

KLIMAT ZIEMI
PRZESZŁOŚĆ, TERAŹNIEJSZOŚĆ, PRZYSZŁOŚĆ

Jerzy Boryczka
Uniwersytet Warszawski
Zakład Klimatologii WGSR

Metody badań zmian klimatu

Historię klimatu Ziemi można podzielić na cztery części, wynikające ze skali czasu i stosowanych metod badań. Są to przedziały czasu: 1. od 3,5 miliarda lat, 2. od 2 milionów lat (czwartorzęd), 3. od 10 000 lat (Holocen), 4. od kilkuset lat (dane historyczne, dendrometryczne i instrumentalne)

O najstarszej historii Ziemi informują formy rzeźby powierzchni polodowcowych, dawne linie brzegowe mórz i oceanów, jezior, rafy koralowe i znalezione relikty pierwszych form życia na Ziemi.

„Księgami”, w których zapisana jest historia klimatu Ziemi, są: osady głębokomorskie, osady jeziorne, a przede wszystkim lody Antarktydy, Arktyki i lodowce wysokogórskie.

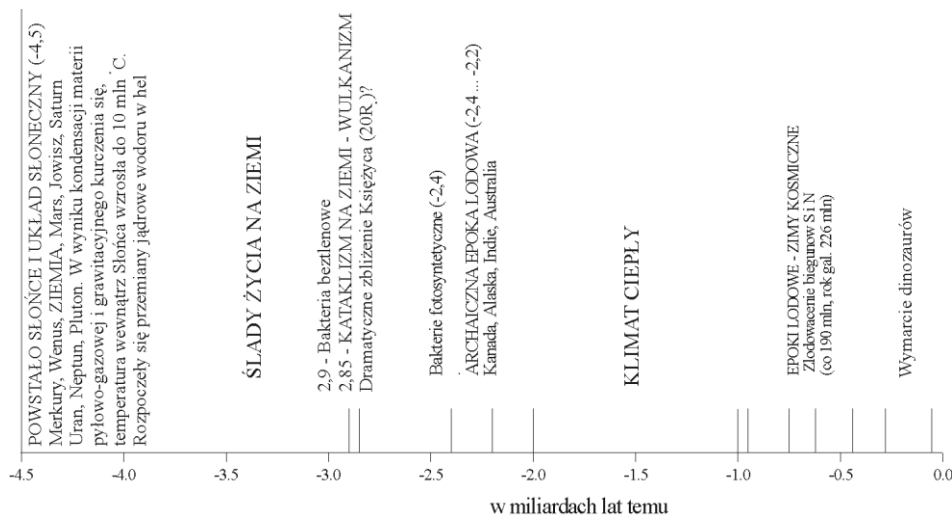
Ochłodzenia i ocieplenia klimatu określane są na podstawie paleotemperatury, tj. zawartości izotopów tlenu ^{18}O lub wodoru ^2H (deuteru) w substancjach organicznych, zdeponowanych w osadach i rdzeniach lodowych.

Po prostu parowanie „ciężkiej wody” H_2O (^2H , ^{18}O) w oceanach w określonej temperaturze jest mniejsze niż zwykłej wody H_2O (^1H , ^{16}O). Duża zawartość izotopów tlenu ^{18}O i wodoru ^2H w szkieletach dawno żyjących w oceanach organizmów świadczy o chłodnym klimacie (o chłodnej wodzie oceanu), a mała – o ciepłym (cieplej wodzie). Natomiast w rdzeniach lodu, powstałego z kondensacji pary wodnej pochodzącej z oceanów, jest przeciwnie. Duża zawartość tych izotopów w lodzie wskazuje na klimat ciepły, a mała – na klimat chłodny.

W rekonstrukcji dawnego klimatu fundamentalne znaczenie ma ustalenie wieku skał, osadów i rdzeni lodowych. W tzw. datowaniach wykorzystuje się czas połowicznego rozpadu pierwiastków promieniotwórczych; są to izotop węgla ^{14}C (5730 lat) i izotopy pochodzące z rozpadu uranu: protaktyn ^{231}Pa , tor ^{230}Th , izotop uranu ^{234}U i inne – o okresie połowicznego rozpadu kilkaset tysięcy lat.

Ważniejsze zdarzenia na Ziemi – sprzed 3 miliardów lat

Do najważniejszych zdarzeń w historii Ziemi (rys.1) od 3,5 miliarda lat można zaliczyć ślady życia: 2,9 miliarda lat temu – bakterie beztlenowe, 2,4 – bakterie fotosyntetyczne.



Rys.1. Ważniejsze wydarzenia na Ziemi sprzed 3 miliardów lat temu

Fig. 1. The more important events on the Earth from three billion years ago

Prawdopodobnie 2,9 miliarda lat temu wydarzył się na Ziemi kataklizm. Nie można wykluczyć dramatycznego zbliżenia Księżyca do Ziemi na odległość wynoszącą 1/3 dzisiejszej. Interesujące są wyniki badań skamielin koralowców archaicznych organizmów *stromatolites* (Panel i Mohr 1970, w: Czapiewska, Bielicki 1982). Zliczono przyrostyienne ich tkanki kostnej między kolejnymi maksimami, zależnymi od księżycowych pływów mórz. Okazało się, że 2,8 miliarda lat temu liczba dni słonecznych w miesiącu księżycowym zmniejszyła się do 18. (obecnie 29,5). Wtedy (2,9 miliarda lat temu) Księżyc osiągnął najmniejszą odległość od Ziemi – 20 promieni ziemskich (obecnie 60). Ciepło powstałe przy silnym tarcu pływowym Księżyca (27 razy większym) spowodowało archaiczny wulkanizm na Ziemi, a na Księżycu wypełnienie basenów magmą. Jeżeli istniało już na Ziemi życie, to wtedy mogło ono zostać zniszczone. Z badań biologicznych wynika, że pierwsze ślady życia pochodzą sprzed 3,3-3,0 miliardów lat. Istnieje zbieżność dat, np. zaniku plutonu w skorupie ziemskiej 2,9-2,4 miliarda lat temu i archaicznego wulkanizmu – wysokiej temperatury (określonej przez geologów).

Około 2,3 miliarda lat temu aktywność wulkaniczna zmalała, a temperatura Ziemi znacznie się obniżyła. Nastąpiła pierwsza (archaiczna) epoka lodowa na Ziemi. Świadczą o tym charakterystyczne osady. Ich wiek określa się na 2,2-2,4 miliarda lat temu.

Ślady tego archaicznego zlodowacenia istnieją w Kanadzie, na Alasce, w Indiach i Australii. Zlodowacenie archaiczne doprowadziło do powstania pokryw lodowych w obszarach podbiegunowych obu półkul.

W ciągu ostatniego miliarda lat wystąpiło 6 wielkich epok lodowych: 950, 750, 620, 440, 280, 3-2 milionów lat (zlodowacenie czwartorzędowe) – średnio co 190 milionów lat. Są to tzw. „zimy kosmiczne”, których przyczyną może być obieg Układu Słonecznego dookoła środka naszej galaktyki (Drogi Mlecznej). Rok galaktyczny jest równy około 226 milionów lat.

Nagle ocieplenie i zlodowacenie Ziemi sprzed 55 milionów lat temu prawdopodobnie spowodowały wymarcie dinozaurów.

