

dr hab. inż. Wojciech W. FELUCH, prof. SGSP
Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Cywilnego
Katedra Inżynierii Bezpieczeństwa

CYKLICZNE PRZYCZYNY ZAGROŻEŃ GWAŁTOWNYMI ZMIANAMI KLIMATU

Słowa kluczowe: globalne zmiany klimatu, cykle Milankovicia, aktywność Słońca.

Niniejsze opracowanie dotyczy zagrożeń wynikających z wpływu cyklicznych ruchów Ziemi i aktywności Słońca na gwałtowne zmiany klimatu.

The article deals with the threats resulting from the impact of cyclicity of the Earth movements and the Sun activity on rapid climate changes.

1. Wstęp

Pojęciem 'klimat' określa się charakterystyczny w okresie wieloletnim przebieg zjawisk pogodowych na danym obszarze. Mówiąc o klimacie w skali globalnej, rozumie się przebieg zjawisk pogodowych na obszarze całej Ziemi. Na skutek istniejących sprzężeń zwrotnych pomiędzy zjawiskami pogodowymi klimat stanowi złożoną reakcję atmosfery, oceanów i lądów na promieniowanie dopływające ze Słońca oraz wypromieniowywane z Ziemi. Jakakolwiek zmiana przestrzennego rozkładu tego bilansu energetycznego może powodować zagrożenia w postaci gwałtownych zmian klimatu, których miarą w skali globalnej jest głównie średnia roczna temperatura powietrza określana od czasów rozpoczęcia pomiarów (XIX wiek) i odtwarzana wstecz różnymi metodami badawczymi.

Gwałtowne zmiany klimatu mogą wystąpić w okresie nawet kilku lat. Z uwagi na potencjalnie negatywne skutki można je postrzegać w kategorii zagrożenia rozumianego jako zdarzenie niepożądane, związane z koniecznością również gwałtownego dostosowania się do nowych warunków życia, zaburzeń gospodarczych lub ogólnie cywilizacyjnych.

Zmiany klimatu następują nie tylko na skutek czynników wewnętrznych związanych ze zjawiskami zachodzącymi na Ziemi i działalnością człowieka powodującego zwiększoną emisję gazów cieplarnianych, ale również wskutek czynników zewnętrznych związanych z cyklicznymi ruchami Ziemi i aktywnością słoneczną. Z tego punktu widzenia wydaje się interesująca próba oceny takiego wpływu w aspekcie przyczynowo-skutkowym.

2. Cykliczne ruchy Ziemi

Ziemia na orbicie wokół Słońca wykonuje szereg ruchów cyklicznych (rys. 2.1). Według Milankovicia [Milanković, 1941] należą do nich

Zmiany mimośrod (Eccentricity) (e) orbity Ziemi (rys. 2.1-A), przy czym

$$e = \frac{a}{d} \quad (2.1)$$

gdzie: d – długość długiej półosi ziemskiej orbity eliptycznej,

a – odległość pomiędzy środkiem ziemskiej orbity a środkiem Słońca.

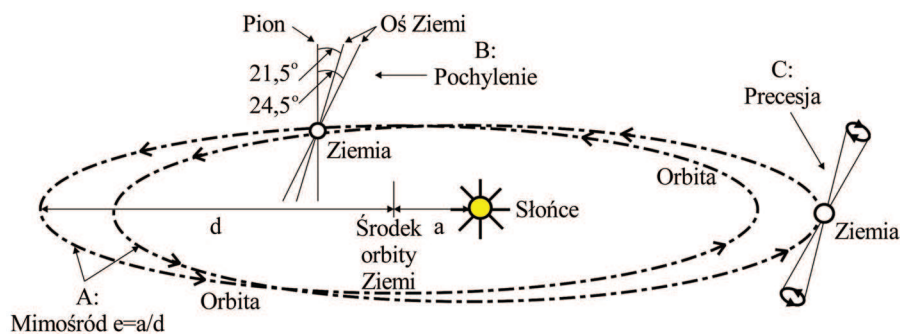
Teoretycznie, w przypadku gdy orbita jest kołowa, $e = 0$. Gdy orbita jest elipsą bardzo wydłużoną, wówczas e jest bliskie jedności, tzn. $e < 1$ ($e = 1$ oznaczałoby orbitę paraboliczną). Ziemia okrąża Słońce po orbicie eliptycznej, której mimośród ulega niewielkim wahaniom (w zakresie 0,005–0,058 w okresie ok. 95 tys. lat). Obecnie mimośród orbity Ziemi jest bardzo mały i wynosi 0,0167, zaś orbita Ziemi jest prawie kołowa i staje się coraz bardziej kołowa z uwagi na malejący mimośród. W takiej sytuacji nasza planeta otrzymuje około 6 procent energii słonecznej więcej, gdy znajduje się w punkcie orbity najbliższym Słońcu (*perihelium*), niż gdy znajduje się w punkcie orbity najdalszym od Słońca (*aphelium*). W okresie bardziej eliptycznego kształtu orbity różnice wielkości energii otrzymywanej przez Ziemię w *perihelium* i *aphelium* mogą dochodzić do 20–30%. Na skutek malejącego mi-

mośrodu różnica pomiędzy perihelium i aphelium nadal jeszcze maleje, przez co zmniejsza się zróżnicowanie w ilości docierającej do Ziemi energii słonecznej.

Zmiany nachylenia osi Ziemi (Obliquity)(rys. 2.1-B)

Oś obrotu Ziemi nachylona jest do płaszczyzny orbity, wahając się w przedziale od 22,1 stopnia do 24,5 stopnia w cyklu 41 tys. lat. Wpływa to na zmniejszenie lub zwiększenie temperaturowych różnic pomiędzy porami roku. Przy **malejącej** tendencji nachylenia osi do ekliptyki zmniejsza się różnica w ilości promieniowania słonecznego docierającego do Ziemi w okresie zimy i lata, co **sprzyja** rozwojowi pokryw lodowych. Przy tendencji **rosnącej** różnica w ilości promieniowania słonecznego docierającego do Ziemi w okresie zimy i lata staje się większa. Powoduje to cieplejsze lata i chłodniejsze zimy. Wzrastają wówczas kontrasty termiczne między niskimi a wysokimi szerokościami geograficznymi, co **nie sprzyja** rozwojowi pokryw lodowych. Obecnie nachylenie wynosi 23,4 stopnia i maleje ok. 0,5 sekundy na rok. Zgodnie z powyższym, obecna tendencja zmian nachylenia osi Ziemi sprzyja tworzeniu się pokryw lodowych.

Precesja osi Ziemi (Precession) (rys. 2.1-C) stanowi obrót osi ziemskiej w okresie około 23–26 tys. lat w kierunku odwrotnym niż obrót dobowy, podobnie jak oś obrotu wirującego bąka po powierzchni w kształcie bocznej powierzchni stożka. Na skutek tego zjawiska ulegają przesunięciu punkty równonocy oraz przesilenia letniego i zimowego.

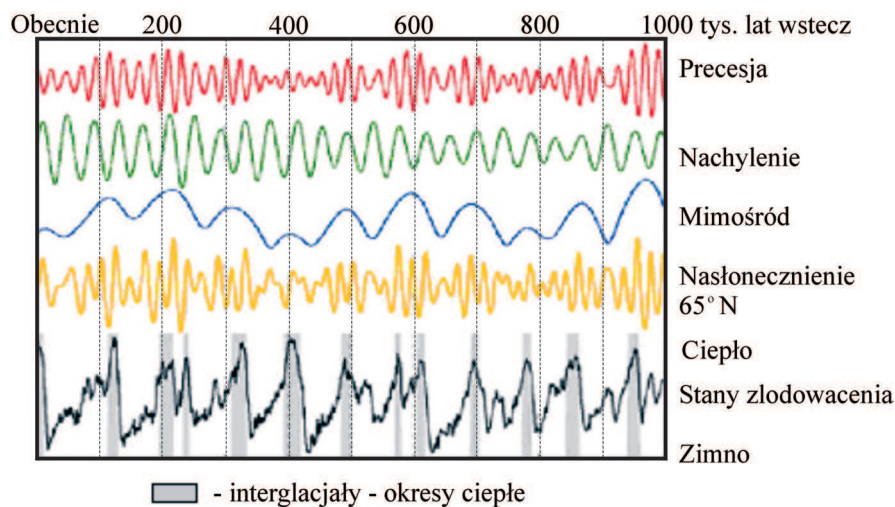


Rys. 2.1. Cykliczne ruchy Ziemi wg teorii Milankovicia: A – zmiana mimosrodu orbity Ziemi, B – zmiany pochylenia osi Ziemi, C – ruch precesyjny Ziemi [na podstawie: <http://www.eko.uj.edu.pl/weiner/biogeoch/integracja.pdf>. Dostęp 5 stycznia 2010]

Jeżeli Ziemia znajduje się najbliżej Słońca (tj. w perihelium) latem, wówczas różnice w nasłonecznieniu pomiędzy latem i zimą są znacznie większe niż gdyby

było odwrotnie w tych samych warunkach fazowych, czyli Ziemia znajdowałaby się bliżej Słońca zimą, a najdalej (tj. w *aphelium*) latem. Ten drugi z wymienionych przypadków sprzyja sytuacji ochłodzeniowej. Obecnie Ziemia znajduje się w *perihelium* 3 stycznia, a w *aphelium* 4 lipca, co powoduje, że różnica w nasłonecznieniu między latem a zimą na półkuli północnej jest mniejsza niż będzie za ok. 11 tys. lat, kiedy *aphelium* nie będzie latem tylko zimą, a *perihelium* nie zimą tylko latem. Istniejąca faza ruchu precesyjnego sprzyja więc warunkom ochłodzenia klimatu na naszym globie.

