojęcia ochłodzenia klimatu i zlodowacenia. Trzeba sobie uprzytomnić, że z całą pewnością pojęcia te nie są bynajmniej jednoznaczne. Poza plejstocenijskimi zjawiskami pluwialnymi świadczy o tym przede wszystkim obecność współczesnej i znacznie rozleglejszej wiecznej zmarzliny plejstocenijskiej. Zlodowacenia są tylko jednym z wielu objawów zimnego klimatu.

Wątpliwe dotąd zmiany w wytwarzaniu energii słonecznej oraz stwierdzone zmienne w czasie rozmieszczenia na globie intensywności nasłonecznienia nie były wystarczające do wywołania zmian klimatycznych. Nie były bezpośrednimi przyczynami tworzenia się zlodowaceń, wiecznej zmarzliny i innych objawów zimnego klimatu, nie prowadziły też bezpośrednio do zanikania tych objawów. Cały szereg faktów przemawia za słuszością przedstawionego wniosku. W skali całego globu uzasadniony jest metachronizm objawów oziębiania (K. K. Markow, G. I. Łazukow, W. A. Nikołajew, 1965; K. K. Markow, A. A. Wieliczko, 1967): najdawniejsze, bo jeszcze trzeciorzędowe zlodowacenie Antarktydy, późniejsze zlodowacenia na obszarach arktycznych i wczesoplejstocenijskie wytworzenie się wiecznej zmarzliny syberyjsko-alaskańskiej. Tę samą wymowę ma przeciwieństwo obszarów Ameryki Północnej i Eurazji, pozostających pod wpływem Atlantyku oraz zlodowacenia Antarktydy i wiecznej zmarzliny syberyjskiej. Obszary podlegające wpływowi atlantyckim wykazywały w plejstocenie wielką zmienność, wielką dynamiczność w zachowaniu się zarówno zlodowaceń, jak i zmarzliny, natomiast zlodowacenie pokrywające wielki kontynent Antarktydy i zmarzlina syberyjska odznaczały się niemal niewzruszoną stabilnością, trwającą do dnia dzisiejszego.

Inne argumenty znajdujemy w wydatnym zróżnicowaniu wartości oziębiania plejstocenijskiego na Ziemi. Najwyższe zróżnicowanie stwierdzono w średnich szerokościach geograficznych północnej półkuli, a najmniejsze w pasie równikowym, przy czym znamienne jest, że paleotemperature pasa równikowego wykazują większą zmienność na Atlantyku niż na Pacyfiku. Pośrednie miejsce zajmują obszary arktyczne. Wydaje się chyba oczywiste, że przyczyny omówionych różnic nie wynikają z promieniowania słonecznego, lecz że są one następstwem zjawisk ziemskich, a przede wszystkim wymiany ciepła między obszarami o różnej koncentracji lądów i mórz.

K. K. Markow (1969) podaje za C. Emilianim, że temperatura wód tropikalnych obniżyła się 100 razy szybciej w plejstocenie niż w czasie 30 milionów lat w późnym kenozoiku, przed plejstoceniem. Można by upatrywać w tym argument przemawiający za bezpośrednim wpływem zmian insolacji. Istnieją jednak dane, które pozwalają zinterpretować różnice tempa ochładzania tropikalnych wód oceanicznych przy pomocy mechanizmów ziemskich. Wolno wziąć pod uwagę powolność ochładzania wód głębinowych, które według H. Flohna (1969) osiąga 1°C w czasie do 1 000 000 lat, ale bardziej przekonujące są dowody dostarczone przez W. Dansgaard i H. Taubera (1969), którzy wykazali, że krzywe „paleotemperatur” C. Emilianiego są raczej krzywymi „paleoglacjalnymi”. Jest zrozumiałe, że oziębianie równikowych wód oceanicznych odbywało się znacznie szyb-

ciej wtedy, kiedy na kontynentach narastały masy lodowcowe. Jest wielce prawdopodobne, że nawet drobne zmiany insolacji, wynikające ze zmiennej produkcji energii lub zmiennego rozmieszczenia usłonecznienia, wyzwały względnie przyspieszały rozwój pewnych zjawisk meteorologicznych. Wzrost lub zanik lodu szelfowego oraz pól śnieżnych rządzą wartością albedo, które jest jednym z najpotężniejszych czynników klimatycznych.

