

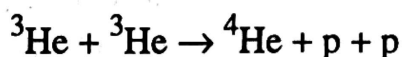
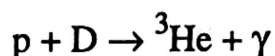
JÓZEF KOCON

Czynniki wpływające na temperaturę atmosfery i Ziemi*

Factors Affecting the Temperature of the Atmosphere and of the Earth

Wstęp

Klimat Ziemi można rozpatrywać w różnych przedziałach czasowych: długo i krótkoterminowych. Niewątpliwie większy wpływ działalności człowieka na temperaturę atmosfery uwidoczni się w przedziałach krótkoterminowych. Człowiek nie ma wpływu na energetyczną aktywność Słońca, nie ma wpływu na dynamikę ruchu obrotowego Ziemi wokół własnej osi, jak też nie ma wpływu na dynamikę i geometrię ruchu obrotowego Ziemi wokół Słońca. Wymienione czynniki miały i mają decydujący wpływ na temperaturę Ziemi i atmosfery i pod ich wpływem energetycznym powstało i kontynuowane jest najbardziej złożone i fascynujące zjawisko w przyrodzie jakim jest życie. Mechanizm produkcji energii przez Słońce oparty jest na syntezie jądrowej. Tak więc synteza jądrowa w ostatecznym rozrachunku jest najważniejszym zjawiskiem w przyrodzie, ponieważ dostarcza energii dla wszystkich naturalnych procesów fizycznych i biologicznych. Wszystkie inne rodzaje energii są tylko przekształconą formą energii jądrowej. Można wykazać, że jeśli masa początkowa będzie większa niż 0,08 masy Słońca, to osiągnięta temperatura (4,3) będzie dostatecznie wysoka, aby wywołać następujące reakcje termojądrowe



gdzie:

p — proton, D — deuter, e^+ — pozytron, ν — neutrino, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$ — jądra helu, γ — kwant promieniowania

* Referat wygłoszony na sympozjum pt. "Ekosystemy leśne w obliczu globalnych zmian klimatu", Białowieża, grudzień 1993 r.

Ten cykl reakcji termojądrowych nazywa się cyklem protonowym. Taki proces powstaje również we wszystkich gwiazdach bogatych w wodór. W wyniku cyklu protonowego 4 protony są używane do wytworzenia cząstki α , 2 pozytronów, 2 neutrin i 2 fotonów o całkowitej energii około 26 Mev.

Okolo dwumiliardowych części tej energii dochodzi do Ziemi. Masa Słońca wynosi $2 \cdot 10^{30}$ kg i wypromieniowuje moc $4 \cdot 10^{23}$ kW. Energia wytwarzana przy przemianie wodoru w hel stanowi 0,7% masy spoczynkowej paliwa czyli $E = (7 \times 10^{-3}) mc^2 = 1,3 \cdot 10^{45}$ J. Wobec

tego czas promieniowania Słońca i ogrzewania Ziemi wynosi $t = \frac{E}{N} = \frac{1,3 \cdot 10^{45}}{4 \cdot 10^{26}} = 10^{11}$ lat,