Gdy analizuje się rys. 2.2, na uwagę zasługuje zależność pomiędzy zmianami mimośrodowości (eccentricity) orbity Ziemi w cyklach 95 i 400 tys. lat a ociepleniem na Ziemi lub ochłodzeniem, z którym pojawia się zlodowacenie. Każdemu maksimum mimośrodowości na osi czasu odpowiada okres ciepły zaznaczony na dolnym wykresie rys. 2.2, zaś każdemu minimum okres ochłodzenia. Z uwagi na malejącą tendencję zmian mimośrodowości, można spodziewać się, że obecnie panujący okres ocieplenia klimatycznego zbliża się ku końcowi analogicznie do wcześniejszych tendencji.



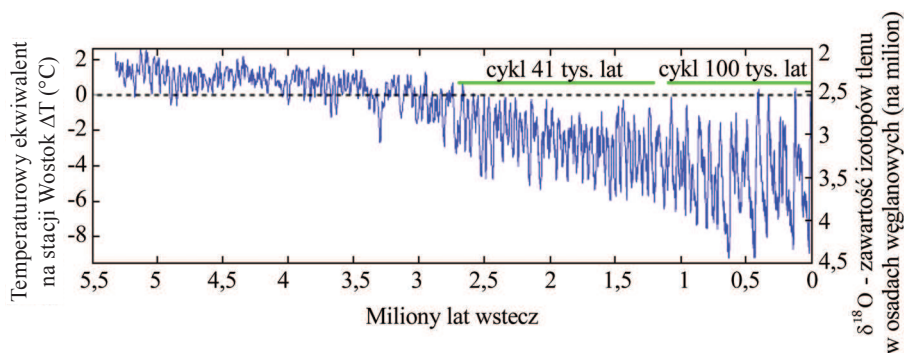
Rys. 2.2. Wpływ cykliczności ruchów Ziemi wg teorii Milankowicia na zlodowacenia [na podstawie: Lee, 2010]

Sumaryczne działanie wszystkich trzech cykli wg Milankowicia ma wpływ na nasłonecznienie Ziemi (rys. 2.2) i jednocześnie na zmienność klimatu Zie-

mi. Wartość nasłonecznienia letniego na dużych szerokościach geograficznych (65 N) decyduje o początku i końcu okresu lodowcowego, zaś 95-tysiącletni rytm tworzenia się epok lodowcowych jest zbieżny ze zmianami mimośrodoru orbity Ziemi.

Według teorii Milankovicia, ochłodzeniu klimatu i wzrostowi łądolodu sprzyja sytuacja, w której Ziemia jest bliżej Słońca (w *perihelium*) zimą oraz nachylenie osi do płaszczyzny ekliptyki jest niewielkie. Wówczas zima jest dość ciepła, opady śniegu nad biegunami mogą być duże, a lato stosunkowo chłodne, dzięki czemu cały śnieg może nie zdążyć się stopić. Taka sytuacja stanowiłaby zapewne początek epoki lodowcowej z uwagi na sprzężenie zwrotne istniejące pomiędzy pokrywą śnieżną i temperaturą [Budyko, 1975].

Przyczyna dominacji cykli mimośrodoru, a szczególnie około 95-tysiącletniego na zmienność klimatyczną jest jednak przypuszczalnie pozorna. Na podstawie zmiennej zawartości izotopów tlenu ($\delta^{18}\text{O}$) w osadach, odtworzone fluktuacje klimatu w okresie ostatniego miliona lat (rys. 2.3) wskazują na zależność od zmian mimośrodoru, a we wcześniejszym okresie od zmian nachylenia osi Ziemi, tj. cyklu 41-tysiącletniego. Możliwe, że ta zauważona zmienność (rys. 2.3) jest skutkiem okresowego nałożenia innych czynników, przy których zmiany mimośrodoru nie mają dominującego znaczenia.



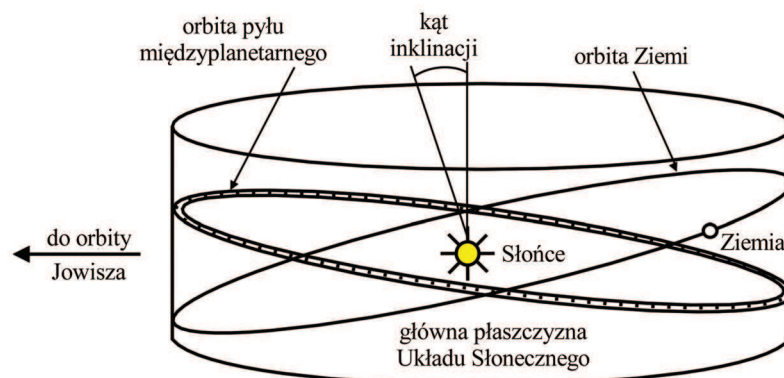
Rys. 2.3. Zmiany klimatu w ostatnich 5 milionach lat odtworzone na podstawie

zmienności zawartości izotopów tlenu $\delta^{18}\text{O} = \frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} \times 1000$ w dennych

osadach węglanowych, przy czym: $R \equiv {}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$; „standard” oznacza odniesienie do współczesnych zawartości izotopów tlenu w osadach [źródło: Archibald, 2007]

- **Nachylenie orbity Ziemi (inklinacja)**

W teorii Milankovicia pominięty został ważny element ruchu orbitalnego Ziemi, podlegający cyklicznym zmianom. Elementem tym jest nachylenie (tzw. inklinacja) orbity ziemskiej względem tzw. głównej płaszczyzny Układu Słonecznego obejmującej Słońce i planety, a w szczególności największą – Jowisza (rys. 2.4).

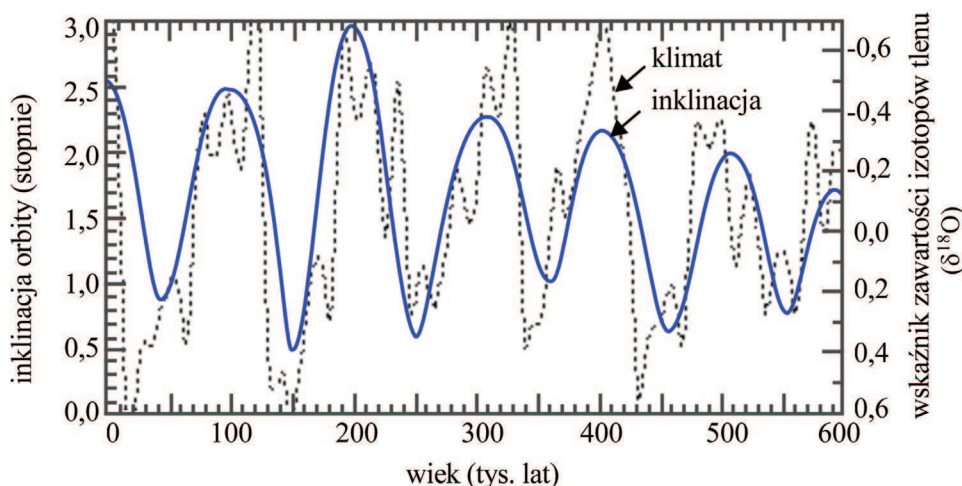


Rys. 2.4. Cyklicznie zmieniające się nachylenie orbity Ziemi do głównej płaszczyzny Układu Słonecznego, na której może znajdować się pył międzyplanetarny lub drobny gruz kosmiczny [na podstawie: Muller, MacDonald; 1995]

Okazuje się, że nachylenie to zmienia się z okresem około 100 tys. lat [Muller, MacDonald; 1995, 1997], a więc prawie zbieżnym z 95-tysiącletnim cyklem zmian mimośrodów wg teorii Milankovicia. Podobnie następowały zmiany klimatu w okresie ostatnich 600 tys. lat (rys. 2.5).