Omawiane już przykłady Gondwany i Antarktydy dowodzą, że poziome ruchy płaszcza ziemskiego mają bezpośrednie znaczenie dla zmian klimatycznych. Podobne ruchy, choć na mniejszą skalę, odbyły się również na obszarze Arktyki w późnym kenozoiku (A. P. Puminow, A. F. Graczew, 1969).

Doniosłość ruchów pionowych omówiono wystarczająco. Warto tylko dodać szereg nowych wiadomości na temat ruchów neotektonicznych w Arktyce. Ruchy między Uralem i ujściem Indygirki w końcu neogenu rozwinęły się maksymalnie w końcu pliocenu i na początku plejstocenu. Amplitudy tych ruchów w granicach platformy syberyjskiej wahały się od 60 m do 1 100 m, a przeciętnie 200 — 500 m. Jedynie w Górach Wierchojańskich osiągnęły aż 2000 m (M. G. Kiriuszina, J. I. Polkin, W. I. Sokołow i in., 1961). Zasluguje również na uwagę fakt, że w atlantyckim wycinku Arktyki ruchy tektoniczne miały miejsce przede wszystkim w późnym oligocenie i miocenie, w pacyficznym wycinku natomiast dominowały ruchy późnoliocenijskie (A. P. Puminow, A. F. Graczew, 1969). Obszar północnej Beringii aż do wtargnięcia morza miocenijskiego stanowił niemal zamkniętą zatokę, oddzieloną od wód atlantyckich przez łąd syberyjski i północnoamerykański aż do szer. geogr. 81—83°. Łądowy most Beringa został wytworzony ponownie w wieku Hemphillian (pontyjskim) w rezultacie ruchów tektonicznych (D. M. Hopkins, 1967). Ruchy neotektoniczne w Arktyce wywołały zmiany topograficzne, które spowodowały oziębienie bezpośrednio oraz przyczyniły się do izolacji tego obszaru.

Izolacja Arktyki oraz rozwój zlodowaceń i wiecznej zmarzliny alaskańsko-syberyjskiej przypominają kapitalną rolę wymiany mas wodnych i powietrznych. O roli tej świadczy większa dynamiczność zjawisk glacialnych i postglacialnych na obszarach przyatlantyckich. Podobne jest świadectwo większej zmienności termicznej równikowych wód Atlantyku. Doniosłość tego świadectwa staje się bardziej oczywista, jeśli przypomnieć stabilność wiecznej zmarzliny alaskańsko-syberyjskiej i mniejszą zmienność temperatury wód Oceanu Spokojnego.

Sprawę wymiany mas powietrznych, rządzącą z całą pewnością objawami warunków klimatycznych, a zapewne również w znacznym stopniu zmianami klimatu, można wyrazić inaczej — w relacjach wpływów oceanicznych i kontynentalnych. Relacje te określa w sposób prostszy stopień kontynentalizmu wyrażony przez współczynnik kontynentalizmu. K. K. Markow i A. A. Wieliczko (1967) określają ten współczynnik (za Iwanowem) jako $K = A_1 - A_0$, gdzie A_1 oznacza średnią amplitudę roczną w danym miejscu, A_0 — roczną amplitudę średnią dla danej szerokości geograficznej. Współczynnik K kontynentalizmu wzrasta od Atlantyku ku wschodowi Eurazji osiągając maksymalną wartość +33° C w obszarze Wierchojańska. Jest oczywiste, że w pojęciu kontynentalizmu, obok przed-

stawionych cech termicznych, są implikowane również i wartości opadów, które maleją w kierunku narastania wskaźnika kontynentalizmu.