Zlodowacenia Ziemi w ciągu ostatniego miliona lat a zmiany orbity Ziemi, prognozy na najbliższe 100 tysięcy lat

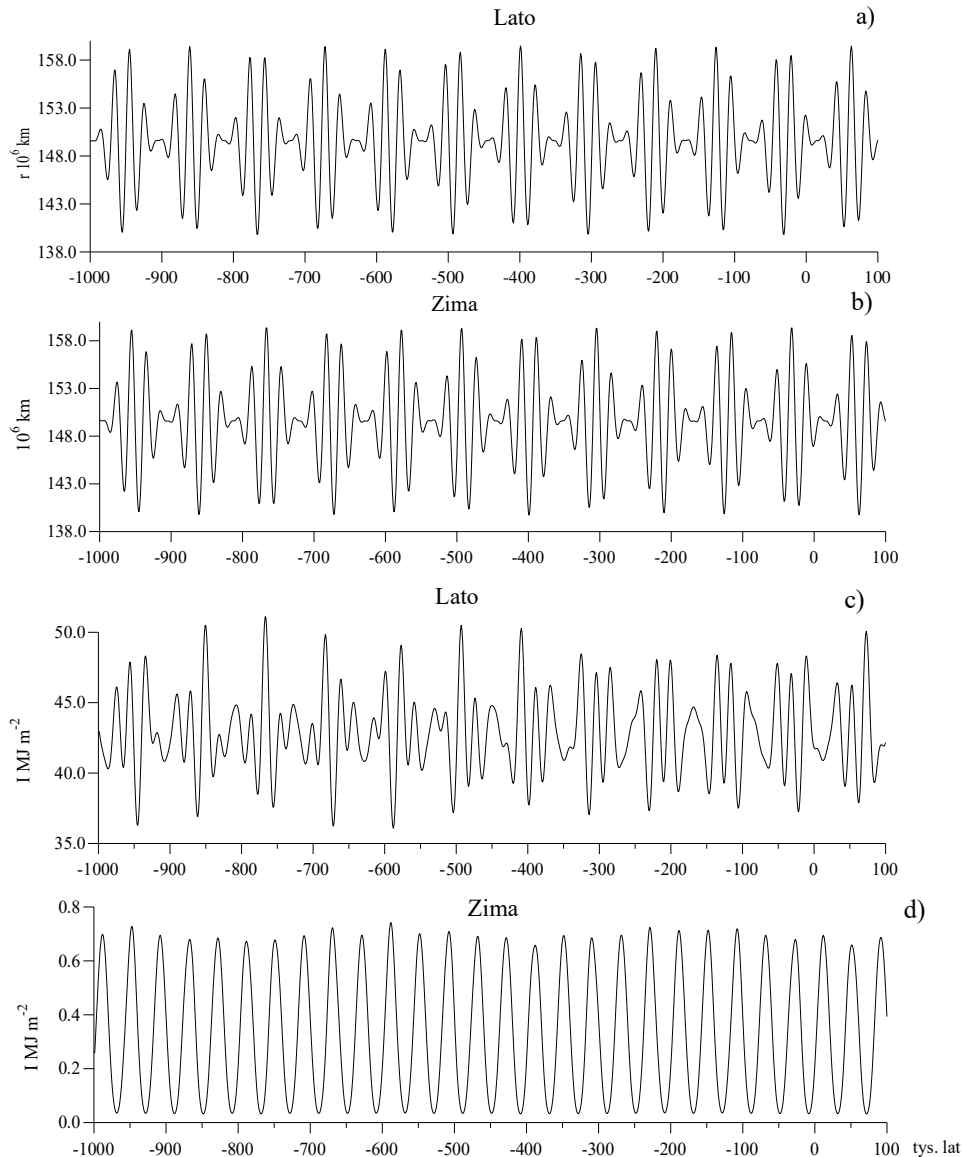
Obecnie żyjemy w epoce lodowej (czwartorzędu), która rozpoczęła się 2 miliony lat temu i trwa nadal, z pokrywą lodową znajdującą się na obu biegunach (na Antarktydzie i w Arktyce)

Zlodowacenia Ziemi, które wystąpiły na półkuli północnej w ciągu ostatniego miliona lat, dobrze wyjaśnia teoria M. Milankovicia (1938). Wykazał on, że zmiany okresowe parametrów eliptycznej orbity Ziemi spowodowały znaczące spadki promieniowania słonecznego w dużych szerokościach geograficznych, zwłaszcza w obszarach okołobiegunowych. Ostatnie 4 zlodowacenia Ziemi (określone przez geologów) wystąpiły podczas głównych minimów promieniowania słonecznego

Cztery ostatnie zlodowacenia Ziemi (obejmujące obszar Polski) były efektem nakładania się trzech długich cykli: 92 000 lat – mimośrod e (ekscentryczności) orbity, 40 000 lat – nachylenia płaszczyzny ekliptyki do równika ϵ , 21 000 lat – położenia perihelium względem punktu równonocy wiosennej.

Hipotezę M. Milankovicia wielokrotnie sprawdzano. Potwierdziły ją również wyniki badań osadów głębokomorskich (Hays i in. 1976). Okazało się, że izotop tlenu ^{18}O zawarty w węglanach wapnia cechuje się zbliżoną okresowością: 100 000 lat, 42 000 lat, 23 000 lat

Odległości Ziemi od Słońca (r) i dobowej sumy promieniowania słonecznego I_0 padającego na powierzchnię poziomą (horyzontalną) poza atmosferą (w szerokości geograficznej $\varphi = 65^\circ\text{N}$) podczas przesilen letniego ($\delta = \epsilon$) i zimowego ($\delta = -\epsilon$) w ciągu ostatniego 1 miliona lat, z prognozą na najbliższe 100 tysięcy lat, przedstawiają wykresy (rys. 2).

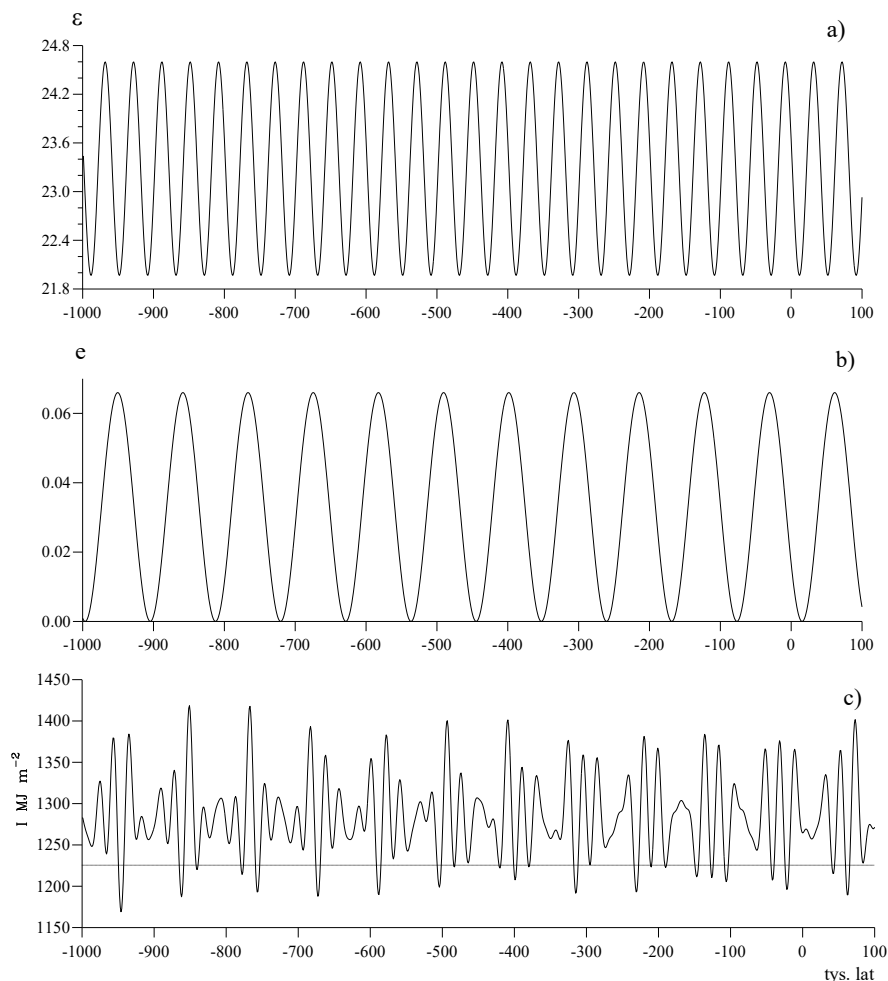


Rys. 2. Zmiany odległości Ziemi od Słońca w ciągu ostatniego 1 miliona lat a) lato, b) zima
Zmiany dobowej sumy promieniowania słonecznego (padającego na powierzchnię poziomą poza atmosferą)
na równoleżniku $\varphi = 65^\circ\text{N}$ podczas przesileni c) letniego ($\delta = \varepsilon$), d) zimowego ($\delta = -\varepsilon$)