Istniejąca wyraźna zależność pomiędzy nachyleniem orbity i zmianami klimatycznymi (rys. 2.5) wskazuje, że 95-tysiącletnia cykliczność zmian klimatycznych może nie zależeć od mimośrodowych zmian odległości od Słońca, ale od kąta nachylenia orbity Ziemi lub łącznie od obydwu czynników. Ponieważ kąt nachylenia orbity nie może mieć bezpośredniego wpływu na wielkość nasłonecznienia, zatem powinien istnieć inny czynnik mający wpływ na zmienność klimatyczną, zależny od nachylenia orbity. Nie ma obecnie jednoznacznego wyjaśnienia, jaki to czynnik. Przypuszcza się, że w głównej płaszczyźnie Układu Słonecznego występuje koncentracja pyłu międzyplanetarnego (rys. 2.4), który przy mniejszych nachyleniach orbity ziemskiej (innej inklinacji) dostaje się do

atmosfery, powodując ochłodzenie, zaś przy nachyleniach większych – ocieplenie klimatu [Muller, MacDonald; 1995].



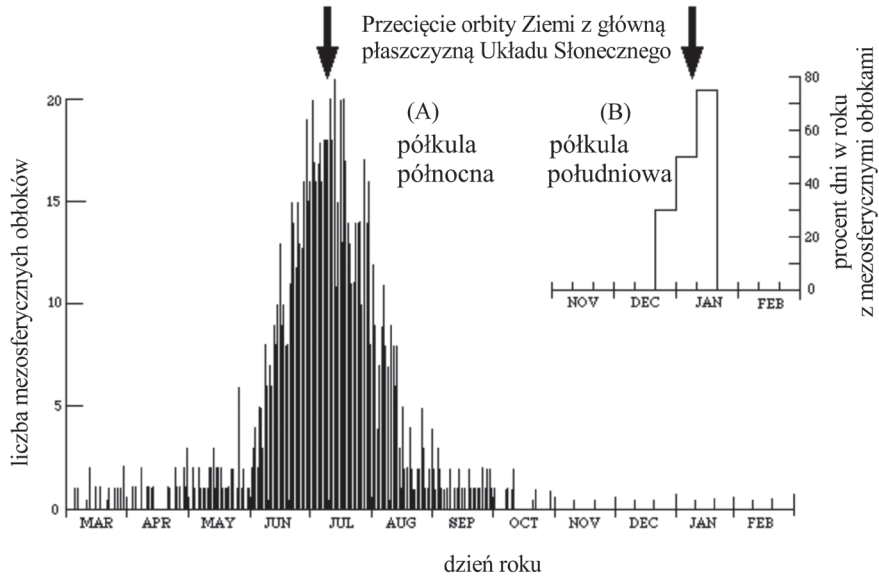
Rys. 2.5. Porównanie nachylenia (inklinacji) orbity Ziemi (linia ciągła) i zmienności wskaźnika zawartości izotopów tlenu $\delta^{18}\text{O}$ (linia przerywana) w pokrywie lodowej na Antarktydzie [źródło: Muller, MacDonald; 1995]

Potwierdzeniem tej koncepcji są świecące nocą tzw. mezosferyczne obłoki (Noctilucent Clouds), których częstotliwość osiąga maksimum w okresach przecięcia orbity Ziemi z główną płaszczyzną Układu Słonecznego (rys. 2.6). Obecnie istnieją dwa takie punkty, a mianowicie 9 stycznia na półkuli północnej i 9 lipca na półkuli południowej (rys. 2.6).

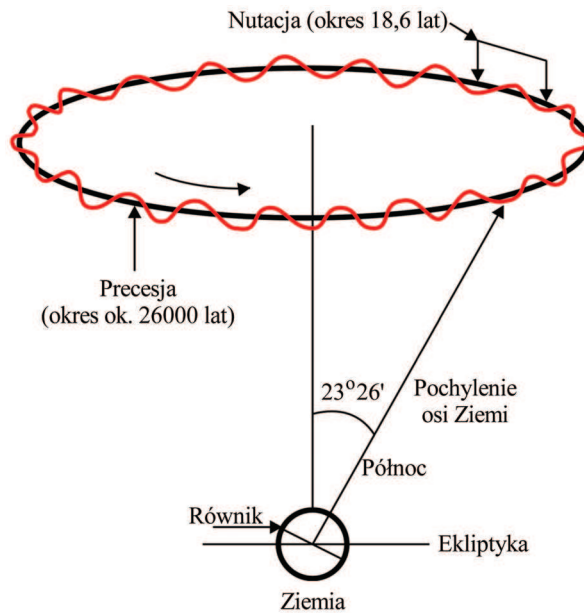
Z punktu widzenia zagrożeń dodatkowym czynnikiem uwzględnianym w zmienności klimatycznej powinna być również inklinacja i jej skutki w postaci częstości mezosferycznych obłoków. Można przypuszczać, że przy malejącej inklinacji będzie rozszerzała się na pozostałe miesiące intensywność i częstość mezosferycznych obłoków oraz ochłodzenie klimatu w miarę zbliżającej się epoki lodowcowej.

- **Nutacja**

W teorii Milankowicia nie uwzględniona jest również nutacja – ruch osi Ziemi występujący przy ruchu precesyjnym (rys. 2.7). Przyczyną nutacji są siły pływowe Słońca i Księżyca, zaś główny cykl nutacji wynosi 18,6 roku i jest taki sam jak okres precesji osi Księżyca.



Rys. 2.6. Częstość mezoferycznych obłoków świecących nocą w okresie roku (A) na półkuli północnej, (B) na półkuli południowej [na podstawie: Muller, MacDonald; 1995]



Rys. 2.7. Nutacja w relacji z ruchem precesyjnym osi Ziemi
Źródło: opracowanie własne

Wpływ nutacji na zmienność klimatyczną Ziemi stanowi przedmiot badań. Z punktu widzenia zagrożeń największe znaczenie mają związane z tym zmiany sejsmiczności mogące prowadzić do tzw. kataklizmu sejsmicznego [Adamczewski, 1991], stanowiącego zdarzenie o przynajmniej jednym ze zjawisk takich jak silne trzęsienie ziemi, wybuch wulkanu, powstanie nowego wulkanu. Wpływ zwiększonej aktywności wulkanicznej na klimat jest dowiedziony i wynika ze zwiększonego zapylenia atmosfery, stanowiąc przyczynę zmniejszonej radiacji i ochłodzenia.

W pracach [Adamczewski, 1991, 2002] przedstawiono interesującą hipotezę dotyczącą zależności pomiędzy długością geograficzną potencjalnego miejsca kataklizmu sejsmicznego a datą kataklizmu. Istnienie południkowej nierówności topograficznej Ziemi w postaci trzech głównych grzbietów (amerykańskiego, afrykańskiego i azjatyckiego), ruchu rotacyjnego Ziemi i nutacji może powodować okresowe kataklizmy sejsmiczne, mogące mieć wpływ na klimat Ziemi oraz powodować niekorzystne klimatycznie zjawisko El Nino.

3. Zmiany klimatu a wpływ Słońca

Począwszy od 1610 roku, kiedy Galileusz rozpoczął obserwacje Słońca, prowadzone są obserwacje plam słonecznych, stanowiąc podstawę wniosków dotyczących ich wpływu na klimat Ziemi.

Jak wiadomo, plamy słoneczne są wynikiem obniżonej temperatury na powierzchni Słońca o około 1000 K, a w środku plamy obniżenie jest nawet o paręset stopni większe, co w porównaniu z temperaturą przeciętną na otaczającej powierzchni (5785 K) jest istotną i zauważalną wizualnie różnicą (rys. 3.1).

Plamy spowodowane są koncentracją pola magnetycznego obracającego się Słońca; na skutek większej prędkości obracania się obszarów równikowych niż biegunowych, linie pola magnetycznego wewnątrz Słońca ulegają skręceniu i w sytuacji przebicia przez powierzchnię obserwuje się objawy aktywności w postaci plam, czyli obszarów o utrudnionym dopływie ciepła ze środka Słońca, rozbłysków i protuberancji, tj. olbrzymich erupcji rozrzedzonych gorących gazów.