Autor ogranicza własne uwagi, gdyż problematyka przyczyn zmian klimatycznych, zwłaszcza plejstocenijskich, zjawiała mu się na marginesie innego zagadnienia. Jest to zagadnienie paralelizacji zdarzeń glacialnych i peryglacialnych w czasie ostatniego wieku zimnego. Rozwiązanie tego problemu nie wydawało się możliwe bez bliższego wglądu w sprawę przyczyn zmian klimatycznych.

Instytut Geografii
Uniwersytetu Łódzkiego
Łódź, ul. M. Skłodowskiej-Curie 11
Nadesłano dnia 7 czerwca 1973 r.

PIŚMIENNICTWO

- ANDREWS J. T., BARRY R. G., BRADLEY R. S., MILLER G. H., WILLIAMS L. O. (1972) — Past and present glaciological responses to climate in Eastern Baffin Island. *Quaternary Research*, **2**, p. 303—314.
- BELLAIR P. (1966) — Réflexions sur les glaciations. *Rev. géogr. dyn.*, **8**, p. 335—341.
- BROOKS C. E. P. (1949) — *Climate through the ages*. E. Benn. London.
- BÜDEL J. (1951) — Die Klimazonen des Eiszeitalters. *Eiszeitalter u. Gegenwart*, **1**.
- DANSGAARD W., JOHNSEN S. J., MØLLER J. (1969) — One thousand centuries of climatic record from Camp Century on the Greenland ice sheet. *Science*, **166**, p. 377—381.
- DANSGAARD W., TAUBER H. (1969) — Glacier oxygen-18 content and Pleistocene ocean temperature. *Science*, **166**, p. 499—502.
- DAUVILLIER A. (1972a) — Sur la théorie astronomique des périodes glaciaires. *Cahiers de géogr. de Québec*, **16**, p. 461—464.
- DAUVILLIER A. (1972b) — Sur les rapports existant entre les chronologies des inversions géomagnétiques et des glaciations. *Cahiers de géogr. de Québec*, **16**, p. 465—468.
- DYLIK J. (1963) — Nowe problemy wiecznej zmarzliny plejstocenijskiej. *Acta geogr. Lodz.*, **17**, p. 93.
- DYLIK J. (1966) — Znaczenie peryglacialnych elementów w stratygrafii plejstocenu. *Czas. geogr.*, **37**, p. 131—151.
- DYLIK J. (1967) — Główne elementy paleogeografii młodszego plejstocenu Polski środkowej. *Czwartorzęd Polski*. PWN.
- EMILIANI C. (1955) — Pleistocene temperatures. *Jour. Geol.*, **63**, p. 538—578.
- EMILIANI C. (1958) — Paleotemperature analysis of core 280 and Pleistocene correlations. *Jour. Geol.*, **66**, p. 264—275.
- FAIRBRIDGE R. W. (1972) — Climatology of a glacial cycle. *Quaternary Research*, **2**, p. 283—302.
- FLINT R. F. (1971) — *Glacial and Quaternary geology*. J. Wiley and Sons.
- FLOHN H. (1969) — Ein geophysikalisches Eiszeit-Modell. *Eiszeitalter u. Gegenwart*, **20**, p. 204—231.
- HAMMEN T., MAARLEVELD G. C., VOGEL J. C., ZAGWIJN W. H. (1967) — Stratigraphy, climatic succession and radiocarbon dating of the last glacial in the Netherlands. *Geol. Mijnb.*, **45**, p. 79.