Fig. 2. Changes of the distance between the Earth and the Sun during the last one million years: a) Summer;
b) Winter. Changes of the daily sum of solar radiation (with respect to the horizontal surface outside of the
atmosphere) at the parallel of $\varphi = 65^\circ$ during c) the summer solstice ($\delta = \varepsilon$), and d) the winter solstice ($\delta = -\varepsilon$)

Letnie sumy dobowe promieniowania słonecznego w dużych szerokościach geograficznych ($\varphi = 65^\circ\text{N}$) są kształtowane zarówno zmianami nachylenia płaszczyzny ekliptyki

do równika ε , jak też ekscentryczności orbity e (odległości od Słońca). Natomiast zimowe sumy promieniowania zależą w zasadzie tylko od nachylenia ekliptyki ε . Zmiany kąta nachylenia płaszczyzny ekliptyki ε , mimośrod e i rocznych sum promieniowania słonecznego I w ciągu ostatniego miliona lat (i prognozy do 100 tysięcy lat) są pokazane na rys. 3. Zlodowacenia Ziemi przypadają na minima główne zmian rocznych sum promieniowania słonecznego I_{\min} . Gdy sumy roczne promieniowania słonecznego spadły poniżej wartości krytycznej I_k , wtedy rozpoczął się powolny proces zlodowacenia Ziemi.



Rys. 3. Zmiany parametrów orbity Ziemi w ciągu ostatniego 1 miliona lat (z prognozą do 100 tysięcy lat): a) nachylenia płaszczyzny ekliptyki do równika ε , b) mimośrodu orbity Ziemi e , c) Zmiany sum rocznych promieniowania słonecznego I na równoleżniku $\varphi = 65^\circ\text{N}$

Fig. 3. Changes in the parameters of the Earth's orbit during the last one million years (including the forecast for the next 100,000 years), i.e. of: a) inclination of the ecliptic plane with respect to the equator, ε ; b) eccentricity of the Earth's orbit, e ; c) changes of the annual sums of solar radiation I at the parallel of 65°

W ciągu ostatniego miliona lat wystąpiło 11 głównych ochłodzeń i 11 ociepleń klimatu. Średni odstęp między ochłodzeniami (zlodowaceniami Ziemi) wynosi około 90 000 lat. Jedno z ostatnich minimów lokalnych sum rocznych promieniowania słonecznego ($1196 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) wystąpiło około 22 000 lat temu przy nachyleniu ekliptyki $\varepsilon = 22^\circ,56$ i mimośrodku $e = 0,061$ (ostatnia faza zlodowacenia Würm).

Zlodowacenia Ziemi występowały przy największym spłaszczeniu orbity Ziemi ($e = 0,066$), gdy w lecie na półkuli północnej odległość Ziemi od Słońca była największa, a nachylenie ekliptyki małe. Odległość Ziemi od Słońca będzie najmniejsza w lecie za 11 500 lat. Po upływie około 16 tysięcy lat Ziemia będzie obiegać Słońce po orbicie kołowej ($e = 0$, odległość Ziemi od Słońca $r = a = 149,598$ milionów km). Nachylenie ekliptyki osiągnie najmniejszą wartość $\varepsilon = 21^\circ58'$ za 12 tysięcy lat.

Prawdopodobnie kolejne zlodowacenie Ziemi nastąpi za około 62 000 lat ($I_{\min}=1189 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) przy ekscentryczności orbity Ziemi $e = 0,066$.

W obliczeniach dobowych i rocznych sum promieniowania słonecznego (na równoleżniku $\varphi=65^\circ\text{N}$) przyjęto zakres wahań parametrów orbity Ziemi: nachylenia ekliptyki do równika $\varepsilon - 21^\circ58' - 24^\circ36'$, mimośrodu $\varepsilon - 0 - 0,066$. Fazy wyznaczono na podstawie wielomianów określających zależność ε i e od czasu t wyrażonego w setkach lat (*Astronomičeskij Eżegodnik ... 1959, Reznikov 1982*).

Zmiany wiekowe parametrów orbity Ziemi opisano równaniami sinusoid:

$$\varepsilon = 23^\circ,28335 + 1,31665\sin(2\pi t/40 + 3,022667)$$

$$e = 0,033 + 0,033\sin(2\pi t/92 + 3,65646)$$

Odległość Ziemi od Słońca i dobową sumę promieniowania słonecznego I_0 (na powierzchni poziomej poza atmosferą, $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) określają znane wzory

$$r = a (1 - e^2) (1 + e \cos v)^{-1}$$

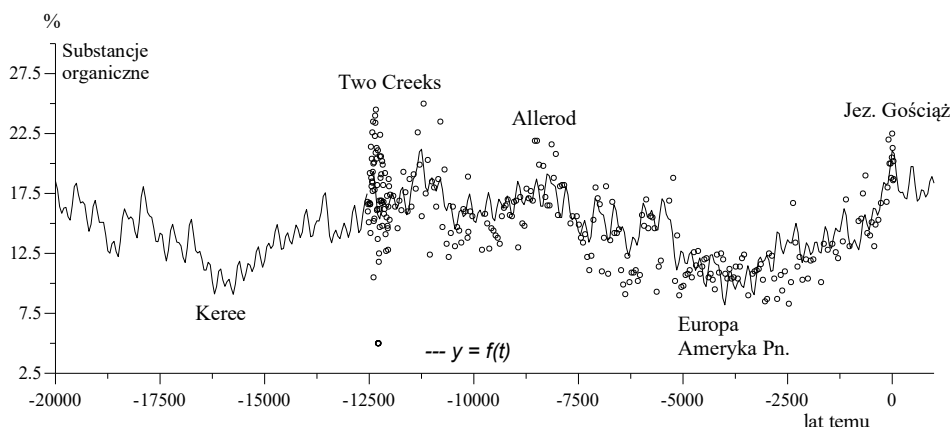
$$I_0 = 86400 s \pi^{-1} (D \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin D)$$

gdzie: $\cos D = -\text{tg} \varphi \text{tg} \delta$, D – połowa długości dnia w radianach, δ – deklinacja słońca, $s = 1370 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ – stała słoneczna. Sumy roczne promieniowania słonecznego I obliczono z odstępem czasu $\Delta t = 0,0833$ roku.

Ochłodzenia i ocieplenia klimatu w holocenie (10 tys. lat temu)

Holocenijskie ochłodzenia i ocieplenia klimatu są znane na podstawie badań substancji organicznych (i zawartości izotopu tlenu ^{18}O) zdeponowanych w jeziorze Wisconsin (Ameryka Północna) oraz w polskim jeziorze Gościąg (Boryczka, Wicik 1994).

Daty ochłodzeń i ociepleń klimatu Polski wskazują minima i maksima lokalne wykresów $y = f(t)$ koncentracji substancji organicznych (w %) w osadach jeziora Gościąg (rys. 4). W przedziale czasu od -20 000 do -12 540 lat temu rekonstruowano zawartość substancji organicznych w osadach na podstawie interferencji obecnych w widmie cykli: 50, 230, 360, 390, 540, 590, 1120, 1380, 1770, 2970, 6080, 12380 lat.