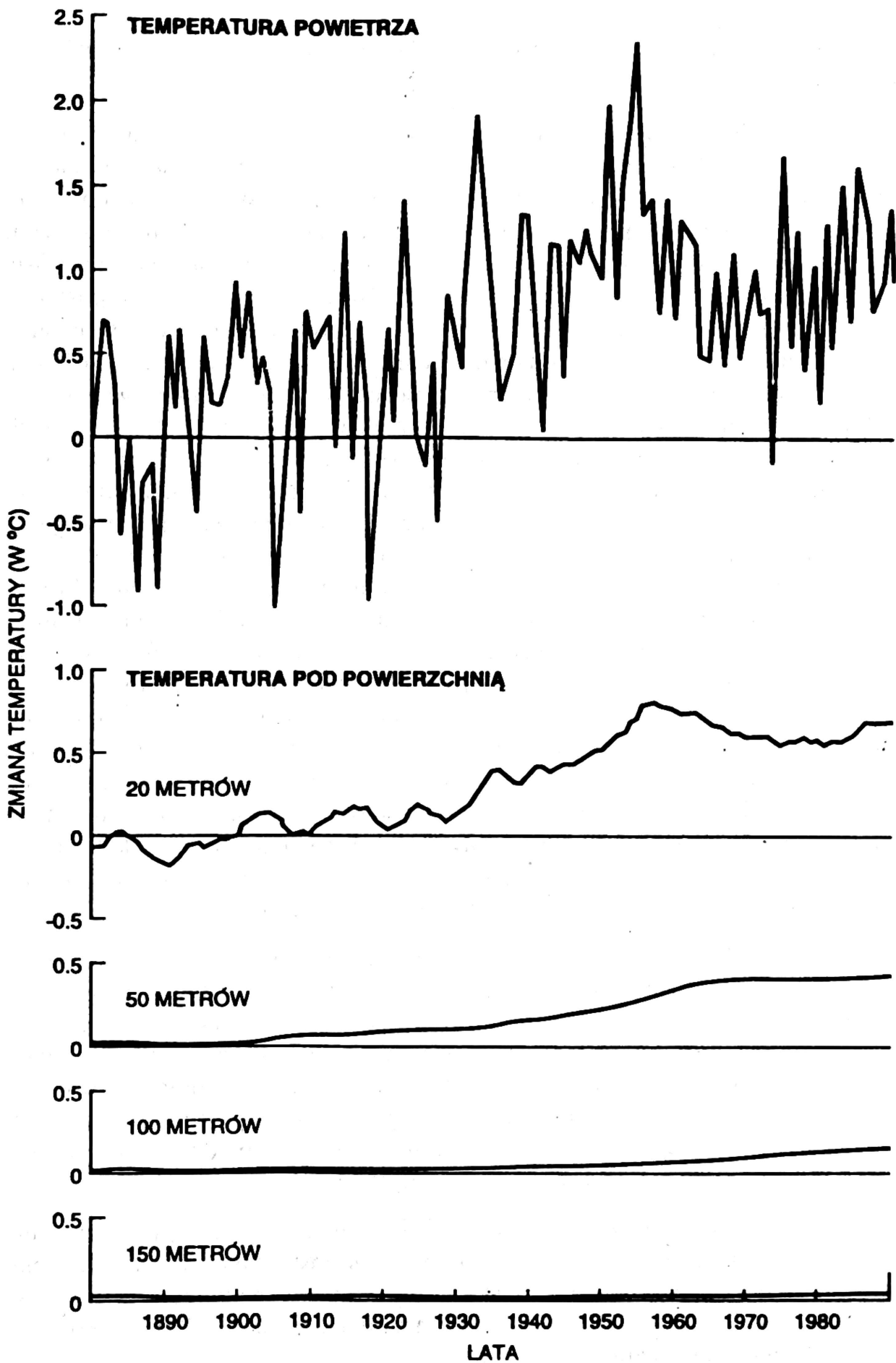
to jest sto miliardów lat.

Aktywność energetyczna Słońca zmienia się w pewnych niewielkich granicach co jednak ma wpływ na temperaturę atmosfery.

Orbita Ziemi ulega ciągłym zmianom, stając się mniej lub bardziej eliptyczna w cyklach czasowych liczących do 100 000 lat. Wahania odległości między Ziemią a Słońcem mogą dochodzić do 18 000 000 km co pociąga za sobą poważne zmiany natężenia promieniowania słonecznego dochodzącego do poszczególnych półkul w każdej porze roku. Ziemia obraca się wokół własnej osi w cyklu dobowym. Oś obrotu ulega precesji bardzo wolno, dając w rezultacie tak zwaną precesję zrównań dnia z nocą. Kiedy Ziemia formowała się, wzdłuż równika została nagromadzona większa masa niż na biegunach, z powodu siły odśrodkowej. Księżyc i — w pewnym stopniu — Słońce wywierają nierówne siły na przeciwległe części Ziemi. Wypadkowy moment siły grawitacji działającej na planety sferyczne jest równy zeru, a zatem wypadkowy moment siły działającej na Ziemię jest wyłącznie rezultatem nierównych sił działających na równikową wypukłość. Ponieważ moment siły jest mały, precesja jest bardzo powolna — pełny jej cykl wynosi 25 800 lat.

Oś nachylenia Ziemi względem pionu wynosi 23,50, i to nachylenie jest również czynnikiem wpływającym w wymienionym cyklu precesji na temperaturę atmosfery. Jedenaście tysięcy lat temu, gdy lauretańska pokrywa lodowa gwałtownie cofnęła się, planeta przybrała takie położenie, w którym półkula północna latem znajdowała się najbliżej Słońca, zimą zaś najdalej. Afelium — czyli dzień, w którym planeta znajduje się w największej odległości od Słońca następowało w styczniu. Dziś sytuacja się odwróciła, w związku z tym lata na półkuli północnej bywają zimne.