- HAMMEN T., WIJMSTRA T. A., ZAGWIJN W. H. (1971) — The floral record of the late Cenozoic of Europe. The late Cenozoic glacial ages. Yale Univ. Press, p. 391—424.
- HERRON E. M. (1972) — Sea-floor spreading and the Cenozoic history of the East-Central Pacific. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **87**, p. 1671—1692.
- HOPKINS D. M. (1967) — The Bering Land Bridge. Stanford Univ. Press, p. 495.
- JAHN A. (1969) — Structures périglaciaires dans les loess de la Pologne. *Biul. perygl.*, **20**, p. 81—97.
- KATASONOW E. M. (1969) — Paleogeography of Central Yakutia. Guide to trip round Central Yakutia. Paleogeography and periglacial phenomena. International symposium „Paleogeography and periglacial phenomena of Pleistocene”. P. 18—28. Yakutsk.
- KUKLA G. J. (1972) — Insolation and glacials. *Boreas*, **1**, p. 63—96.
- MEIER M. F. (1965) — Glaciers and climate. The Quaternary of the United States. Princeton University Press.
- MITCHELL J. J. (1965) — Theoretical paleoclimatology. The Quaternary of the United States, p. 881—901.
- PAEPE R., PISSART A. (1969) — Periglacial structures in the Late-Pleistocene stratigraphy of Belgium. *Biul. perygl.*, **20**, p. 321—336.
- PITMAN W. C., III (1972) — Sea-floor spreading in the North Atlantic. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **83**, p. 619—646.
- PITMAN W. C., III, TALWANI M., HEIRTZLER J. R. (1971) — Age of the North Atlantic Ocean from magnetic anomalies. *Earth and Planetary Science Letters*, **11**, p. 195—200.
- ROGNON P., CHARPAL O., BIJN-DUVAL B., GARRIEL O. — Les glaciations „siluriennes” dans l’Ahnet et le Monydir. *Publ. Serv. Géol. Algérie (n-lle série)*. *Bull.*, **38**, p. 53—81.
- SCHWARZBACH M. (1968) — Neuere Eiszeithypothesen. *Eiszeitalter u. Gegenwart*, **19**, p. 250—261.
- SPARKS B. W., WEST R. G. (1972) — The Ice Age in Britain. Methuen and Co Ltd.
- STUIVER M. (1972) — On climatic changes. *Quaternary Research*, **2**, p. 409—411.
- WILKINSON H. R. (1963) — Man and the natural environment. *Depart. of Geogr., Univ of Hull, Occasional Papers in Geography*, no 1, p. 35.
- WILSON A. T. (1964) — Origin of ice ages: an ice shelf theory for Pleistocene glaciation. *Nature*, **201**, p. 147—149.
- WILSON A. T. (1966) — Variation in solar insolation to the south Polar Region as trigger which induces instability in the Antarctic ice sheet. *Nature*, **210**, p. 477—478.
- ZAGWIJN W. H. (1961) — Vegetation, climate and radiocarbon datings in the late Pleistocene of the Netherlands. Part I: Eemian and early Weichselian. *Mededel. Geol. Sticht., n. ser.*, **14**, **15**.
- БАУЛИН В. В. (1958) — К вопросу об истории развития многолетнемерзлых пород на севере Западно-Сибирской низменности. *Вест. Моск. Унив., сер. биол., почв., геол., геогр.*, **13**, No 1, стр. 167—171.
- БАУЛИН В. В. (1962) — Основные этапы истории развития многолетнемерзлых пород на территории Западно-Сибирской низменности. *Труды Инст. Мерзл. АН СССР*, **19**.
- БАУЛИН В. В., БЕЛОПУХОВА Е. Б., ДУБИКОВ Г. И., ШМЕЛЬЕВ Л. М. (1967) — Гео-криологические условия Западно-Сибирской низменности. *Изд. Наука, Москва*.