Rys. 4. Ochłodzenia i ocieplenia klimatu Polski w ciągu ostatnich 20 tysięcy lat na podstawie substancji organicznych zdeponowanych w osadach jeziora Gościąż (linia $y = f(t)$ wypadkowa interferencji cykli)

Fig. 4. The coolings and warmings of the climate of Poland during the last 20,000 years on the basis of the organic substances deposited in the sediments of the Gościąż lake (line $y = f(t)$ being the resultant of the interference of cycles)

W laminowanych osadach jeziora Gościąż można było określić czas kalendarzowy (zliczając roczne przyrosty rdzenia osadów).

Główne ochłodzenia i ocieplenia klimatu w ciągu ostatnich 20 000 lat w Polsce i Ameryce Północnej (Kerec, Two Creeks) są synchroniczne.

Rekonstrukcja klimatu na podstawie badań dawnego jeziora Czad (w strefie Sahelu) wykazuje trzy wysokie poziomy wody: 8500, 6000, i 5000 lat temu (Schonwiese, 1997). Od 9000 do 5000 lat wstecz jezioro to miało 10 razy większą powierzchnię od dzisiejszej. Obfite opady deszczu około 5000 lat temu mogły spowodować także katastrofalne skutki. Temu ostatniemu wysokiemu poziomowi jeziora Czad – sprzed 5 tysięcy lat przypisuje się biblijny przekaz o potopie.

Ochłodzenia i ocieplenia klimatu Ziemi w ostatnim 1000-leciu

Rekonstrukcje temperatury powietrza w warstwie przyziemnej w różnych miejscach Ziemi w ostatnim tysiącleciu (według redukcji lodowców, szerokości pierścieni drzew i pomiarów bezpośrednich) wskazuje 3 zasadnicze przedziały czasu: „optimum średniowieczne” – 800-1200, „mała epoka lodowa” – 1400-1900 i współczesne ocieplenie – od 1900 roku. Należy zauważyć, że na podstawie serii dendrometrycznej (grubości słoń drzew) można określić tylko temperaturę i opady okresu wegetacyjnego (bez zim).

W ostatnich 400 latach wystąpiły 3 główne ochłodzenia klimatu Ziemi, o najmniejszej średniej globalnej temperaturze powietrza na półkuli północnej w pobliżu roku 1600, 1700 i 1830. Najbardziej poznane (na podstawie danych instrumentalnych) jest to ostatnie, największe ochłodzenie w Europie i Polsce (według serii warszawskiej i krakowskiej). Trzeba zauważyć, że wystąpiło ono podczas trzech najsłabszych, wydłużonych (12-13-

letnich) cykli aktywności Słońca (1798-1833). Ochłodzenie to pojawiło się w czasie najślabszego 13-letniego cyklu plam słonecznych (1811-1823, podczas absolutnego minimum wiekowego (od 1700 r.).

Rok 1811 był szczególnie pod względem stanu Układu Słonecznego, kiedy to odległość Słońca od środka masy Układu była najmniejsza (0,14 część promienia Słońca), a przyspieszenie Słońca – największe. To ostatnie globalne ochłodzenie klimatu (także w Polsce) wystąpiło podczas wzmożonej aktywności wulkanicznej, po największych eksplozywnych erupcjach wulkanów: 1803 – Cotopaxi (DVI=1100), 1815 – Tambora (DVI= 3000), 1835 – Cosiguina (DVI=4000, maksimum absolutne).

Ochłodzenia i ocieplenia klimatu są kształtowane wahaniem dopływu energii słonecznej do powierzchni Ziemi, zależnej od samej stałej słonecznej i zawartości pyłów wulkanicznych w atmosferze – pochłaniających i rozpraszających promieniowanie słoneczne.

Wpływ aktywności Słońca na klimat Ziemi

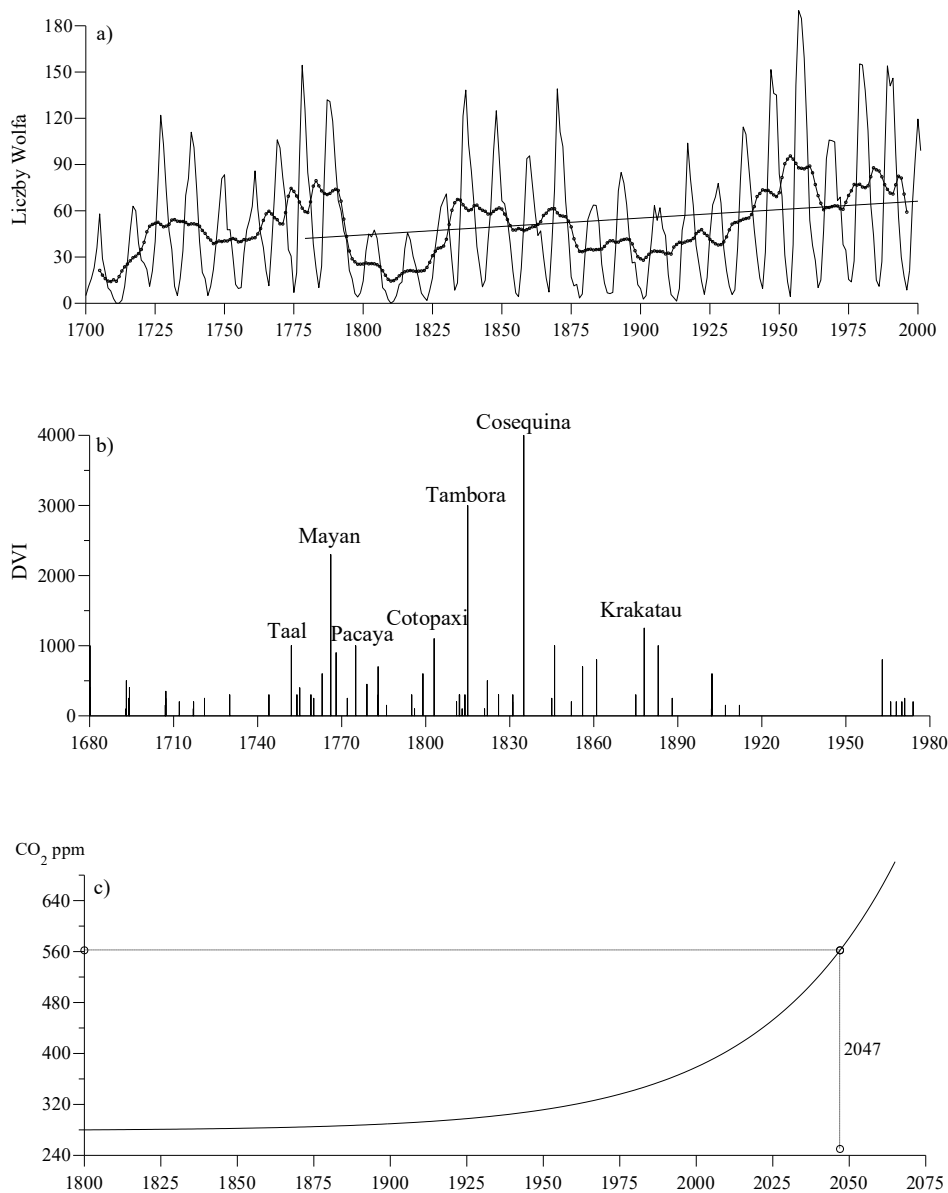
Na Słońcu obserwuje się wiele zjawisk o natężeniu okresowym. Są to: plamy słoneczne i pochodnie – w fotosferze oraz rozbłyski i protuberancje – w atmosferze, a także zmienność kształtu korony słonecznej. Zmiany zachodzące na Słońcu warunkują stałą słoneczną. Są one przenoszone na Ziemię poprzez ogólną cyrkulację atmosferyczną.