Nakładające się na siebie cykle odchylenia orbity, nachylenie osi precesji są przyczyną znacznego rozkładu ciepła i temperatury na Ziemi. Zestawiając na wykresach łączne efekty tych cykli Milankowicz ustalił, ile promieniowania słonecznego przypada na poszczególne szerokości geograficzne w danych przedziałach czasowych. Później porównano te obliczenia z danymi z poszczególnych epok lodowcowych. Nie wynikała z nich zgodność idealna ale były na tyle poprawne, że przedstawiona teoria zyskała na wiarygodności. Obecnie energia promieniowania słonecznego w ciągu roku wynosi $1,56 \cdot 10^{18}$ kWh, a energia wiatru $13 \cdot 10^{15}$ kWh, odparowanie wody wynosi $460 \cdot 10^{12}$ kWh. Fotosynteza roślin wymaga energii $250 \cdot 10^{12}$ kWh. Energia promieniowania widzialnego i podczerwonego odbitego od Księżyca wynosi $30 \cdot 10^{12}$ kWh. Energia prądów morskich oraz przyptyków i odpływów jest równa $26 \cdot 10^{12}$ kWh. Ciało ludzkie w skali świata dostarcza $7 \cdot 10^9$ kWh.



RYC. 1. Najnowsza historia klimatu. Można ją prześledzić zarówno w zapisie meteorologicznym (wykres górny), jak i w rozkładzie temperatur na niższej głębokości pod powierzchnią ziemi (wykres dolny). Wykresy przedstawiają zmiany temperatury powierzchni w Nowej Anglii w ostatnim stuleciu oraz obserwowane pod powierzchnią odchylenia od średniej, powstające wskutek rozchodzenia się w głąb zmian powierzchniowych

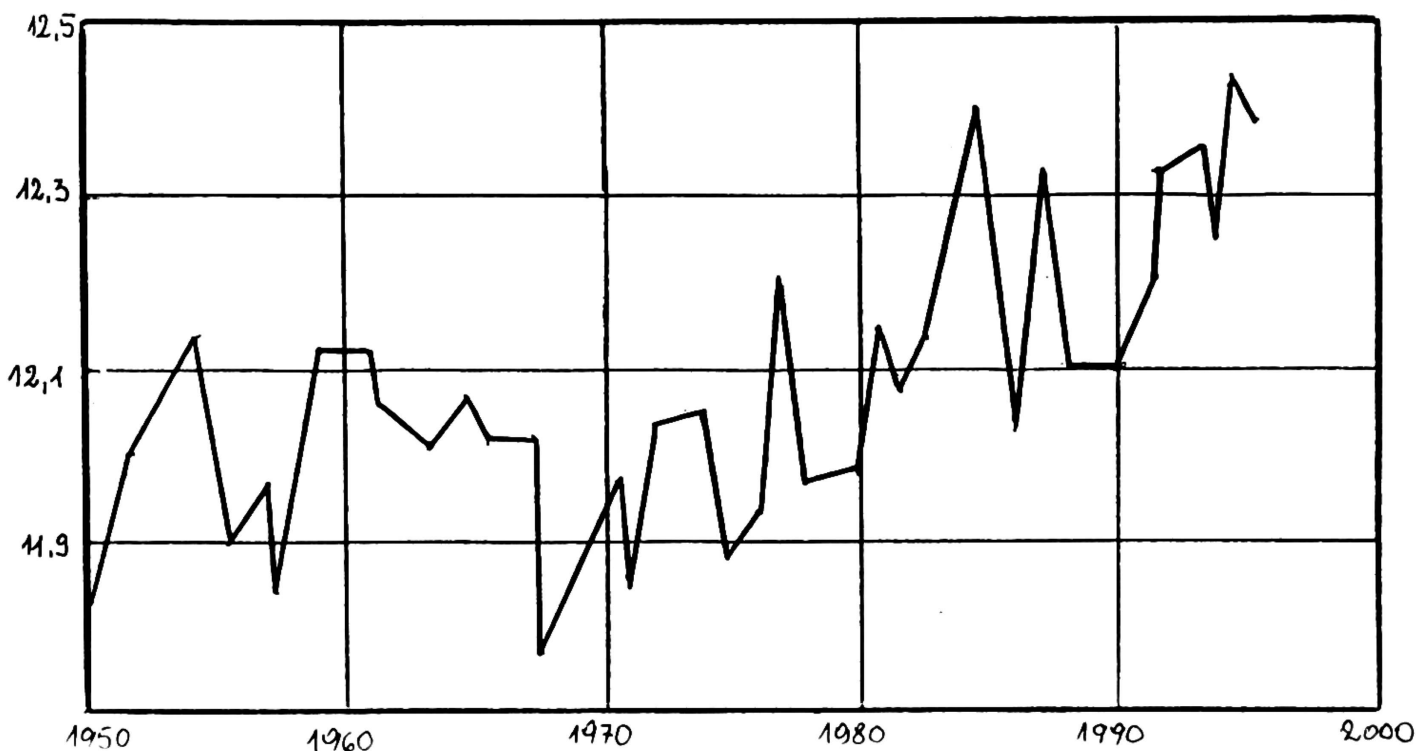
Ludzkość w skali świata zużywa $82 \cdot 10^{12}$ kWh wytwarzanej energii, z czego $10 \cdot 10^{12}$ kWh jest zużywana do napędzania silników elektrycznych.