- ДОСТОВАЛОВ Б. Н., КУДРЯВЦЕВ В. А. (1967) — Общее мерзлотоведение. Изд. Моск. Унив.
- КИРЮШИНА М. Т., ПОЛЬКИН Я. И., СОКОЛОВ С. А., СТРЕЛКОВ С. А. (1961) — Особенности проявления новейшей тектоники в Советской Арктике. Изд. АН Латв. ССР, стр. 157—164. Рига.
- МАРКОВ К. К. (1969) — Новейшие тектонические движения и развитие природы земной поверхности в плейстоцене. Новейшие движения, вулканизм и землетрясения материков и дна океанов. Изд. Наука. Москва.
- МАРКОВ К. К. (1973) — Разрез новейших отложений Мамонтова Гора. Изд. Моск. Унив.
- МАРКОВ К. К., ЛАЗУКОВ Г. И., НИКОЛАЕВ В. А. (1965) — Четвертичный период (Ледниковый период — Антропогенный период), т. 1 — Территория СССР.
- МАРКОВ К. К., ВЕЛИЧКО А. А. (1967) — Четвертичный период (Ледниковый период — Антропогенный период). Материки и океаны, 3.
- МАРКОВ К. К., ВЕЛИЧКО А. А., ЛАЗУКОВ Г. И., НИКОЛАЕВ В. А. (1968) — Плейстоцен. Изд. Высшая Школа. Москва.
- ПОПОВ А. И. (1957) — История вечной мерзлоты в СССР в четвертичный период. Вест. Моск. Унив. сер. биол., поч., геол., геогр., в. 12, No 3, стр. 49—60.
- ПУМИНОВ А. П., ГРАЧЕВ А. Ф. (1969) — Карта новейшей тектоники Арктики и Субарктики. Новейшие движения, вулканизм и землетрясения материков и дна океанов. Изд. Наука. Москва.
- ЧЕРСКИЙ Я. Д. (1882) — К вопросу о следах древних ледников Восточной Сибири (Система Лены, Байкала, Иркута, Кибоя, и Белой). Изв. ВСОРГО. в. 12, стр. 28—62.

Ян ДЫЛИК

ПРИЧИНЫ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ПРОШЛОМ

Резюме

Обзор новейших гипотез доказывает, что не существует одиночных причин климатических изменений, а что они являются следствием целого ряда событий, роль которых возрасла, благодаря положительным и отрицательным обратным связям. Самое большое значение имели, вероятно, вертикальные и горизонтальные движения — горизонтальное перемещение континентов, простираание дна океанов. Весьма вероятные изменения первичной солнечной радиации и циклически изменчивый приток тепла на поверхность Земли были слишком малы, чтобы непосредственно вызвать изменения климата. Они скорее всего являлись силами, высвобождающими земные явления, результаты которых постепенно нарастали в результате действия обратных связей. Все гипотезы остаются под огромным влиянием гляциального комплекса, изучение которого в исследованиях палеогеографии четвертичных отложений довольно запущено. Связь гляциальных явлений с изменчивостью климата является сложной, недостаточно и не непосредственно изученной. Основы для выводов о причинах климатических изменений следует расширить, принимая во внимание перигляциальные явления, а особенно мерзлоту.

Jan DYLIK

CAUSES DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LE PASSÉ GÉOLOGIQUE

Résumé

Les travaux de R. F. Flint (1971), M. Schwarzbach (1968), B. M. Sparks et R. G. West (1972) et les reconstructions nouvelles de H. Flohn (1961) et G. J. Kukla (1972) permettent de présenter une revue des hypothèses plus récentes sur les causes des changements climatiques.

Les mouvements horizontaux de l'écorce terrestre vers les pôles peuvent expliquer les époques froides de la Gondwana et de l'Antarctique. Les mouvements en question sont vérifiés grâce aux recherches paléomagnétiques plus récentes (W. C., III Pitman, M. Talwani, J. R. Heirtzler, 1971; A. Dauvillier, 1972b). Les hypothèses fondées sur des mouvements horizontaux ne permettent pas, cependant, de comprendre les plus courtes oscillations climatiques du Quaternaire.

Les changements périodiques des éléments du mouvement de la Terre sont connus surtout de la théorie de Milankovitch qui a constaté des cycles de précession et des cycles obliques. Cette hypothèse explique des changements de l'intensité de l'insolation sur la surface terrestre mais les rapports entre ces mécanismes et les changements climatiques restent encore obscures.