Ciągi chronologiczne liczb Wolfa (liczb plam słonecznych) i temperatury powietrza wskazują, że podczas maksimumów aktywności Słońca w cyklu 11-letnim jest cieplej niż w czasie minimumów (większe są również przyrosty drewna – grubsze słoje drzew). Jest to wynikiem zależności dystrybucji ciepła na powierzchni Ziemi od aktywności Słońca.

Cyrkulacja atmosferyczna warunkuje transport energii słonecznej, magazynowanej głównie w strefie międzyzwrotnikowej, w stronę biegunów.

Stała słoneczna zależy od aktywności Słońca. Jej maksymalna wartość przypada na przedział liczb Wolfa 80-100. Krótkookresowe zmiany stałej słonecznej nie odgrywają istotnej roli w kształtowaniu klimatu Ziemi, ze względu na bardzo powolne przenikanie ciepła do głębszych warstw Ziemi. Większą rolę odgrywają długie cykle: 102-letni i 187-letni stałej słonecznej. W otoczeniu maksimumów stałej słonecznej w tych cyklach kumulowane są duże ilości energii w głębszych warstwach lądów i oceanów. Energia magazynowana w oceanach wywiera wpływ na cyrkulację atmosferyczną.

Tendencja rosnąca aktywności Słońca (i stałej słonecznej) w ostatnich dwóch stuleciach może powodować znaczącą część postępującego ocieplenia klimatu Ziemi – poprzez zmiany ogólnej cyrkulacji atmosferycznej. To ocieplenie może być wywołane wzrostem aktywności Słońca – liczb Wolfa o 15,7 W/100 lat (rys.5a).



Rys. 5. Zmiany aktywności Słońca (liczb Wolfa) w latach 1700-2000 (a), eksplozywne erupcje wulkaniczne i wartości wskaźnika DVI (dust veil index) w latach 1680-1980 (b), prognoza podwojenia koncentracji CO₂ w atmosferze (c)

Fig. 5. Changes of the solar activity (Wolf numbers) in the years 1700-2000 (a); Explosive volcanic eruptions and the values of the DVI (dust veil index) indicator in the years 1680-1980 (b); Forecast of the doubling of the CO₂ concentration in the atmosphere (c)

Wpływ pyłów wulkanicznych na klimat Ziemi, katastroficzne prognozy zlodowacenia Ziemi

Promieniowanie słoneczne bezpośrednie po wybuchu wulkanu może zmniejszyć się przez kilka miesięcy o 10-20% (Katmai na Alasce w 1912 r.). Spadek promieniowania bezpośredniego po wybuchach wulkanów: Krakatau (Indonezja 1883), Hekla (Islandia 1970) miał charakter zmian planetarnych (globalnych). Po wybuchu wulkanu Tambora (Indonezja 1815) pył osiągnął wysokość 60-70 km.

Wulkany typu eksplozywnego wyrzucają do atmosfery duże ilości pyłów i gazów (HCL, SO₂, CO₂, H₂, S i inne). Drobną pył wyrzucany do stratosfery może pozostawać w niej nawet przez kilkanaście lat.

Szczególne znaczenie w badaniach zmian klimatu mają gazy wulkaniczne wyrzucające do stratosfery, które w ciągu kilku miesięcy ulegają przemianom chemicznym i są rozprzestrzeniane wokół całej Ziemi. Największy wpływ na rozproszenie krótkofalowego promieniowania słonecznego mają cząsteczki siarczanów (aerozole siarczanowe), które powstają z gazów zawierających siarkę (np. SO₂). Cząstki siarczanów absorbują i rozpraszają promieniowanie słoneczne. Powodują one ogrzanie się stratosfery, gdy w dolnych warstwach troposfery występuje ochłodzenie, wywołane spadkiem promieniowania dochodzącego do powierzchni Ziemi.

Pył wulkaniczny powoduje znaczny spadek promieniowania bezpośredniego i zwiększa promieniowanie rozproszone dochodzące do Ziemi. Zależność spadku promieniowania całkowitego $\frac{\Delta I_c}{\Delta I}$ (w stosunku do spadku promieniowania bezpośredniego ΔI) od szerokości geograficznej według M. I. Budyki (1975) przedstawiono niżej:

φ	90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°	0°
$\frac{\Delta I_c}{\Delta I}$	0,24	0,23	0,22	0,21	0,19	0,18	0,16	0,14	0,13	0,13

Gdy w atmosferze znajduje się warstwa pyłów wulkanicznych, to spadek promieniowania bezpośredniego ΔI jest większy przy większej masie optycznej atmosfery, tzn. przy mniejszych wysokościach Słońca (w wyższych szerokościach geograficznych). Ten spadek jest jeszcze większy w przypadku promieniowania całkowitego ΔI_c . Maleje ono bardziej ze wzrostem szerokości geograficznej niż promieniowanie bezpośrednie; stosunek $\frac{\Delta I_c}{\Delta I}$ osiąga wartość 24% na biegunie ($\varphi = 90^\circ$); $\Delta I_c = 0,24 \Delta I$.

Po eksplozywnych erupcjach wulkanów spadek całkowitego promieniowania słonecznego w strefie okołorównikowej stanowi około 10% spadku promieniowania bezpośredniego.

Z bilansu energii cieplnej wynika, że nawet niewielkie zmiany promieniowania całkowitego o 1% przy stałym albedo powoduje spadek średniej temperatury przy powierzchni

Ziemi o 1,2-1,5°C. Spadek promieniowania całkowitego o 1,5-1,6% może doprowadzić do całkowitego zlodowacenia Ziemi – od biegunów do równika.

Główne ochłodzenie klimatu na początku XIX wieku przypadło na minimum aktywności Słońca – najslabszy cykl 13-letni (1811-1823) i na maksimum aktywności wulkanicznej. Na początku XIX wieku wystąpiły wybuchy wulkanów o największym wskaźniku zapylenia atmosfery DVI (dust veil index): Tambora (1815) i Cosiguina (1835).

Coraz cieplejsze zimy w Europie w XIX-XX wieku, intensyfikacja Oscylacji Północnego Atlantyku (NAO)

Niepokojące jest systematyczne ocieplenie się klimatu Ziemi w XIX-XX wieku. Średnia globalna temperatura powietrza w latach 1890-1985 wzrosła od 0,2°C w strefie okołorównikowej do 5°C w strefie polarnej podczas zim. Wzrost średniej globalnej temperatury, obliczonej na podstawie pomiarów temperatury powietrza i powierzchni mórz, w latach 1861-1991 wynosi średnio 0,5°C.

Tendencje temperatury powietrza w Europie, określone równaniami prostych regresji $T=a_0+at$ są na ogół rosnące ($a>0$):

Miejscowość	Zima	Lato	Rok
Warszawa (1779-1998)	1,12	0,06	0,54
Kraków (1826-1997)	1,48	0,23	0,82
Praga (1771-1980)	0,25	-0,25	0,00
Genewa (1768-1980)	0,50	-0,20	0,10

W Europie (i Polsce) przede wszystkim zimy są coraz cieplejsze. Na przykład, w Warszawie zimy są coraz cieplejsze – o 1°C/100 lat, a lata tylko o 0,06°C/100 lat. Średnia roczna temperatura powietrza w Warszawie wzrasta o 0,5°C/100 lat (według serii poprawionej przez H. Lorenc, *Atlas 2000*, t. XIV).

Nie wiadomo, jaka część postępującego ocieplenia klimatu jest efektem oddziaływania czynników naturalnych, a jaka – czynników antropogenicznych.

Ocieplenie klimatu w XIX-XX wieku może być wywołane wzrostem aktywności Słońca i spadkiem zawartości pyłów wulkanicznych w atmosferze (rys. 5b). Erupcje wulkaniczne od roku 1680 występowały coraz rzadziej (odstęp czasu między kolejnymi wybuchami wzrasta).

