

# Wpływ aktywności Słońca na klimat Ziemi

Paweł Rudawy

Uniwersytet Wrocławski, Wydział Fizyki i Astronomii, Instytut Astronomiczny

## Człowiek w obliczu zmian klimatu

Choć bezpośrednio, obiektywne pomiary różnych wielkości charakteryzujących chwilowe zmiany stanu atmosfery, hydrosfery oraz powierzchni Ziemi, czyli stan pogody (w krótkich skalach czasowych) i klimatu (w skalach dłuższych) prowadzone są dopiero od około 300 lat (jako cezurę można przyjąć umownie połowę wieku XVII), to wykorzystując nowoczesne techniki pomiaru różnych wskaźników pośrednich, interpretując znaleziska archeologiczne a nawet, niekiedy, korzystając z zachowanych kronik i innych źródeł pisanych można stwierdzić, iż nawet w stosunkowo krótkim okresie rozwoju cywilizacji ludzkiej, klimat na Ziemi zmieniał się wielokrotnie, i to nieraz dość szybko. Występowały zarówno długie okresy ciepłe, sprzyjające rolnictwu czy ekspansji osadnictwa na nowe, wcześniej niedostępne obszary, jak i okresy chłodne, gdy wydajność rolnictwa spadała a w rozwój cywilizacji ulegał spowolnieniu bądź nawet stagnacji.

Ponieważ zmiany klimatu zachodzą w globalnej skali przestrzennej i stosunkowo powoli, więc umykają osobniczej percepcji człowieka, postrzegającego (w skali własnego życia) raczej sezonowe zmiany pogody, odczuwane subiektywnie i zapamiętywane syntetycznie. Bezpośrednie obserwacje zmian klimatu są tym trudniejsze, że krótkookresowe zmiany pogody (np. zmiany średnich temperatur miesięcznych czy ilości dni z pokrywą śnieżną w ciągu roku) znacznie przekraczają pod względem amplitudy wahań powolne zmiany tych samych wskaźników wynikające ze zmian klimatu. Dopiero wiek XX, a szczególnie era lotów satelitarnych, przyniosły gwałtowny rozwój metod obiektywnego, zdalnego i bezpośredniego monitorowania długoterminowych zmian klimatu i pogody w skalach przestrzennych od lokalnej do globalnej.

We wczesnym okresie rozwoju cywilizacji ludzkiej i oczywiście przed nią, klimat na Ziemi kształtowany był wyłącznie przez naturalne procesy geofizyczne i kosmiczne (ten podział jest nieco sztuczny, gdyż Ziemia jest także obiektem kosmicznym). Dominujące procesy geofizyczne, wywołujące zmiany klimatu, to zapewne tektonika płyt i wulkanizm, natomiast najistotniejszymi kosmicznymi czynnikami powodującymi zmiany bilansu energetycznego Ziemi oraz wpływającymi bezpośrednio na zmiany jej klimatu są ewolucyjne i krótkookresowe zmiany mocy promieniowania Słońca (zarówno mocy całkowitej jak i w wybranych przedziałach długości fal), okresowe i nieokresowe zmiany poziomu aktywności magnetycznej Słońca (powodujące istotną modyfikację stanu przestrzeni międzyplanetarnej (heliosfery) oraz magnetosfery i atmosfery Ziemi)

oraz, prawdopodobnie, okresowe zmiany kształtu orbity Ziemi i orientacji w przestrzeni jej osi obrotu. Powyższa lista czynników geofizycznych i kosmicznych z pewnością nie jest kompletna, a względny wpływ poszczególnych jej składników nie jest precyzyjnie określony.

Nie ulega wątpliwości, że klimat na Ziemi będzie się zmieniał także w przyszłości, czego symptomy bezpośrednio obserwujemy. Dlatego niezwykle istotnym i pilnym zadaniem jest wskazanie i porównanie najważniejszych czynników i procesów naturalnych i sztucznych, wpływających na chwilowy stan klimatu oraz na jego zmiany, w tym zbadanie i określenie udziału czynników antropogenicznych (działalność przemysłowa, rolnicza, aktywność społeczna człowieka itd.). Prawidłowe ocenienie roli czynników antropogenicznych w obserwowanych zmianach klimatu oraz ewentualne znalezienie możliwości przeciwdziałania tym zmianom ma fundamentalne znaczenie dla wyboru strategii gospodarowania oraz rozwoju niezbędnych technologii (w tym sposobów pozyskiwania energii oraz szeroko rozumianej polityki energetycznej), a nawet dla kluczowych decyzji politycznych.