Les hypothèses de Jordan et Steiner (M. Schwarzbach, 1968) concernent la constante solaire. D'après Jordan l'insolation, diminue en fonction du décroissement de la constante de gravitation qui, à son tour, résulte de l'accroissement du volume de la Terre. Steiner pense que les changements mentionnés ci-dessus sont étroitement liés à la rotation de la galaxie dont le cycle atteint ca 280 millions d'années. C'est la période pareille à celle qui sépare les époques froides éocambrienne, carbono-permienne et quaternaire.

Les hypothèses admettant que les changements de la constante solaire sont provoqués par les phénomènes qui se développent au Soleil et surtout par les taches et les fulgurations. L'indice solaire, ou la relation entre les taches et les fulgurations, exprime la valeur de la constante solaire définie en Langley — $L_y = g \text{ cal cm}^{-2}$.

Les changements de la conduction et de l'absorption de l'atmosphère dépendent de la quantité et de la distribution du CO_2 , O_3 , H_2O et de la poussière, surtout volcanique. L'insolation atteignant la surface terrestre vient sous la forme des ondes courtes qui ne sont absorbées par les composés de l'atmosphère que dans un degré presque négligeable. Au contraire, les rayons réfléchis présentent des ondes longues fortement absorbées par H_2O , CO_2 et d'autres. On y voit que la diminution du contenu des particules composant l'atmosphère peut aboutir au refroidissement de la Terre.

Le concept solaire-topographique (R. F. Flint, 1971) est fondé sur deux faits: l'élévation des continents au-dessus de la limite de neige et les fluctuations de l'insolation. La convergence des processus tectoniques au Miocène et Pliocène avec des glaciations du Cénozoïque tardif est un argument pour ce concept. Les recherches plus récentes sur la néotectonique, accomplies surtout en URSS, apportent des résultats qui renforcent cette hypothèse (K. K. Markov, 1969).

Les hypothèses autocycliques sont nombreuses et fort intéressantes. D'après Tanner (M. Schwarzbach, 1968), les calottes glaciaires européennes et celles de l'Amérique du Nord ont avancé vers les vents apportant la neige. Aux moments

quand les calottes se sont étendues en dehors des conditions favorables, elles ont commencé à fondre. Cet automatisme est encore plus accentué grâce aux mouvements isostatiques dus à la croissance ou à la décroissance des masses glaciaires. Par conséquent il y a eu des fluctuations cycliques pendant tout le Quaternaire.

H. Flohn (1969) dans son modèle géophysique développe l'idée de A. T. Willson (1964, 1966) selon laquelle la calotte glaciaire de l'Antarctique a provoqué des changements climatiques du monde entier dès le Pliocène jusqu'à nos jours. La croissance de l'épaisseur de la calotte transformait le glacier en type „chaud” ce qui lui permettait d'avancer dans toutes les directions. La production rapide de la glace flottante transportée loin vers le nord de l'Atlantique augmentait l'albédo. Par conséquence, il y avait un abaissement de ca 5° de la température globale. La perte des masses a transformé la calotte antarctique qui est devenue „froide” et stagnante. En même temps les courants océaniques et atmosphériques devenaient de plus en plus froids. Les températures des eaux tropicales baissaient de 5—6° C par advection et, par conséquence l'évaporation diminuait. Une phase sèche dominait. Pendant cette phase du climax de l'âge froid, grâce aux actions éoliennes, la surface des glaciers fut recouverte de la poussière de loess ce qui provoquait la fonte de la glace et la disparition des glaciers. Les phases initiales de la formation des glaces flottantes jusqu'à la phase sèche duraient 30 000—50 000 ans. Le développement d'une glaciation se faisait pendant 20 000 ans mais la fonte de glace et la disparition des glaciations s'accomplissait plus rapidement et ne durait que 13 000—15 000 ans.