Termiczne oddziaływanie wód Oceanu Atlantyckiego (ocieplające zimą a ochładzające latem) na klimat Europy Zachodniej i Środkowej jest uwarunkowane południkowym gradientem ciśnienia atmosferycznego $\left(-\frac{\partial p}{\partial \varphi}\right)$ – cyrkulacją strefową.

Intensywność strefowego (równoleżnikowego) ruchu mas powietrza znad Oceanu Atlantyckiego nad Europę (i Polskę) w latach 1825-1997 określa wskaźnik NAO (North

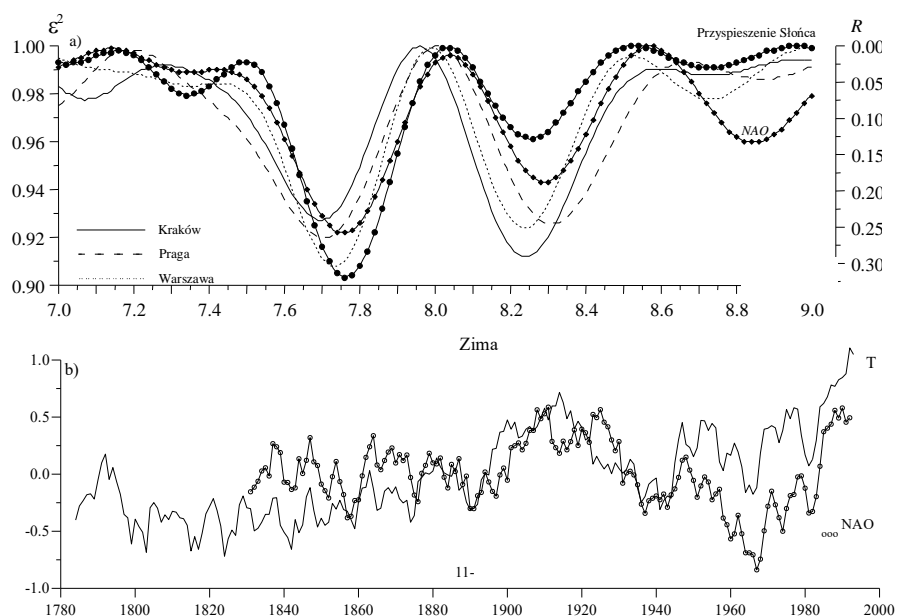
Atlantic Oscillation index), zdefiniowany przez P. D. Jonesa i innych (1997). Jest nim różnica ciśnienia na poziomie morza między Gibraltarem i południowo-zachodnią Islandią.

Zależność pola temperatury powietrza w północno-zachodniej Polsce (i całej Polsce) od wskaźników NAO, zdefiniowanych przez J.C. Rogersa (1984) i J. Hurrella (1995), badano już wcześniej (Marsz 1999, 2001; Marsz, Styszyńska 2001).

Widma temperatury powietrza w Europie i wskaźnika NAO w zimie cechuje analogiczna okresowość z dominującym okresem około 7,8-letnim. Podobieństwo tych widm świadczy, iż zimy w Warszawie są kształtowane przez okresowe wahania wskaźnika NAO (cyrkulacji strefowej).

Interesujące jest podobieństwo między widmami: temperatury powietrza (w Warszawie, Krakowie, Pradze), wskaźnika NAO i przyspieszenia Słońca względem środka masy Układu Słonecznego w paśmie 7-9 lat (rys. 6a).

Tendencja wskaźnika NAO w zimie jest rosnąca (rys. 6b). Świadczy to, że w zimie coraz większy jest równoleżnikowy „transfer” ciepła znad Oceanu Atlantyckiego w kierunku wschodnim. Postępujące ocieplenie, zwłaszcza w zimie, jest wywołane nasileniem ocieplającego oddziaływania Oceanu Atlantyckiego.



Rys. 6. a) Widma temperatury powietrza (Warszawa, Kraków, Praga), wskaźnika NAO, przyspieszenia Słońca w paśmie 7,0-9,0 lat (z odstępem okresu $\Delta\Theta = 0,01$ roku), b) Zmiany temperatury powietrza w Warszawie i wskaźnika NAO w zimie w latach 1826-1997 (standaryzowane)

Fig. 6. (a) The spectra of the air temperature (Warsaw, Cracow, Prague), the NAO indicator, the acceleration of the Sun in the band of 7.0-9.0 years (with the step of $\Delta\Theta=0.01$ of a year); (b) The changes of air temperature in Warsaw and of the NAO indicator in winter in the period 1826-1997 (standardised)

Nie wiadomo jednak, jaki w tym jest udział zmian aktywności Słońca (stałej słonecznej), pyłów wulkanicznych ograniczających dopływ energii słonecznej do powierzchni Ziemi i antropogenicznego efektu cieplarnianego atmosfery.

To ocieplenie klimatu Europy (i Polski) może być efektem interferencji naturalnych cykli temperatury. W serii pomiarowej temperatury powietrza (T) można wyodrębnić dwa składniki: T' naturalny $T = f(t)$, będący wypadkową nakładania się cykli, i liniowy $\Delta T = at$ – antropogeniczny. Interferencja cykli obecnych w „zimowym” widmie temperatury powietrza w Warszawie wyjaśnia dużą część $0,9^\circ\text{C}/100$ lat tendencji rosnącej ($1^\circ\text{C}/100$ lat).

Wypadkowa y_1, \dots, y_n kilku nakładających się cykli o niewspółmiernych okresach Θ jest funkcją nieokresową. Tylko taką funkcję nieokresową można rozłożyć na składowe o okresie Θ (także na składowe harmoniczne $n, n/2, n/3, \dots$ – rozwinąć w szereg Fouriera według najmniejszych kwadratów):

$$y = a + \sum b \sin(2\pi t\Theta^{-1} + c)$$

Wraz ze wzrostem średniej globalnej temperatury powietrza obserwuje się podnoszenie się poziomu oceanów – średnio o 10-25 cm w ostatnim stuleciu.

Poziom Morza Bałtyckiego, według stanów wody w Świnoujściu, w latach 1811-1990 podnosi się średnio o 4,5 cm/100 lat (Kozuchowski, Boryczka 1997):

Wiosna	Lato	Jesień	Zima	Rok
1,4	3,9	6,8	5,8	4,5

Rekonstrukcje dawnych linii brzegowych wskazują, iż poziom mórz i oceanów podczas ocieplenia klimatu jest znacznie wyższy niż w czasie ochłodzenia (złodowacenia Ziemi). W czasie ostatniej fazy złodowacenia würm 18 000 lat temu wraz z przyrostem pokrywy lodowej poziom Atlantyku obniżył się około 135 m (Lamb 1972-1977).

Ekwiwalentem obecnej pokrywy lodowej jest różnica poziomu oceanów 59,1-83,3 m. A więc obecna pokrywa lodowa na Ziemi (lody Arktyki, Antarktydy i lodowce górskie) stanowi 43,8-61,7% masy lodu sprzed 18 000 lat. Średnie tempo wzrostu poziomu oceanów w ciągu tych 18 000 lat wynosi zatem 75 cm/100 lat.

Podnoszenie się poziomu mórz i oceanów w XIX-XX wieku wynika prawdopodobnie z rozszerzalności objętościowej wody. Objętość wód oceanów (bez mórz) obecnie wynosi 1370,4 milionów km^3 , a średnia głębokość 3704 m. Wzrostowi temperatury wody o 1°C odpowiada przyrost poziomu oceanów o 18 cm (przyjmując współczynnik rozszerzalności objętościowej $5,3 \cdot 10^{-5}$).

Efekt cieplarniany atmosfery, katastroficzne prognozy stopienia lodów Antarktydy i Arktyki

Dzięki istnieniu atmosfery, jej efektu cieplarnianego, możliwe jest życie na Ziemi. Średnia temperatura powierzchni Ziemi (i powietrza) jest równa $+15^\circ\text{C}$, a bez atmosfery

wynosiłaby -18°C . Naturalny efekt cieplarniany powoduje, iż Ziemia jest o 33°C cieplejsza.