Zwiększona aktywność plam słonecznych związana jest cykliczną aktywnością słoneczną, której skutkiem jest tzw. wiatr słoneczny, w skład którego wchodzi cząstki, elektrony, jony atomów oddalające się ze Słońca z prędkością rzędu

1000 do 3000 km/s. Gęstość wiatru słonecznego w okolicy Ziemi przy przeciętnej aktywności Słońca wynosi około 10 do 100 cząstek w 1 cm^3 , powodując między innymi zmiany ziemskiego pola magnetycznego i zorze polarne.



Rys. 3.1. Plamy na powierzchni Słońca związane z cykliczną aktywnością słoneczną
Źródło: Serwis Astronomiczny: www.astronomia.pl. Dostęp 19 czerwca 2006 r.

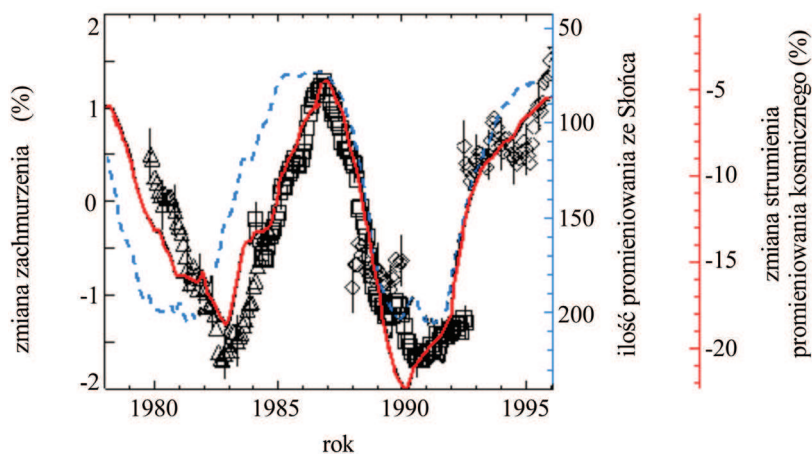
Wiatr słoneczny wraz z promieniowaniem kosmicznym spoza Układu Słonecznego, docierając do Ziemi, powodują jonizację górnych części atmosfery. Powstałe w wyniku tego jony mogą być zarodkami skraplania się pary wodnej, co stanowiłoby przyczynę zwiększonego zachmurzenia, wstrzymującego proces wypromieniowywania ciepła do otaczającej przestrzeni kosmicznej [Wibig, 2005].

Potwierdzeniem relacji zachmurzenia i promieniowania zarówno słonecznego, jak i kosmicznego jest rys. 3.2, przedstawiający wyniki obserwacji uzyskane z czterech satelitów Nimbus-7, DSMP, ISCCP-C2, ISCCP-D2, zaznaczone jako punkty wykresu oraz strumienia neuronów rejestrowanych na stacji Climax, stanowiącego miarę promieniowania kosmicznego (linia czerwona).

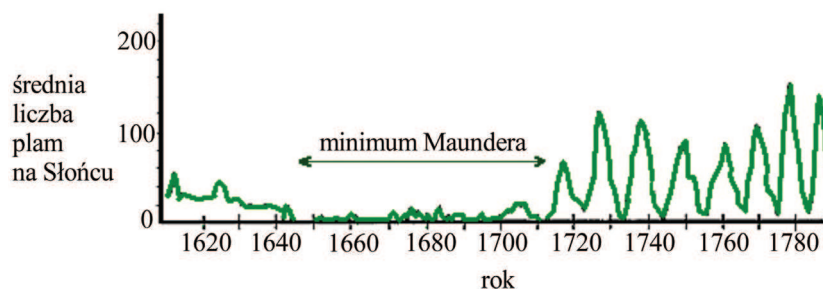
Długotrwałe wstrzymywanie wypromieniowania ciepła poza atmosferę do otaczającej Ziemię przestrzeni kosmicznej może pociągać za sobą wahania

klimatu ziemskiego w cyklu zbliżonym do aktywności Słońca, niekoniecznie z 11-letnim okresem zmienności. Na przykład obserwacje plam słonecznych z lat 1645–1715 wskazują na małą aktywność Słońca, czego skutkiem jest tzw. minimum Maundera zbieżne z bardzo chłodnym okresem na Ziemi zwanym w klimatologii Małą Epoką Lodowcową (rys. 3.3).

Na skutek promieniowania kosmicznego, które pochodzi spoza Układu Słonecznego, w górnych warstwach atmosfery ziemskiej następuje proces bombardowania neutronami atomów azotu (^{14}N), w wyniku czego powstaje radioaktywny węgiel (^{14}C).



Rys. 3.2. Przebiegi zmian zachmurzenia (punkty), promieniowania kosmicznego (linia czerwona), promieniowania radiowego (linia niebieska)
[Wibig, 2005. www.u.lodz.pl/~wibig. Dostęp 3.02.2010]

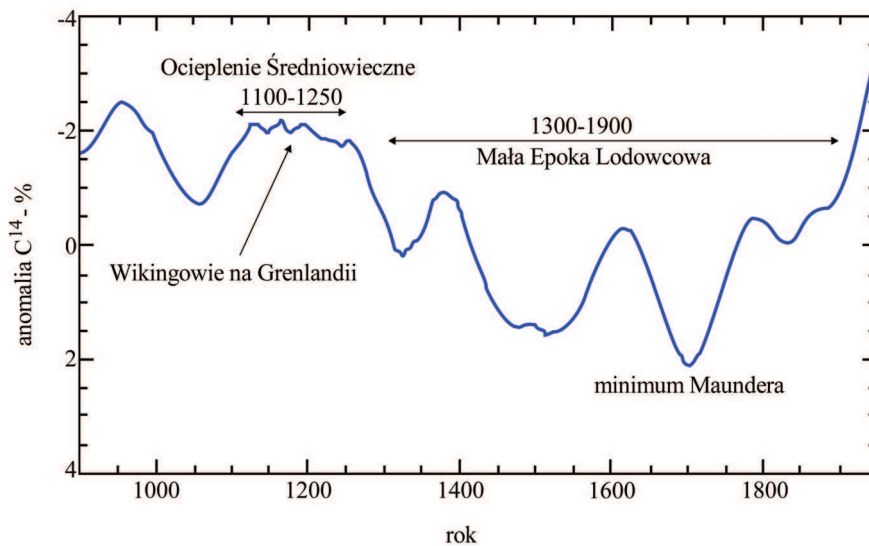


Rys. 3.3. Okres minimalnej liczebności plam słonecznych zwany minimum Maundera, zbieżny z ochłodzeniem klimatu na Ziemi

Źródło: <http://www.u.lodz.pl/~wibig/maze/fizyka/for/pogo.htm>. Dostęp 15.02.2010.

Wiatr słoneczny, mając kierunek przeciwny do promieniowania kosmicznego, odbija to promieniowanie, zaś wzrost aktywności plam słonecznych, powodując wzrost natężenia wiatru słonecznego stanowi czynnik redukujący proces powstawania radioaktywnego węgla, czego efektem jest zmniejszona jego koncentracja w atmosferze. W czasie małej aktywności plam słonecznych lub ich całkowitego zaniku sytuacja jest odwrotna. Promieniowanie kosmiczne w większym natężeniu dociera do atmosfery ziemskiej, powodując zwiększoną koncentrację (^{14}C) w atmosferze.

Radioaktywny węgiel z atmosfery jest asymilowany przez rośliny, a w szczególności przez drzewa. Występujące wahania jego koncentracji w atmosferze wpływają na wielkość jego asymilacji, co skutkuje różnymi wielkościami rocznych przyrostów słoików drzewnych. Istnieje więc naturalny system zapisu, który na podstawie metody datowania bazującej na aktywności węgla promieniotwórczego, zawartego w starych drzewach, umożliwia odtworzenie przebiegu tych zmian (anomalii) w przeszłości (rys. 3.4) z odniesieniem do wzorców drewna z końca XIX wieku, od którego rozpoczyna się intensywny rozwój przemysłu i emisja węgla jako pierwiastka do atmosfery.