Czy klimat obecnie staje się cieplejszy? Są dowody, że tak, są też sugestie, że nie. Według zapisów meteorologicznych i stratygraficznych — ryc. 1 (5), a nawet dendroklimatycznych, średnia temperatura atmosfery wzrosła w ciągu minionego stulecia o nieco ponad $0,5^{\circ}\text{C}$. Zawartość gazów cieplarnianych w tym samym czasie również wzrosła, o czym świadczą zachowane próbki powietrza z przeszłości. Zawartość dwutlenku węgla wzrosła o 20% (6) a ilość metanu prawie się podwoiła, wzrosła również ilość ozonu w troposferze. Ta zbieżność wskazuje, że to właśnie te gazy cieplarniane (szklarniowe) są odpowiedzialne za wzrost temperatury atmosfery. Nie jest to tak zupełnie oczywiste, zbieżność ta może być przypadkowa na dłuższą metę, obie zmienne mogą nic ze sobą nie mieć wspólnego. Klimatolodzy muszą ten problem rozwiązać. Należy poddać analizie bardzo dużo danych zarówno wynikających z ogólnych praw rządzących aktywnością Słońca, dynamiką ruchu Ziemi wokół własnej osi jak dynamiką ruchu planety wokół Słońca, dynamiką aktywności warstwy "D" znajdującej się na głębokości 2900 km pod powierzchnią Ziemi na styku jądra zewnętrznego i płaszcza wewnętrznego jak i danych wynikających z działalności człowieka ze szczególnym uwzględnieniem zawartości CO_2 w atmosferze. Niektóre dane do rozstrzygnięcia tego problemu są bardzo trudne do uzyskania, zaś inne przynajmniej częściowe łatwe. Łatwo jest zmierzyć wzrost zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze. Lodowce zawierają próbki powietrza z przeszłości a zawartość w nich gazów cieplarnianych jest łatwa do określenia. Natomiast zapis temperatury stanowi o wiele trudniejszy problem. Dane meteorologiczne, jako dane najpewniejsze sięgają nie dalej jak 150 lat wstecz. Na półkuli południowej meteorologiczny zapis temperatury rozpoczął się o kilkadziesiąt lat później — dopiero w bieżącym stuleciu. Jeszcze późniejsze zapisy temperatury obejmują regiony okołobiegunowe. Istnieje pewne archiwum zapisu temperatury w skałach pod powierzchnią ziemi, ale jego interpretacja jest trudna, a uzyskiwanie danych kosztowne (wiercenia). Ciepło przewodzenia jest dzięki gradientowi temperatury.

Przeprowadzając jednak interpolację gradientu tego strumienia, można określić temperaturę powierzchni Ziemi w różnych okresach minionych. Najpewniejszą temperaturę otrzymalibyśmy układając i rozwiązując przy pewnych warunkach brzegowych, układ równań różniczkowych dla tych dwóch przeciwnie skierowanych strumieni ciepła. Przeanalizujemy jednak dokładniej zmiany średniej temperatury atmosfery (powietrza) i zmiany zawartości CO_2 w atmosferze (ryc. 1, 2). Na wykresie pierwszym (ryc. 2) mamy przedstawiony wzrost średniej temperatury na Ziemi, a na wykresie drugim (ryc. 3) przedstawiono wzrost zawartości CO_2 w atmosferze w okresie od 1950 r. do 1993 r.

Należy przyjąć, że zawartość CO_2 w atmosferze Ziemi jest mniej więcej równomiernie rozmieszczona ze względu na intensywne mieszanie się atmosfery powodowane ruchami części i całej atmosfery. Średnia zmiana temperatury wykazuje powolny wzrost, ale są liczące się okresy, kiedy średnia temperatura spada, natomiast zawartość CO_2 w atmosferze wzrasta w sposób ciągły ale nie proporcjonalny.