Niektóre gazy śladowe, takie jak para wodna (H_2O), dwutlenek węgla (CO_2), metan (CH_4), freony (CFC), podtlenek azotu (N_2O), ozon (O_3) i inne, są dość przezroczyste dla krótkofalowego promieniowania słonecznego (o długości fali $<4\ \mu\text{m}$), a pochłaniają promieniowanie długofalowe Ziemi i atmosfery (o długościach $>4\ \mu\text{m}$). Efektem tej różnicy promieniowania jest dodatnie saldo energii słonecznej w układzie Ziemia-atmosfera (tzw. efekt cieplarniany).

Problem polega na intensyfikacji efektu cieplarnianego w wyniku dodatkowej emisji tych gazów do atmosfery – na systematycznym wzroście ich koncentracji, głównie CO_2 i CH_4 wywołanym działalnością człowieka.

Udział gazów śladowych w naturalnym efekcie cieplarnianym atmosfery (około $+33^{\circ}\text{C}$) jest następujący (Kondratiev 1987, w: Kożuchowski, Przybylak 1995):

Gazy śladowe	Przyrost temperatury w $^{\circ}\text{C}$
Para wodna (i chmury)	+20,6
Dwutlenek węgla	+7,2
Ozon	+2,4
Podtlenek azotu	+1,4
Metan	+0,8
Freony	<0,08
Razem	32,2

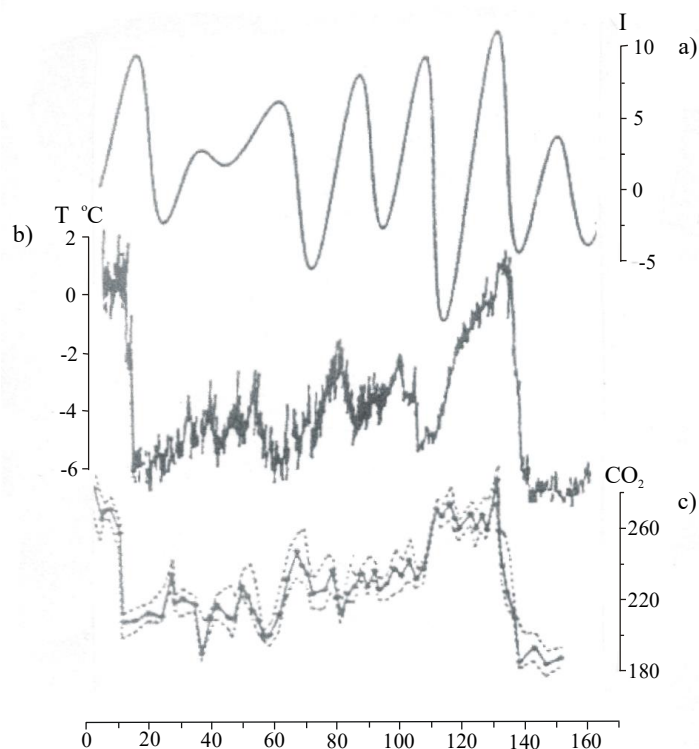
Koncentrację CO_2 przed rozwojem przemysłu równą, 280 ppm, traktuje się jako naturalny dwutlenek węgla w atmosferze (1 ppm – milionowa część objętości). Różnicę między dzisiejszą koncentracją CO_2 w atmosferze (355 ppm) i z czasów przedindustrialnych (280 ppm) przypisuje się działalności człowieka.

Naturalnym zbiornikiem regulującym zawartość CO_2 w atmosferze są oceany, stanowiące 70% powierzchni Ziemi. Pochłanianie CO_2 przez wody chłodniejsze (o większej zawartości biomasy) jest większe niż przez wody cieplejsze. Gdy w atmosferze znajduje się więcej CO_2 , to oceany wchłaniają go więcej, ze względu na większą różnicę ciśnienia tego gazu między atmosferą i powierzchnią oceanów. Część dwutlenku węgla akumulowana jest w osadach morskich w postaci węglanu wapnia CaCO_3 .

Drugim ważnym „regulatorem” zawartości CO_2 w atmosferze jest biomasa na kontynentach (głównie lasy). Fotosynteza (łącząca CO_2 z wodą H_2O) wiąże około 8 Gt/rok CO_2 , tj. mniej więcej tyle, ile wynosi roczna produkcja światowa CO_2 .

Współczesne ocieplenia i ochłodzenia klimatu są skorelowane z maksimami i minimumi zmierzonej masy CO_2 w atmosferze (wyrażonej w jednostkach ppm). Natomiast słabo są one skorelowane z oszacowaną emisją CO_2 (w jednostkach Gt) na podstawie ilości spalane go węgla. Świadczą o tym wykresy zmian stężenia dwutlenku węgla i paleotemperatury w ciągu ostatnich 160 000 lat, odtworzone na podstawie badań rdzeni

lodowych na stacji Wostok (*The atmosphere...* 1990). Podczas globalnego ocieplenia klimatu 125-130 000 lat temu wystąpił bardzo duży wzrost koncentracji CO₂ w atmosferze, podobnie jak teraz. Maksimum sprzed 125-130 000 lat – to naturalne ocieplenie klimatu Ziemi, wywołane wzrostem promieniowania słonecznego (zmianami parametrów orbity Ziemi). Wahania promieniowania słonecznego na równoleżniku $\varphi=65^{\circ}\text{N}$ (w lipcu), paleotemperatury i stężenia CO₂ w atmosferze w ciągu ostatnich 160 000 lat są synchroniczne (Berger 1978, rys.7). „Równoległość” zmian stężenia CO₂ i paleotemperatury świadczy, że zawartość dwutlenku węgla w atmosferze jest kształtowana przez temperaturę wód oceanów.



Rys. 7. Zmiany promieniowania słonecznego według teorii M. Milankovicia – zmian parametrów orbity Ziemi (A. Berger 1978) – (a), zmiany paleotemperatury (deuteru ²H) – (b) i stężenia CO₂ – (c) w ciągu ostatnich 160 000 lat na podstawie rdzeni lodowych na stacji Wostok (WMO, 1990)

Fig. 7. (a) The changes of solar radiation according to the theory of M. Milankovich of the Earth's orbit parameter changes (A. Berger, 1978) the changes of the palaeotemperature (deuter ²H) (b) and CO₂ concentration during the last 160,000 years, on the basis of ice cores from the Vostok Antarctic station (WMO, 1990)

Istotną rolę w kształtowaniu klimatu odgrywają procesy fizyczne towarzyszące efektowi cieplarnianemu (tzw. sprzężenia zwrotne). Niektóre z nich intensyfikują efekt cieplarniany (duże parowanie, spadek albedo w wyniku kurczenia się powierzchni śniegów

i lodów), a inne (grubość warstwy chmur w strefie okołorównikowej, koncentracja pyłów przemysłowych, absorbujących promieniowanie słoneczne) powodują jego osłabienie.

Globalne ocieplenie przypisywane jest przede wszystkim antropogenicznej części efektu cieplarnianego atmosfery – wzrostowi zawartości dwutlenku węgla (CO_2), pochodzącemu ze spalania węgla i innych paliw.

Raport IPCC (1990), prognozujący wzrost temperatury powietrza na Ziemi w roku 2030 o 1,5-4,5°C, był zbyt pesymistyczny. Pojawiły się później katastroficzne prognozy o stopieniu w najbliższej przyszłości lodów Antarktydy, Arktyki, a także lodowców wysokogórskich i zatopienie części kontynentów przez wody oceanów.