Théorie d'insolation de G. J. Kukla (1972) affirme que la mécanique céleste présente la seule cause probable de la périodicité des changements climatiques. Le budget thermique de la Terre dépend: de l'intensité de la radiation solaire primitive, des valeurs et de la distribution de l'insolation sur la surface terrestre selon les règles de Milankovitch, de la transparence de radiation et d'absorption de l'atmosphère et de la valeur de l'albédo. Etant donné que les changements du flux de la chaleur résultant du mécanisme de Milankovitch ne sont pas suffisants pour provoquer directement des âges froids ou plus chauds, il faut prendre en considération le complexe des phénomènes météorologiques continentaux et océaniques mutuellement liés (le système à contre-réaction). Les toutes petites différences des valeurs absolues de la radiation atteignant la Terre sont presque négligeables pour les changements climatiques. Au contraire, les gradients thermiques annuels et saisonniers jouent un rôle décisif comme le relais de tous les mécanismes amplifiant l'insolation. On a constaté la direction positive du changement de l'insolation hivernale pendant l'Holocène. Au Würm tardif, cependant, dominait la direction négative des changements de l'insolation hivernale.

Les culminations des conditions climatiques tempérées et froides étaient synchroniques aux plus grands gradients saisonniers: pendant l'optimum holocène et le minimum thermique à l'époque de 17 000 et de 65 000 ans B. P.

Les liaisons entre les changements climatiques et l'insolation se manifestent dans le comportement des couvertures de neige. Les transgressions et les regressions des couvertures de neige donnent la preuve que c'est l'albédo qui présente le facteur variable principal du bilan thermique de la Terre. Il y a deux zones d'équilibre sur notre hémisphère: la zone septentrionale qui peut atteindre des latitudes 50—55°, et méridionale — ca 30° N.

Les changements orbitaux n'influencent le bilan global que par la modulation de l'émission solaire et par la distribution variable de l'insolation en dépendance de la saison et de la situation par rapport à la latitude. Pendant ca 350 000 ans passés on observe les corrélations des tendances positives, correspondant aux intergla-

claires et des tendances négatives, correspondant aux refroidissements du climat. En même temps se vérifient les transitions entre les glaciations et les interglaciaires ou, comme on dit, les terminations.

Tous les auteurs, excepté R. W. Fairbridge (1972), R. F. Flint (1971) et surtout K. K. Markov et A. A. Velitchko (1967), parlent des causes des glaciations bien qu'ils pensent du refroidissement du climat. On pourrait croire que les expansions de grands glaciers continentaux dans des latitudes moyennes ont été les phénomènes les plus typiques et les plus importants des époques froides. Mais il n'y a aucun doute que les glaciations ne sont pas des synonymes des époques ou des âges froids et que l'on ne peut pas les traiter comme les manifestations uniques des refroidissements.

Le témoignage climatique des glaciers est assez vague et il n'est pas toujours suffisamment sûr. Les rapports entre les glaciers et les changements climatiques sont mal connus, complexes et indirectes. Dans l'état contemporain de la science les conclusions sur les changements climatiques, fondées sur le comportement des glaciers ne peuvent être qu'approximatives et hypothétiques (M. F. Meier, 1965).

Ce sont les précipitations de neige qui décident de la glaciation de la partie est des îles de Baffin; la température y joue le rôle secondaire (J. T. Andrews, R. G. Barry, R. S. Bradley et al., 1972). Cette opinion est partagée par K. K. Markov et par d'autres auteurs soviétiques (K. K. Markov, G. I. Lazukov, W. A. Nikolaïev, 1965). Les phases des glaciations locales de la Sibérie NE coïncident avec les réchauffements globaux du climat. On ne doit pas oublier, bien entendu, des conditions thermiques des glaciers et notamment: la température au-dessous de 0° pour les précipitations de neige et des moyennes annuelles négatives pour des aires de formation des glaciers (B. N. Dostovalov, W. A. Kudriavtsev, 1967). C'est aussi la température qui décide de la limite de la neige permanente; les rebords des calottes glaciaires doivent se trouver dans des conditions thermiques assurant l'équilibre du budget des masses de glacier ce qui rend possible la stagnation relative des inlandsis. On aurait tort en concluant qu'en dehors des calottes glaciaires dominaient les températures plus élevées. Au contraire, on a constaté bien des fois que pendant le Quaternaire, en dehors des inlandsis des aires du pergélisol ont occupé de larges surfaces.