I tak, temperatura w 1960 r. wynosiła $12,2^{\circ}\text{C}$ a zawartość CO_2 315 ppm (315 cząsteczek CO_2 na milion), temperatura w 1990 r. była nawet nieco niższa niż w 1960 r. i wynosiła $12,1^{\circ}\text{C}$. W tym czasie ilość CO_2 wzrosła z 315 ppm do prawie 350 ppm. A więc zdecydowanie większej zawartości CO_2 w atmosferze odpowiadał średni wzrost temperatury. W



RYC. 2. Eko-kardiogram Ziemi . Wzrost średniej temperatury na Ziemi (w °C)

takim razie za wzrost średniej temperatury na Ziemi nie musi być odpowiedzialny tylko wzrost zawartości CO₂ w atmosferze. Na podstawie danych z setek stacji pomiarowych rozmieszczonych na półkuli północnej w krajach byłego ZSRR, w Chinach i krajach Europy (1) wynika, że średnia temperatura na Ziemi w naszym stuleciu wzrosła o 0,5°C.

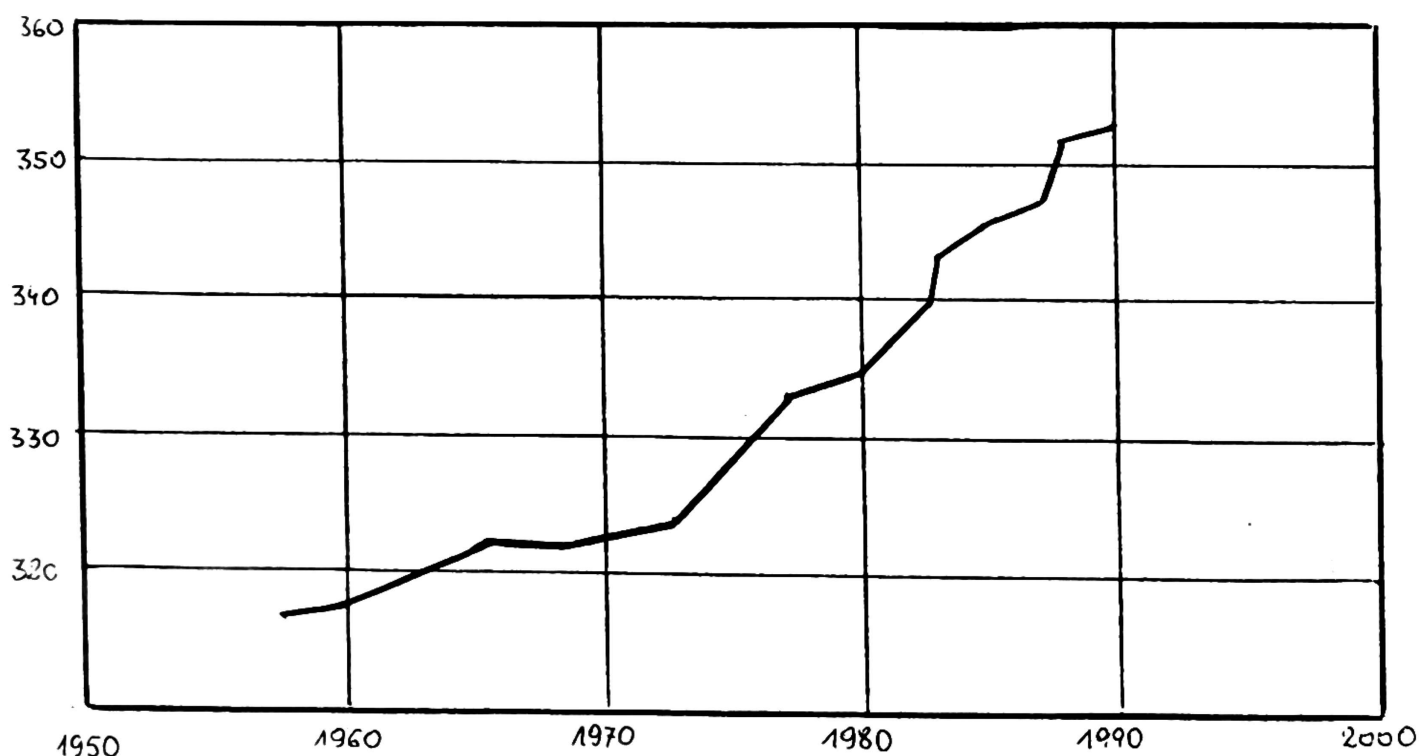
Wiadomo, że średnia temperatura w miastach jest 0,5°C wyższa niż w okolicy. Niektórzy klimatolodzy uważają, że jest to przesunięcie miasta o około 100 km w kierunku niższych szerokości geograficznych. Są jednak również sugestie przeciwne.