Kolejny raport IPCC (1995) jest bardziej optymistyczny, prognozowane są przyrosty antropogeniczne temperatury powietrza o 1-3,5°C w roku 2100, po uwzględnieniu rozpraszania promieniowania słonecznego przez cząstki aerozoli siarczanowych, pochodzących z emisji do atmosfery dwutlenku siarki (SO_2). Wnioski takie wynikają z modeli ogólnej cyrkulacji atmosferycznej – ze scenariuszy $2\times\text{CO}_2$, po podwojeniu przedprzemysłowej koncentracji dwutlenku węgla w atmosferze 280 ppm (rys. 5c – według empirycznego wzoru H. Oesechgera i U. Siegenthalera 1987; $\text{CO}_2 = 278,8 + 1,17e^{(\text{Data}-1800)/45}$). Mało znane są jednak tendencje zmian naturalnych gazów śladowych (pary wodnej, naturalnego CO_2), a przede wszystkim zachmurzenia.

W scenariuszach tych pomijane są zupełnie naturalne wahania klimatu, obserwowane od wielu tysięcy lat, wywołane eksplozywnymi erupcjami wulkanów i zmianami aktywności Słońca (jasności Słońca).

Na podstawie analogicznej cykliczności czynników naturalnych (aktywności Słońca, zawartości w atmosferze pyłów wulkanicznych), wskaźnika NAO i temperatury powietrza, można oczekiwać naturalnego ochłodzenia klimatu w XXI wieku (Boryczka 2001). To naturalne ochłodzenie klimatu w XXI wieku częściowo będzie złagodzone przez antropogeniczną część efektu cieplarnianego atmosfery i miejskie wyspy ciepła.

LITERATURA

- Astronomičeskij Ezegodnik SSSR na 1961 god.* 1959, Moskwa-Leningrad.
- Berger A., 1978, *Milankovich theory and climate*. Reviews of Geophysics, 26.
- Boryczka J., Wicik B., 1994, *Record Holocene Climate cycles in Lake Sediments in Central Poland*. Miscellanea Geographica, t. 6, Warszawa.
- Boryczka J., 1998, *Zmiany klimatu Ziemi*. Wyd. Akademickie „Dialog”, Warszawa.
- Boryczka J., Stopa-Boryczka M., Błażek E., Skrzypczuk J., 1999, *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce (Ochłodzenia i ocieplenia klimatu miast w Europie)*. t. XII, Warszawa.
- Boryczka J., Stopa-Boryczka M., Lorenc H., Kicińska B., Błażek E., Skrzypczuk J., 2000, *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce (Prognozy zmian klimatu Warszawy)*. t. XIV, Warszawa.
- Boryczka J., 2001, *Postęp badań przyczyn zmian klimatu Ziemi w drugiej połowie XX wieku*. Prace i Studia Geograficzne, t. 28, Wyd. UW.

- Budyko M. I., 1975, *Klimat i życie*, PWN, Warszawa.
- Czapiewska B., Bielicki M., 1982, *Ewolucja Układu Ziemia-Księżyc*. Postępy Astronomii, t.30, z.3-4.
- Hays J.D., Imbrie J.Z., Shackleton N.J., 1976, *Variation in the Earth's orbit: Pacemaker of the ice ages*. Science, 194, nr 4270.
- Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC – 1990, IPCC – 1995
- Johnsen S. J., Dansgaard W., Clausen H. B., Longway C. C., 1970, *Climatic oscillations 1200-2000 A.D.* „Nature”, no 227.
- Jones P. D., Jonsson T., Wheeler D., 1997, *Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland*. Int. J. Climatologie, 17, 1433-1450.
- Kondratiev K. J., Nikolski G. A., 1970, *Solar radiation and solar activity*. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., no 96.
- Kożuchowski K., Przybylak R., 1995, *Efekt cieplarniany*. Wiedza Powszechna, Warszawa.
- Kożuchowski K., Boryczka J., 1997, *Cykliczne wahania i trendy czasowe zmian poziomu morza w Świnoujściu (1811-1990)*. Przegl. Geofiz., nr 1.
- Lamb H.H., 1974, *Volcanic dust in the atmosphere with a chronology and assessment of meteorological*. Phil. Transactions Roy. Soc., ser. A, 226.
- Lamb H.H., 1977, *Climatic history and future*. Climate, present, past and future. t. 2, London, Methuen.
- Marsz A.A., (red.), 1999, *Wpływ stanu termicznego powierzchni oceanu na modyfikacje cyrkulacji atmosferycznej w wymiarze klimatologicznym*. Materiały konferencji, Gdynia 6 V 1999.
- Marsz A.A., 2001, *Stan termiczny Północnego Atlantyku a reżim termiczny zim na polskim wybrzeżu Bałtyku*. Wyższa Szkoła Morska, Gdynia.
- Marsz A.A., Styszyńska A., 2001, *Oscylacja Północnego Atlantyku a temperatura powietrza nad Polską*. Wyższa Szkoła Morska w Gdyni, Gdynia
- Milanković M., 1938, *Matematičeskaja klimatologija i astronomičeskaja teorija kolebanij klimata*. ONTU, Moskwa.
- Oeschger H., Siegenthaler U., 1987, *Biosphere CO₂ emission during the past 200 years reconstructed by deconvolution of ice core data*. Tellus, 39 B.
- Schönwiese C. D., 1997, *Klimat i człowiek*. Warszawa.
- The atmosphere of the planet Earth*, 1990, WMO, nr 735.

Jerzy Boryczka
Uniwersytet Warszawski
Zakład Klimatologii WGSR

CLIMATE OF THE EARTH PAST, PRESENT, FUTURE

SUMMARY

The paper presents the outline of the history of the earth's climate, emphasis being put on: the methods of study of climate changes; the most important events on the Earth from three billion years ago; the ice ages and the changes of the Earth's orbit parameters (forecasts for the next 100,000 years); the coolings and the warmings of climate in the Holocene (10,000 years ago); the coolings and the warmings of climate during the last millennium; the influence of the solar activity on climate; the influence of volcanic dust on climate (catastrophic forecasts of the glaciation of the Earth); the increasingly warm winters in Europe in the 19th and 20th centuries; the greenhouse effect (catastrophic forecasts of the melting of the Antarctic and Arctic ice caps).

The more important results are also presented of own studies concerning changes in the Earth's climate and their astronomic causes. Attention should first of all be paid to the results of calculation of the daily sums of solar radiation I_0 in the northern hemisphere ($\varphi = 65^\circ\text{N}$), received by a horizontal plane at the time of the summer solstice ($\delta = \varepsilon$) and winter solstice ($\delta = -\varepsilon$) during the last one million years (with application of the theory of Milankovich). The last eleven principal minima of the annual radiation sums I indicate the timing of the ice ages on the Earth.

The main coolings and warmings of the climate of Poland during the last 10,000 years, as determined on the basis of the contents of the organic substance from the lake Gościąg (according to the interference of the identified cycles $y = f(t)$) are synchronous with the fluctuations of the climate of North America (according to the analysis of the sediments in lake Wisconsin). The climate of Poland from 20,000 years ago was reconstructed by extrapolating the values of $y_i = f(t_i)$.

The progressing warming of the climate of Europe in the 19th-20th centuries may partly result from the natural reasons, that is – from the upward tendency of the solar activity and the downward tendency of the volume of volcanic dust in the atmosphere (volcanic eruptions occur at bigger time intervals).

Interesting information is provided by the comparison of the diagrams of changes in solar radiation (conform to the theory of M. Milankovich, after Berger 1978) and of palaeotemperature as well as concentration of carbon dioxide, during the last 160,000 years, reconstructed on the basis of analysis of the ice cores from the Vostok Antarctic station. The maxima (of solar radiation, palaeotemperature and concentration of CO₂) from 125,000-130,000 years ago witness a natural warming of the climate of the Earth, caused by the increased solar radiation (the result of the superposition of cycles of the Earth's orbit parameters having the periods of about 100,000, 40,000 and 21,000 years).