Rys. 3.4. Wahania w zawartości ^{14}C w drzewach w odniesieniu do wzorców drewna z końca XIX wieku jako miara promieniowania kosmicznego dochodzącego do Ziemi; odwrócona oś pionowa ułatwia porównanie z aktywnością plam słonecznych [na podstawie: Wibig, 2005]

Ponieważ promieniowanie kosmiczne jest odbijane przez wiatr słoneczny, zatem wahania w aktywności słonecznej znajdują swoje odwrotne odzwierciedlenie w zawartości ^{14}C w atmosferze. Stosunkowo krótki okres obserwacji plam słonecznych można więc uzupełnić, doliczając brakujące dane na podstawie ciągów dendrochronologicznych [Solanki i in., 2004], lub bezpośrednio wykorzystywać te ciągi w analizie zmian klimatu w przeszłości. Ilustracją takiego podejścia jest rys. 3.4, z zaznaczonymi faktami historycznymi, a mianowicie wspomnianą wyżej Małą Epoką Lodowcową związaną z minimum Maundera aktywności plam słonecznych i jednocześnie maksimum promieniowania kosmicznego dochodzącego do Ziemi. Poprzedzająca minimum Maundera epoka dużej aktywności Słońca i małego promieniowania kosmicznego dochodzącego do Ziemi historycznie jest znana jako Ocieplenie Średniowieczne (lata 1100–1250).

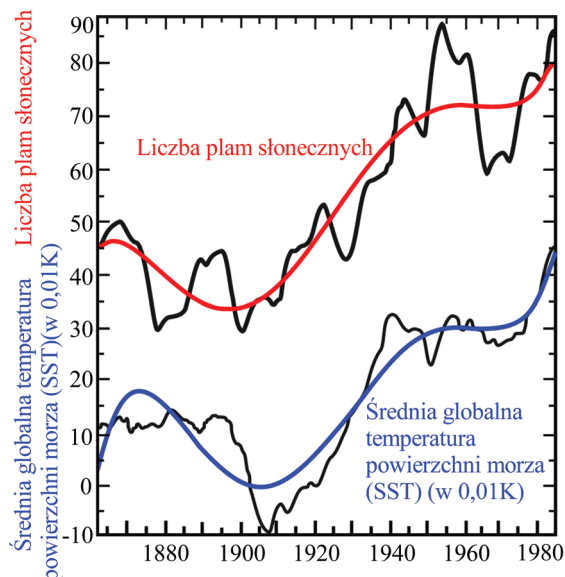
Duża zawartość ^{14}C w latach 1300 do 1900 świadczy o małej aktywności plam słonecznych szczególnie w okresach występowania kolejno dwóch minimumów (maksimów w wartościach zawartości ^{14}C – rys. 3.4), z których ostatnie nosi nazwę wspomnianego wyżej minimum Maundera. Dopiero w XX wieku aktywność Słońca wzrosła (zawartość ^{14}C w atmosferze zmalała) do poziomu, jaki wystąpił w Średniowiecznym Ociepleniu (rys. 3.4).

Sięgając do wcześniejszych okresów odtworzonych danych oceny aktywności Słońca [Solanki i in., 2004] zauważalna jest różnok okresowa cykliczność, z dominacją cyklu 11-letniego.

Z obserwacji satelitarnych wynika, że całkowite promieniowanie słoneczne w 11-letnim cyklu słonecznym waha się średnio o około 0,1%, co odpowiada wahanom rzędu $1\text{--}2\text{ W/m}^2$ przy całkowitym promieniowaniu słonecznym 1366 W/m^2 dochodzącym do górnych warstw atmosfery. Zmienność 0,1% związana jest w dużym stopniu z długością fal promieniowania elektromagnetycznego [Lean i in., 1995] i znaczna jest w obszarze ultrafioletu. Zmienność ta przenosi się aż na różnicę $0,5\text{--}1,0^\circ\text{C}$ globalnej temperatury troposfery [Labitzke and van Looy, 1993], przy czym promieniowanie jest największe w czasie największej aktywności plam słonecznych i najmniejsze w czasie aktywności minimalnej.

Reid [1999], analizując relacje pomiędzy liczbą plam słonecznych i średnią temperaturą powierzchni mórz w kolejnych latach zauważa silne podobieństwo tych krzywych, a szczególnie ich aproksymacji, co wskazuje na duży wpływ Słońca na klimat Ziemi w ciągu ostatnich 150 lat (rys. 3.5). Praca Graya i in. [2010] nie potwierdza jednak powyższych wniosków Reida [1999]. Można więc

przypuszczać, że istnieje duża złożoność relacji temperatury na Ziemi i aktywności słonecznej.



Rys. 3.5. Liczba plam słonecznych (Sunspot number) wraz ze średnią temperaturą powierzchni mórz (Global mean SST) w kolejnych latach [Reid; 1999]; podobieństwo tych krzywych, a szczególnie ich aproksymacji (linie czerwona i niebieska) świadczą o wpływie Słońca na klimat Ziemi w ciągu ostatnich 150 lat [źródło: Viereck, 2001]

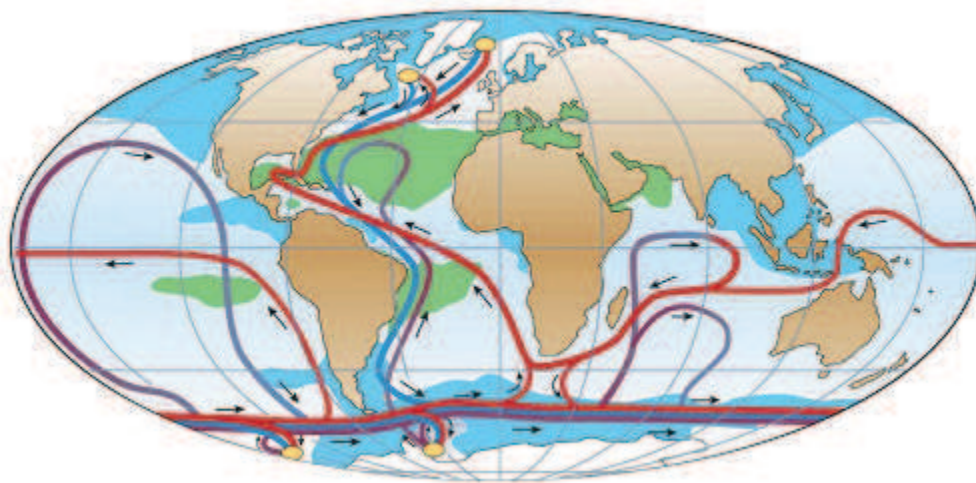
Jeżeli faktycznie cykliczna aktywność Słońca ma wpływ na klimat Ziemi, to w przypadku zmiany nasilenia plam słonecznych lub całkowitego ich zaniku na pewien czas, można spodziewać się ochłodzenia klimatu nawet w stopniu podobnym do okresu Małej Epoki Lodowcowej, kiedy zamarzał Bałtyk.

4. Raport Pentagonu a zmiany klimatu

Według raportu Pentagonu [Schwartz, Randall, 2003] inną postacią zagrożenia globalnego jest możliwość, iż wzrastające obecnie globalne ocieplenie może spowodować gwałtowne spowolnienie cyrkulacji termohalinowej, polegającej

na przepływie olbrzymich mas ciepłej i słonej wody z obszarów równikowych do wysokich szerokości geograficznych, a następnie w wyniku oddania ciepła opadanie schłodzonej i zasolonej wody i powrót jej do obszarów równikowych.

Na skutek szybkiego topnienia lodowców na biegunach, powstaje duża ilość nie zasolonej wody, która może w efekcie wymieszania z wodą cyrkulacji termohalinowej (rys. 4.1), zmniejszyć jej gęstość i uniemożliwić tonięcie. W wyniku takich procesów zmniejszyłaby się ilość ciepła dostarczana do północnych części Atlantyku, zaś zwiększyłyby się w obszarach równikowych. Doprowadziłoby to do zaburzeń klimatycznych w skali całego globu. Przypadki takie zdarzały się w przeszłości. W czasach obecnych mogłoby to doprowadzić do ostrzejszych zimowych warunków pogodowych, dużego zmniejszenia wilgotności gleb i bardziej intensywnych wiatrów w regionach, które aktualnie dostarczają znacznej ilości żywności w skali światowej. Na podstawie badań autorzy raportu uważają, że gdy średnia temperatura powietrza na globie podniesie się powyżej pewnego poziomu, wówczas zgodnie z powyższym mogą gwałtownie wystąpić niesprzyjające warunki pogodowe i wraz z nasilającymi się zmianami w atmosferycznej cyrkulacji powodować nawet w ciągu jednej dekady spadki temperatury w niektórych regionach Ziemi o 5–10°F (2,8–5,6°C).