Prowadzone ponad 40 lat badania nad dobowym rozkładem temperatury w Stanach Zjednoczonych, w niektórych krajach byłego Związku Radzieckiego i w Chinach sugerują, że naukowcy tracą czas i w pewnym stopniu marnują potencjał intelektualny i materialny.

Ostatnie badania prowadzone przez Thomasa R. Karla z National Climatic Center w Asheville w stanie Karolina Północna wykazują, że na półkuli północnej podnosi się przede wszystkim temperatura nocy. Nocne ocieplenie ma stosunkowo łagodny wpływ na rośliny, nie powoduje nadmiernego odwodnienia, zmniejsza zagrożenie ze strony nocnych przymrozków.

Owy wzrost globalny temperatury od 0,3 do 0,6°C spowodowany jest wzrostem dobowych wartości temperatury w czasie nocy. Noce stają się cieplejsze. Zmiany temperatury w czasie dnia są prawie niezauważalne (w granicach błędu). Patric J. Michales z University of Virginia wykorzystał te informacje przeciwko teorii ocieplenia.

Karl w swoich badaniach wykorzystał dane z 744 stacji pomiarowych obejmujących ponad 40% obszarów lądowych półkuli północnej. Dane z USA sięgają do roku 1901, z WNP do 1936 a z Chin do 1951. Obecne modele klimatyczne efektu cieplarnianego obarczone są poważnymi wadami, nie uwzględniają bowiem różnic pomiędzy ociepleniem w nocy i w



RYC. 3. Koncentracja CO₂ w atmosferze ziemskiej (liczba cząstek na milion)

dzień. Na ocieplenie nocne na półkuli północnej mogą mieć wpływ związki siarki, które dostają się do atmosfery, w czasie spalania kopalnych nośników energii. W dzień aerozole siarki odbijają promienie słoneczne, nie dopuszczając do nagrzewania się powierzchni ziemi i atmosfery. Nocne ocieplenie manifestuje się przede wszystkim na półkuli północnej, na niej też prawie 90% związków siarki dostaje się do atmosfery. Możliwe są również wahania średnich globalnych temperatur w okresach kilkusetletnich. Pomiędzy początkiem XVI a końcem XIX stulecia Europa przeżyła na znacznych obszarach okres ochłodzenia znany jako Mała Epoka Lodowa. W tym czasie lodowce górskie znacznie zwiększyły zasięg, holenderskie kanały zamarzały, niesprzyjająca i zmienna pogoda była w czasie żniw. W grudniu 1992 r., na konferencji Amerykańskiego Związku Geofizycznego (2) naukowcy przedstawili wyniki swych prac dotyczących warunków jakie panowały na Grenlandii i Półwyspie Antarktycznym w czasie Małej Epoki Lodowej. Na podstawie badań rdzeni lodowców nie stwierdzono wyraźnych zmian temperatury w tych miejscach Ziemi. Podobnie jak w przeszłości tak i w przyszłości będą istotne wahania w temperaturze atmosfery w poszczególnych regionach Ziemi. Zmiany klimatu w skali globalnej mogą być różne w zależności od szerokości geograficznej i wysokości nad poziomem morza. Wpływ oceanu dodatkowo komplikuje sprawę: Glen T. Shen z University of Washington na podstawie badań koralu z Pacyfiku stwierdził, że wody wschodniego Pacyfiku były cieplejsze w okresie Małej Epoki Lodowej niż obecnie.

Wykorzystując dane dendroklimatyczne w okresie Małej Epoki Lodowej można wnioskować, że nie wszystkie lata były jednakowo zimne. Podobnie jak obecnie nie wszystkie lata są jednakowo ciepłe.

Po zakończeniu Małej Epoki Lodowej pod koniec XIX wieku rozpoczął się okres powolnego ocieplenia, kiedy zawartość CO₂ i innych gazów cieplarnianych była znacznie niższa

niż obecnie. Proces ocieplenia trwa nadal i prawdopodobnie trwałby nadal gdyby zawartość tych gazów w atmosferze była stała, może tylko tempo wzrostu temperatury byłoby nieco mniejsze.

Wybuchy wulkanów też mogą mieć wpływ na temperaturę atmosfery, 80% wybuchów wulkanów, to wybuchy pod wodą, których energetyki jeszcze zupełnie nie znamy.