Dans toutes les hypothèses présentées ci-dessus on n'a considéré que les régions avoisinantes à l'Atlantique. Il faut rappeler qu'avec la distance de l'Océan Atlantique, aussi bien en Eurasie qu'en Amérique du Nord, les calottes glaciaires pléistocènes devenaient de plus en plus étroites et elles disparaissaient progressivement. En Asie NE elles ne se sont pas développées du tout, même au bord de la mer.

C'était déjà Jan Czernski (1882) qui a formulé l'opinion que le climat rude et sec de la Sibérie de l'Est a freiné la formation des glaciations et qu'il y avait des conditions parfaites pour le développement du pergélisol. Les recherches récentes des savants soviétiques ont affirmé l'opinion de Jan Czernski (K. K. Markov, G. I. Lazukov, W. A. Nikolaïev, 1965). La plus grande concentration au monde de masses continentales existant à l'abri des océans plus chauds et au voisinage de l'Océan Arctique soumis à la congélation, excluait la formation des glaciers.

On souligne toujours la permanence de la glaciation du Groenland et surtout de celle de l'Antarctique. Il y faut ajouter la permanence du pergélisol dans les conditions diamétralement différentes où au lieu des influences océaniques et de l'abondance de précipitations de neige il y a des conditions extrêmement continentales, manifestées par la pauvreté des précipitations. La connaissance de ces faits extrêmes doit faciliter la solution du problème des causes des changements climatiques.

Vers la fin du Néogène l'activité de l'anticyclone croissait ce qui favorisait des inversions de plus en plus fréquentes dans les creux des montagnes, dus aux mouvements tectoniques récents. A ce temps en Asie NE se formait une nouvelle zone géographique nommée par Turaninow en 1938 l'éoarctique (Markov et al. 1965). C'est une formation relativement nouvelle, se caractérisant par le développement des genres mais pas encore des familles endémiques. L'éoarctique a surgi grâce aux changements climatiques; elle prouve d'une façon indirecte l'existence du pergélisol. Les reliques organiques, surtout celles du Mont de Mamouth sur l'Aldan, témoignent en faveur de cette opinion (K. K. Markov, 1973).

Parallèlement à la disparition des calottes glaciaires vers l'est de l'Eurasie où les glaciers ont cédé au pergélisol, la vivacité des réactions causées par les changements climatiques diminue. La stabilité plus grande que celle de l'inlandsis de l'Antarctique et du Groenland, atteint le maximum en Sibérie NE. On ne doit pas, cependant admettre que ce sont uniquement les glaciations qui ont été sensibles aux changements climatiques. La sensibilité et le dynamisme plus forts des phénomènes provoqués par les changements climatiques et liés aussi bien aux calottes glaciaires qu'au pergélisol présentaient le trait général de la partie ouest de l'Eurasie. Il faut y ajouter que les calottes glaciaires étaient sensibles aux réchauffements, tandis que le pergélisol aux refroidissements.

Le pergélisol existait en Europe avant l'extension maximale de l'inlandsis scandinave. Ce n'est pas par hasard que les courbes des paléotempératures (W. Dansgaard et al., 1969; G. J. Kukla, 1962) montrent des changements thermiques qui ne coïncident pas avec l'extension maximale de la dernière glaciation. Elles convergent, cependant, avec les périodes précédant cette extension ou la suivant, quand le pergélisol succédait au glacier et se répandait vers le nord.

Il n'y a aucun doute que la réaction des phénomènes périglaciaires aux changements climatiques a été plus rapide et plus directe que celle des phénomènes glaciaires. Il est donc évident que dans les études des causes des changements climatiques il faut prendre en considération les traces des anciens phénomènes périglaciaires et surtout ceux qui sont liés au pergélisol.