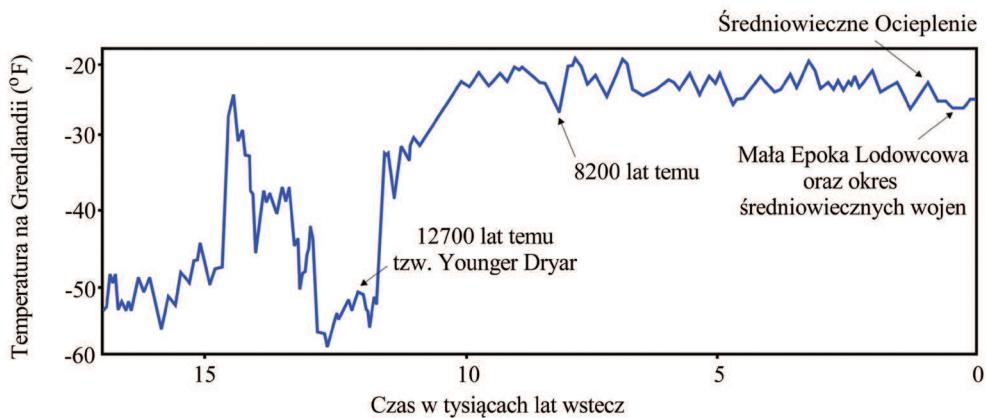


Rys. 4.1. Termohalinowa cyrkulacja; kolor czerwony odpowiada prądom ciepłym, kolor niebieski prądom zimnym. Miejsca żółte oznaczają obszary opadania wychłodzonej wody [źródło: Rahmstorf, 2002]

Takie przyspieszone zmiany klimatyczne mogą także utrzymywać się nawet przez stulecie, tak jak to miało miejsce 8200 lat temu, czy 1000 lat analogicznie do okresu sprzed 12 700 lat temu, tzw. Younger Dryas (rys. 4.2), gdy w obydwu sytuacjach cyrkulacja oceaniczna została zakłócona i nastąpiło gwałtowne ochłodzenie klimatu na Ziemi.

W przypadku zmiany klimatu analogicznej do tej sprzed 8200 lat można spodziewać się:

- spadku średniej rocznej temperatury o 5 stopni Fahrenheita (ok. 2,8°C) na terenach Azji i Północnej Ameryki i 6 stopni (ok. 3,3°C) w północnej Europie,
- wzrostu średniej rocznej temperatury o 4 stopnie (ok. 2,2°C) w częściach Australii, Południowej Ameryki i południowej Afryki,
- okresów suszy trwających przez większą część dekady w kluczowych regionach rolniczych i regionach zaopatrujących w wodę populacyjne centra ludności w Europie i północno-wschodniej Ameryce,
- wzrostu intensywności zimowych burz i wiatrów, potęgujących gwałtowność zmian klimatycznych na Ziemi,
- silniejszych wiatrów w zachodniej Europie i nad północnym Pacyfikiem.



Rys. 4.2. Zmiany średniej rocznej temperatury w Grenlandii [na podstawie Schwartz, Randall, 2003]

Zmiany klimatyczne dotyczyłyby więc całej Ziemi. W szczególności w północno-zachodniej Europie klimat byłby zimniejszy oraz bardziej suchy i wietrzny – przypominający klimat Syberii. Powyższe gwałtowne zmiany klimatyczne na świecie mogą zdestabilizować geopolityczną sytuację i doprowadzić do sporów a nawet wojen o ograniczone surowce, takie jak:

1. Żywność – z powodu ograniczenia możliwości produkcji na skalę światową.
2. Świeża woda – z powodu jej zmniejszonej jakości i dostępności w kluczowych regionach.
3. Energia – z powodu zakłóconego do niej dostępu.

O ważności powyższego zagrożenia świadczy zainteresowanie instytucji wojskowej, jaką jest Pentagon oraz forma raportu adresowanego do prezydenta USA.

5. Obecne skutki zmian klimatu

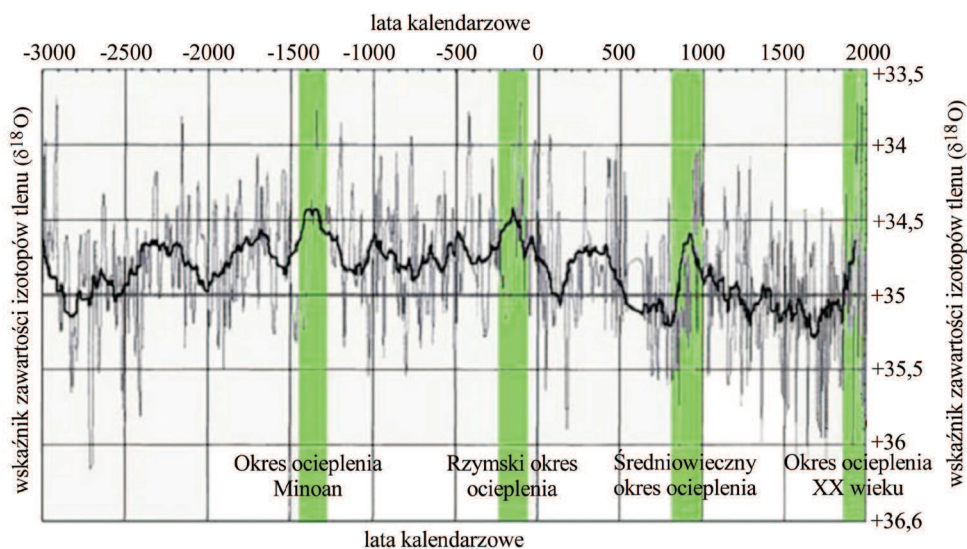
Obecnie zauważalne skutki zmian klimatu spowodowane są dotychczasowym ociepleniem i mogą dalej pogłębiać się [IPCC, 2007], bowiem:

- Topnieje pokrywa lodowa na biegunach; na półkuli północnej zasięg pokrywy śnieżno-lodowej zmniejszył się o ok. 10%, a grubość lodu morskiego o ok. 40% w ciągu 40 lat (z 3,1 m do 1,8 m). Podobne procesy przebiegają na Antarktydzie.
- Kurczą się lodowce w wysokich górach w Austrii, Szwajcarii, w Afryce – lodowiec na Kilimandżaro. Przepuszczalnie do 2050 roku większość tych lodowców zniknie.
- Następuje wzrost poziomu mórz; w XX wieku podniósł się o 10–25 cm, zaś do 2100 roku przy aktualnym trendzie przewiduje się wzrost nawet o 88 cm, co spowodowałoby zalanie nisko położonych wysp i obszarów przybrzeżnych, takich jak Malediwy, delta Nilu, Bangladesz, zaś w Europie zalane zostałyby tereny przybrzeżne zamieszkałe przez 70 mln ludzi. Woda morska może przedostać się na obszary położone nawet w głębi lądu, zanieczyszczając tereny uprawne i zasoby słodkiej wody.
- Wzrastają ekstremalne zjawiska pogodowe, takie jak huragany, powodzie, susze i fale upałów. Dzisiejsze rzadkie ekstrema już za kilka lat mogą stać się notowaniami „normalnymi” [Feluch, Kozieł 2007a, 2007b]. W ostatniej dekadzie wydarzyło się trzy razy więcej klęsk żywiołowych związanych z pogodą – w większości powodzi i huraganów – aniżeli w poprzednim dziesięcioleciu. Fala upałów, która przeszła w sierpniu 2003 roku przez Europę była najgroźniejsza od ponad 500 lat i spowodowała tylko we Francji śmierć blisko 15 000 osób. W przyszłości w regionie śródziemnomorskim spodziewane są ekstremalne upały (powyżej 35°C) trwające nawet do 6 tygodni, co mocno odbije się na turystyce i rolnictwie w tym regionie.

Dalszy wzrost ocieplenia może spowodować:

- braki wody pitnej w sytuacji wzrostu średniej temperatury na Ziemi o 2,5°C powyżej poziomu sprzed rewolucji przemysłowej; spowoduje to brak dostępu do czystej wody pitnej ponad połowie populacji, tj. 3,5–4,2 miliarda ludzi. Obecnie wody pitnej brakuje dla ok. 1,1 miliarda ludzi.
- wzrost poziomu głodu na świecie przy wzroście temperatury o 2,5°C; zagrożonych głodem będzie przypuszczalnie następne 50 milionów ludzi, poza 850 milionami, które już dzisiaj cierpią z powodu chronicznego głodu,
- rozprzestrzenianie się zakaźnych chorób, które w wyższej niż obecnie temperaturze umożliwią owadom (np. komarom) rozniesienie takich chorób, jak np. malaria w nowe rejony,
- wymarcie licznych gatunków roślin i zwierząt, które nie będą w stanie przystosować się do przesuniętych granic ekosystemów. Ocieplenie może doprowadzić do wyginięcia nawet jednej trzeciej gatunków na Ziemi do roku 2050, szczególnie żyjących obecnie w warunkach polarnych zwierząt takich jak niedźwiedzie polarne, foki, morsy i pingwiny.