Na kształtowanie się klimatu w poszczególnych regionach Ziemi może mieć wpływ dynamika warstwy "D" w wyniku której powstają potężne prądy konwekcyjne przesuujące lądy i płyty litosferyczne doprowadzając również do erupcji wulkanów.

Analizując czynniki, które wynikają z geometrii ruchu Ziemi wokół swojej osi jak i ruchu wokół Słońca, jak i czynniki wynikające z działalności człowieka można stwierdzić, że w najbliższej przyszłości a tym bardziej w dalekiej przyszłości nie grozi nam przegrzanie Ziemi i jej atmosfery.

Stwórca budując Układ Słoneczny i nadając mu odpowiednie parametry korzystał z zaawansowanej matematyki i fizyki i zapewne nie dopuści do przegrzania Ziemi w dającej się przewidzieć przyszłości. Wydaje się jednak, że ilość CO₂ w atmosferze będzie wzrastać jeszcze przez 25–30 lat ale prawdopodobnie nie przekroczy 400 ppm. W ciągu 30 lat ludzkość opanuje "czystą" produkcję energii w postaci energii słonecznej (ogniwa słoneczne), energii atomowej (energetyczne reaktory atomowe) a przede wszystkim opanuje syntezę jądrową (energetyczne reaktory termojądrowe). W związku z tym poważniejszym problemem niż efekt cieplarniany, może być problem wzrostu roślin a przede wszystkim roślin drzewiastych w atmosferze bogatej w CO₂. Rośliny drzewiaste (drzewa) są roślinami dzikimi a jako takie charakteryzują się małą zmiennością genetyczną. Rośliny dzikie mogą adaptować się nieznacznie do bardzo powoli zmieniających się warunków zewnętrznych, lub same mogą nieznacznie zmieniać środowisko w długich przedziałach czasowych.

Buki i świerki w Polsce dobrze rosną zarówno nad morzem jak i w górach (np. Beskid Żywiecki) gdzie różnice temperatur wynoszą kilka stopni. Ta adaptacja trwała jednak tysiące i miliony lat. Ilość CO₂ oraz zanieczyszczeń gazowych w atmosferze nagle wzrosła i to przekracza możliwości adaptacyjne tych drzew i innych roślin dzikich.

Iloczyn prawdopodobieństwa mutacji i prawdopodobieństwa zmienności organizmów jest wielkością stałą.

Jeśli chcemy mieć piękne lasy przypominające dawne puszcze i knieje, to nie możemy tworzyć transgenicznych sosen, świerków, jodeł, modrzewi, buków i dębów, tylko musimy dbać o takie siedlisko i taki skład atmosfery i jej czystość do jakiej się te drzewa adaptowały, bo to w pewnym stopniu zagwarantuje nasze warunki życia. Dzisiaj można już otrzymać transgeniczne rośliny w tym również rośliny drzewiaste, nie można jednak poprawić dzieła Stwórcy i tworzyć transgenicznego *Homo sapiens*.

Rośliny w atmosferze o podwyższonej ilości CO₂

Wydawało się, że rośliny rosnące w atmosferze o podwyższonej ilości CO₂ będą szybciej rosnać, szczególnie jeśli dostarczy się im odpowiednią ilość wody i środków pokarmowych. Pobudzanie roślin większym stężeniem CO₂ nazwano "efektem użyźniania dwutlenkiem

węgla". Przy większej wydajności fotosyntezy większa ilość węgla znajdującego się w CO₂ zostanie związana, co obniżyć będzie jego stężenie w atmosferze.

Badania jednak wykazały, że pozytywne reakcje pojedynczej rośliny na podwyższenie stężenia dwutlenku węgla niekoniecznie oznaczają szybszy wzrost wszystkich roślin w danej biocenozie. Korzyści wynikające z wysokiego stężenia CO₂ mają swe źródło w szczegółach fotosyntezy. Dwutlenek węgla wchodzi do wnętrza liści przez aparaty szparkowe, których mechanizm otwierania i zamykania jest skorelowany ze stężeniem CO₂ w atmosferze. Przy większym stężeniu CO₂ w atmosferze aparaty szparkowe ledwie się uchylają i przez to zmniejsza się transpiracja. Przy normalnym stężeniu CO₂ roślina na pobranie jednej cząsteczki CO₂ wydziela do atmosfery od 100 do 400 cząsteczek wody. Środowisko bogate w CO₂ zmniejsza też straty energetyczne związane z fotooddychaniem. Korzyści te występują tylko w przypadku roślin C₃.