Otwarty zostaje problem, jak długo będzie trwać aktualne ocieplenie klimatu (2010 rok), przeobrażając się z czasem w trend ochłodzeniowy.



Rys. 5.1. Zmiany klimatu w okresie ostatnich 5 tysięcy lat odtworzone na podstawie zmiennej zawartości izotopów tlenu [źródło: Carter, 2008].

Analiza odtworzonych zmian klimatu na podstawie zmiennej zawartości izotopów tlenu w ciągu ostatnich 5 tysięcy lat (rys. 5.1) pozwala zauważyć różnice w poszczególnych okresach ociepleniowych. Obecne ocieplenie nie jest większe niż średniowieczne (Medieval Warm Period), zaś mniejsze od dwu wcześniejszych – Roman Warm Period oraz Minoan Warm Period. Ponadto zauważalny jest trend malejący maksimum tych ciepłych okresów (rys. 5.1). Jeżeli faktycznie dalszy wzrost zawartości CO₂ w atmosferze nie ma istotnego wpływu na wzrost temperatury, to zauważalny trend malejący w horyzoncie 5 tys. lat odpowiada ochłodzeniu klimatu.

6. Dyskusja

Z powyższych rozważań wynika, że w kontekście całej historii Ziemi klimatem steruje bilans energii, tzn. różnica energii docierającej do Ziemi ze Słońca i tej, która ucieka z Ziemi w przestrzeń kosmiczną. W długich skalach czasowych na zmiany klimatu wpływają cykliczne w Układzie Słonecznym ruchy Ziemi, a w krótszych (dziesiątki, setki i tysiące lat) zmiany klimatu mogą być wywoływane cyklicznymi zmianami aktywności samego Słońca. Synergia tych cyklicznych zmian w wielkości nasłonecznienia powierzchni Ziemi w połączeniu ze wzrostem emisji gazów cieplarnianych oraz potencjalną zmianą cyrkulacji termohalinowej może powodować gwałtowne zmiany klimatu.

W historii naszej planety nawet stosunkowo niewielkie zmiany nasłonecznienia powodowały znaczące zmiany temperatury i oscylowanie klimatu całego globu pomiędzy zimnymi epokami lodowcowymi i ciepłymi okresami interglacjalnymi (rys. 2.2, rys. 5.1).

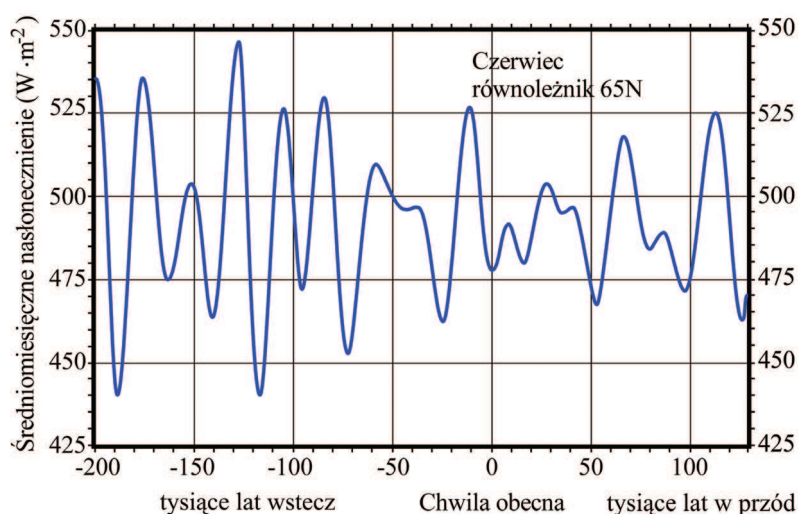
Cykl zlodowacenie-interglacjał trwał średnio około 100 tys. lat, czyli tyle, co cykle zmian mimośrod i inklinacji, z tego około 90 tys. lat przypadało na zlodowacenia. Interglacjały, czyli ciepłe okresy rozdzielające zlodowacenia trwały znacznie krócej – średnio około 10 tys. lat. Nietrudno zauważyć, że zgodne jest z teorią Milankovicia, iż okres holocenu, w którym żyjemy, jest interglacjałem, tylko że czas jego trwania wynosi już około 12 tysięcy lat. Ta sytuacja może budzić pewne obawy końca tego interglacjału, tym bardziej, że obecnie Ziemia znajduje się w *perihelium* zimą, co – zgodnie z występowaniem cyklicznych ruchów Ziemi (rozdz. 2) – sprzyja rozwojowi lądolodu.

Nie wszystkie interglacjały są równej długości. 400 tys. lat temu orbita Ziemi była niemal doskonale kołowa oraz fazy precesji osi nie prowadziły do dużych zmian nasłonecznienia (rys. 2.2). W efekcie ówczesny interglacjał –zwany MIS-11 (*Marine Isotope Stage 11*) [Raynaud et al., 2005] –przeskoczył jeden cykl precesyjny, a czas jego trwania wydłużył się do około 30 tysięcy lat. Przyпуска się, że podobne warunki panują dzisiaj [Raynaud et al., 2005]. Jeżeli obecne minimum letniego nasłonecznienia nie spowodowało epoki lodowcowej pomimo ochłodzenia zwanego Małą Epoką Lodowcową (lata 1300–1900 –rys. 3.4), to nie ma gwarancji, ale jest możliwe, że zlodowacenie nie nastąpi przez kolejne 30 tysięcy lat. Z obliczeń [Berger, 1978] wynika, że przyszłe nasłonecznienie Ziemi w powyższym okresie będzie większe niż obecnie (rys. 6.1). Wskazywałoby to na słuszność przypuszczenia o braku końca obecnego interglacjału. Można sobie wyobrazić, że sytuacja bardziej sprzyjająca powstaniu epoki lodowcowej to okres, w którym oś Ziemi jest mniej nachylona niż obecnie przy *perihelium* zimą i *aphelium* latem tak jak dzisiaj. Obecna faza cykli wg teorii Milankovicia nie musi więc sprzyjać szybkiemu powstaniu epoki lodowcowej, ale żeby to potwierdzić, potrzebne są kompleksowe i bardziej szczegółowe badania genezy przeszłych epok lodowcowych. Podobieństwo obecnego nasłonecznienia z nasłonecznieniem sprzed 400 tys. lat (rys. 2.1) i na skutek działalności człowieka wzmożona emisja gazów cieplarnianych nie dają pewności przeskoczenia cyklu precesyjnego i utrzymania się okresu ciepłego, tak jak to nastąpiło 400 tys. lat temu.

Na ochłodzenie klimatu może mieć wpływ zmniejszająca się aktywność Słońca, przyhamowanie cyrkulacji termohalinowej lub inny gwałtowny czynnik, taki jak supererupcja wulkaniczna, impakt z gruzu kosmicznego [Feluch, 2009], czy obecnie bliżej nieokreślone działanie obiektów naszej galaktyki lub inne zagrożenia o charakterze globalnym i aktualnie trudnej do ustalenia cykliczności lub powtarzalności. Nie budzi jednak wątpliwości założenie, że tego rodzaju zagrożenia będą miały przyspieszający wpływ na ochłodzenie klimatu, szczególnie w przypadku zapylenia atmosfery powodującego zmniejszenie nasłonecznienia powierzchni Ziemi.

Podczas poprzedniego interglacjału, tzw. okresu ocieplenia eemskiego, temperatury na Ziemi były wyższe o około 1–2°C (na Antarktydzie 2–3°C) i spowodowały podniesienie się poziomu oceanów o przynajmniej 5 m wyżej niż współcześnie, co wynikało z większego niż dzisiaj zaniku czap lodowych Grenlandii

i Antarktydy Zachodniej. Ówczesny stan poziomu mórz i ówczesny zanik czap lodowych, obecnie można potraktować jako górne ograniczenie z uwagi na fakt, iż w czasie co najmniej ostatniego miliona lat stan zlodowacenia nie był tak niski jak eemski (rys. 2.2). Jeżeli obecny trend ociepleniowy nie zmieniłby się oraz doszedłby do poziomu okresu eemskiego, to wzrost poziomu wody w morzach i oceanach spowodowałby zalanie wszystkich delt rzek, wysp koralowych i portów. Nie nastąpiłoby to przypuszczalnie zbyt gwałtownie w skali życia ludzkiego, tym niemniej można sytuację taką traktować jako potencjalne zagrożenie.



Rys. 6.1. Średnie nasłonecznienie w czerwcu dla szerokości geograficznej 65 N za ostatnie 200 tys. lat i na następne 130 tys. lat; zauważalny jest trend wzrostowy przyszedłych minimów z okresów letniego nasłonecznienia
[źródło: Berger, 1978; Berger, Loutre, 1997]

Obecnie cyrkulacja termohalinowa jednak spowalnia i to dość szybko, bo w tempie wynoszącym 1/3 tempa sprzed stu lat. Zgodnie ze scenariuszem Pentagonu globalne ocieplenie może poprzez spowolnienie prądów morskich zakłócić klimat ziemski, powodując jego ochłodzenie ze wspomnianymi wyżej skutkami (rozd. 4). Jeżeli na taką sytuację nałoży się zmniejszona aktywność plam Słońca jak podczas minimum Maundera (rys. 3.3), to pomimo emisji gazów cieplarnianych może wówczas nastąpić ochłodzenie klimatu nawet większe niż w czasie Małej Epoki Lodowcowej.

7. Wnioski

Analiza powyższych rozważań nasuwa następujące wnioski:

1. Podobieństwo obecnego nasłonecznienia z nasłonecznieniem sprzed 400 tys. lat nie daje pewności przeskoczenia cyklu precesyjnego i utrzymania się okresu ciepłego.
2. Zmiana aktywności Słońca może mieć duży wpływ na zmianę klimatu Ziemi na skutek potencjalnie dużej współzależności temperatury przy powierzchni Ziemi i natężenia plam słonecznych.
3. Niepokojące są możliwości zatrzymania lub przyhamowania cyrkulacji termohalinowej, co ma wpływ na ochłodzenie w obszarach o wysokich szerokościach geograficznych, zaś ocieplenie w obszarach równikowych. Możliwa jest stosunkowo duża gwałtowność tego procesu, co przypuszczalnie spowodowałoby pogorszenie się warunków życia na Ziemi.
4. W przypadku dalszego spowolnienia prądów morskich i zmniejszonej aktywności Słońca możliwe jest duże ochłodzenie klimatu nawet w obecnej słabej fazie cyklicznych ruchów Ziemi.

PIŚMIENNICTWO

1. Adamczewski Z.: Efekt stroboskopowy w obrotach ciał niebieskich i kataklizmach sejsmicznych. „Przegląd Geodezyjny” 1991, nr 2/91.
2. Adamczewski Z.: Technologia określania dni sejsmicznych. „Przegląd Geodezyjny” 2002, nr 9/02.
3. Berger A.: Long-term variations of daily insolation and quaternary climatic changes. „J. Atmos. Sci.” 1978, 35(12), s. 2362–2367.
4. Berger A. and Loutre M.F.: Long-term variations in insolation and their effects on climate, the LLN experiments. „Surveys in Geophysics” 1997, vol. 18, nr 2, s. 147–161.
5. Berner R.A.: A different look at biogeochemistry. „American Journal of Science” 2005, vol. 305 (June/September/October), s. 872–873.
6. Berner R.A., Kothavala Z.: GEOCARB III: Revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time. „American Journal of Science”, vol. 301 (February), s. 182–204.

7. Budyko M.I.: *Klimat i życie*. PWN, Warszawa 1975.
8. Carter R. M.: Knock, Knock, Where is the Evidence for Dangerous Human-Caused Global Warming? „*Economic Analysis & Policy*” 2008, vol. 38, nr 2, s. 177–202.
9. Feluch W.: Wielkoskalowe zagrożenia naturalne. „*Polski Przegląd Medycyny Lotniczej*” 2009, nr 1, t. 15, s. 61–81.
10. Feluch W., Kozieł S.R.: Oczekiwany czas powtarzalności zdarzeń ekstremalnych w warunkach zmiany klimatu. „*Zeszyty Naukowe SGSP*” 2007, nr 35, s. 63–72.
11. Feluch W., Kozieł S.R.: Skrócenie średniego okresu powtarzalności zdarzeń ekstremalnych w warunkach zmiany klimatu jako element zagrożenia. I Międzynarodowa Konferencja Naukowa nt. Wyzwania bezpieczeństwa cywilnego XXI wieku – inżynieria działań w obszarach nauki, dydaktyki i praktyki. Uzupełnienie. Warszawa 2007, s. 31–40.
12. Gray, L. J., et. al.: Solar influences on climate. „*Rev. Geophys.*” 2010, 48, RG4001, doi:10.1029/2009RG000282.
13. IPCC, Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/contents.html Dostęp 15.03.2010.
14. Labitzke K., van Loon H.: Some recent studies of probable connections between solar and atmospheric variability. „*Annales of Geophysicae*” 1993, vol. 11, nr 11/12, s. 1084–1094.
15. Lean J.L., White O.R., Skumanich A.: On the solar ultraviolet spectral irradiance during the Maunder Minimum. „*Global Biogeochemical Cycles*” 1995, vol. 9, nr 2, s. 171–182.
16. Lee J.: Milankovitch cycles. http://www.eoearth.org/article/Milankovitch_cycles Dostęp 10.06.2010.
17. Lityński J.: Dwutlenek węgla a zmiany klimatu. „*Przegląd Geofizyczny*” 2006, z. 1, s. 5–23.
18. Milankovitch M. 1941: *Canon of Insolation and the Ice-Age Problem*. Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem (1969).
19. Monckton C.: Climate sensitivity reconsidered. „*Physics and Society*” 2008, 37, nr 3, s. 6–19.
20. Muller R. A., MacDonald G. J.: Glacial cycles and orbital inclination. „*Nature*” 1995, vol. 377, s. 107–108.

21. Muller R. A., MacDonald G. J.: Origin of the 100-kyr Glacial Cycle: eccentricity or orbital inclination? <http://muller.lbl.gov/papers/nature.html>
22. Muller, R. A., G. J. MacDonald: Spectrum of 100-kyr Glacial Cycle: Orbital inclination, not eccentricity. „Proc. Natl. Acad. Sci” 1997, nr 94, s. 8329–8334.
23. Rahmstorf S.: Ocean circulation and climate during the past 120000 years. „Nature” 2002, 419: 207–214.
24. Raynaud D., Barnola J.-M., Souchez R., Lorrain R., Petit J.-R., Duval P., and V. Y. Lipenkov.: The record for marine isotopic stage 11. „Nature” 2005, 436: 39–40.
25. Reid G.C.: Solar variability and its implications for the human environment. „J. Atmos. Sol. Terr. Phys” 1999, nr 61, s. 3–14.
26. Schwartz P., Randall D.: An Abrupt Climate Change Scenario and Its Implications for United States National Security. October 2003 www.edf.org/documents/3566_AbruptClimateChange.pdf Dostęp 15.02.2010.
27. Solanki S.K., Usoskin I.G., Kromer B., Schüssler M. and Beer J.: Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11000 years. „Nature” 2004, vol. 431, nr 7012, s. 1084–1087.
28. Wibig T.: Promieniowanie kosmiczne a klimat na Ziemi. www.u.lodz.pl/~wibig/maze/fizyka/for/pogo.htm, s. 1–5.
29. Viereck R., 2001: The Sun-Climate Connection (Did Sunspots Sink the Titanic?). NOAA Space Environment Center. www.oar.noaa.gov/spotlite/archive/spot_sunclimate.html Dostęp 15.09.2010.

SUMMARY

dr hab. Wojciech FELUCH, prof. SGSP

CYCLIC REASONS OF ABRUPT CLIMATE CHANGE HAZARD

Based on Milankovitch theory, the cyclicity of the Earth movements is analysed in this paper – precession, changes of the obliquity and eccentricity in relation of the periodic climate warming or cooling. A not included, in the Milankovitch theory, impact of changes in Earth’s orbit inclination and

nutation on climate changes have been mentioned. The impact of cyclical solar activity on climate variability is discussed. The Pentagon Report raised causes and consequences of potential risks arising from change of the thermohaline circulation are presented. Final discussion and conclusions indicate the need for a balanced assessment of risks due to climate abrupt changes.