Rośliny C₄ w procesie ewolucji wykształciły specjalną pompę chemiczną, która zwiększa stężenie CO₂ w okolicy i w samych chloroplastach. Nagłe zwiększenie stężenia CO₂ w atmosferze wpływa niekorzystnie na ich rozwój i konkurencyjność z roślinami C₃.

Gwałtowne zmniejszenie transpiracji w roślinach C₃ może spowodować przerwanie ciągłości przepływu wody od korzeni do liści, co może mieć tragiczne następstwa dla ekosystemów leśnych. Woda z solami mineralnymi wznosi się w drzewach na zasadzie sił spójności i przy określonej transpiracji. W każdym bądź razie lasy jako rośliny C₃ są w korzystniejszej sytuacji niż rośliny C₄ w środowisku bogatym w CO₂.

Badania lasów pozwoliły zidentyfikować inny czynnik wyznaczający zdrowotność przyszłych ekosystemów leśnych a mianowicie współzawodnictwo. Nawet przy dostatecznym dopływie światła i składników pokarmowych czynnik współzawodnictwa zmniejsza podatność drzew jako roślin C₃ na efekt użyźniania dwutlenkiem węgla. Mówiąc prosto — drzewa rosnące (szczególnie w młodym wieku) pojedynczo pozytywnie reagują na większe stężenie CO₂ w atmosferze, ale brak jest tej pozytywnej reakcji w drzewach rosnących w zwarciu.

Zmianie ulegną też proporcje między materiałem roślinnym obumieranych roślin lub ich części (liście, gałęzie, korzenie) a ilością mikroorganizmów w glebie. Materiał takich roślin zawiera mniej azotu a więcej węgla (1). Taki materiał będzie ulegał powolniejszemu rozkładowi, co może hamować rozwój grzybów i bakterii glebowych. W efekcie nastąpi zmniejszenie żyzności gleby. Prawdopodobnie wzrost stężenia dwutlenku węgla i innych gazów cieplarnianych w atmosferze będzie w większym stopniu zmieniał ekosystemy leśne i rolnicze przez zmianę dynamiki procesów fizjologicznych i biochemicznych niż przez efekt cieplarniany.

*Z Katedry Fizyki
SGGW Warszawa*

Literatura

1. **Fakhri A., Bazzaz, E.D. Fajer.** Świat Nauki, Marzec 1992
2. **Beardsley T.** Świat Nauki, Kwiecień 1992

3. **Eisberg R., Resnick R.** Quantum Physics of Atoms PWN, Warszawa 1985
4. **Orear J.** Fizyka 1990
5. **Pollack H.W., Champan D.S.** Podziemny zapis zmian klimatu. Świat Nauki, Sierpień 1993
6. Raport o stanie świata 1984–1993

Summary

There are many convincing data that the Earth's climate is warming up. According to meteorological records and to distribution of temperature at various depths under Earth surface, the temperature of the atmosphere and the Earth's surface increased by a bit over 0.5°C in the past century. The content of the so-called greenhouse gases in the atmosphere grew in that period too, this fact being proven, inter alia, in samples of the air from the past.

The amount of CO_2 has grown by 20%, and that of methane has almost doubled. This coincidence points out, that just the greenhouse gases are responsible for the ongoing warming-up. The coincidence may however be only apparent. The analysis of data as related to temperature, obtained from meteorological records, and the data concerning the CO_2 content in individual years negate this hypothesis. It resulted from the measuring of CO_2 content in the atmosphere made in the Mauna Loa observatory in Hawaii, that a systematic increase occurred from 1957 till the present time, while the temperature dropped in sixties-eighties of this century, that fact being confirmed by ecocardiograms of the atmosphere temperature can be casual and then untrue.

The newest history of the Earth's climate can be described on the basis of both meteorological data and measurements done under Earth's surface. It results from this research that a characteristic several-century-lasting cooling occurred, that started in XV–XVI centuries and ended in the XIXth century.

As it was already mentioned, a slow, uneven in individual years, warming-up lasts since the beginning of our century. It is very likely that this warming-up would proceed in the same way if the CO_2 content in the atmosphere were stable. Factors connected with the activity of the Sun. Earth precession move, dynamics in the "D" stratum on the boundary of external pith and internal coat, as well as with atmospheric conditions and factors resulting from the activity of man influence the temperature of the atmosphere. If mainly greenhouse gases were responsible for the warming-up of the atmosphere, it would be more even. It is no doubt, that the CO_2 content in the atmosphere, being the result of man's activity (burning of mine gases), increase hurriedly (beginning from the fifties of our century), causing biochemical and physiological changes in plants of C_3 type, and especially in those of C_4 type, and that may substantially change the structure of ecosystems.