### **Zmiany ewolucyjne Słońca i zmiany jego aktywności magnetycznej a klimat Ziemi**

Słońce jest stosunkowo niewielką i niezbyt gorącą gwiazdą należącą do tak zwanego ciągu głównego (wykresu Hertzsprunga-Russella), a więc jego budowa i stan zaawansowania ewolucyjnego są podobne do budowy znakomitej większości gwiazd w naszej i innych galaktykach. Średnica fotosfery (powierzchni widocznej w świetle widzialnym) wynosi 1 392 000 km, temperatura efektywna powierzchni wynosi około 5 780 K, a typ widmowy Słońca to G2V (czyli jest to karłowata żółta gwiazda). Moc promieniowania Słońca wynosi  $L_s = 3,827 \times 10^{26}$  W. Choć, jak przed chwilą stwierdziliśmy, jest to gwiazda karłowata, to i tak moc promieniowania Słońca jest większa niż moc promieniowania 85% gwiazd w Galaktyce (zawierającej około 200 miliardów gwiazd i zapewne kilka miliardów układów planetarnych).

Cała energia emitowana przez Słońce powstaje wyłącznie w reakcjach termojądrowych syntezy helu z wodoru, zachodzących w jądrze obejmującym zaledwie około 0.25 promienia gwiazdy, czyli 1.6% jej objętości. Tak małe, w stosunku do całej gwiazdy, jądro zawiera aż połowę jej masy ( $M_s = 1.99 \times 10^{30}$  kg), temperatura plazmy sięga tam  $T_c = 15.7$  mln K a gęstość plazmy  $\rho_c = 153\,000$  kg/m<sup>3</sup>, czyli gęstość plazmy w jądrze Słońca jest ponad 13 razy większa od gęstości ołowiu! W ciągu każdej sekundy w jądrze Słońca około 600 000 000 ton wodoru przekształcane jest w hel, przy tym 4 260 000 ton masy przekształcane jest w energię. Tak więc, Słońce świecąc, staje się mniej masywne. Dodatkowo, co sekundę Słońce traci około 1 000 000 ton materii poprzez wypływ z korony (atmosfery) w przestrzeń międzyplanetarną plazmy w postaci zarówno wiatru

słonecznego jak i koronalnych wyrzutów plazmy. Jednakże ubytek masy spowodowany emisją promieniowania i wiatrem słonecznym, choć kolosalny w ludzkiej skali, nie ma istotnego znaczenia dla ewolucji naszej gwiazdy (jest to zaledwie  $2.6 \times 10^{-21} M_{\odot}/s$ ).

Nieustannie, poczynając od momentu uformowania się jako gwiazda, aż do teraz, czyli przez około 4.6 mld lat, w jądrze Słońca stopniowo zużywany jest wodór w wyniku reakcji termonuklearnych. Zmienia się przez to skład chemiczny i temperatura plazmy oraz powoli wzrasta strumień wydzielanej energii, co powoduje powolną przebudowę całej gwiazdy, wzrost jej promienia i mocy promieniowania. W stosunku do mocy promieniowania tuż po uformowaniu się jako gwiazdy, moc promieniowania Słońca wzrosła już o około 25%. Równoległe przebiegające procesy przebudowy atmosfery i skorupy ziemskiej (tektonika płyt i aktywność wulkaniczna) oraz zmiana wysoce cieplarnianej atmosfery beztlenowej na obecną atmosferę tlenową, efektywnie stabilizowały klimat na Ziemi przynajmniej w takich granicach, iż zawsze występowała na niej woda w stanie ciekłym i możliwy był rozwój organizmów biologicznych. Według ostrożnych ocen, co najmniej jeszcze przez 1-1.5 miliarda lat na Ziemi panować będą warunki umożliwiające istnienie życia. W dalszej przyszłości stale rosnąca moc promieniowania Słońca doprowadzi zapewne do stopniowego odparowania całej ciekłej wody, a więc i do zagłady życia.

Słońce nie rotuje jak ciało sztywne, lecz prędkość ruchów makroskopowych plazmy we wnętrzu Słońca zależy od szerokości heliograficznej i głębokości pod jego powierzchnią. W warstwie konwektywnej Słońca, rozciągającej się od powierzchni do głębokości ok. 200 000 km (do tzw. tachokliny) oprócz ruchów konwekcyjnych plazmy (stąd nazwa warstwy), przenoszących energię z wnętrza Słońca ku jego powierzchni, występuje także rotacja różnicowa plazmy (z nakładającymi się drobnymi ruchami torsyjnymi) oraz globalna cyrkulacja południkowa. Rotacja różnicowa to zmiany prędkości kątowej (i oczywiście liniowej) krążenia plazmy wokół osi Słońca w zależności od jej szerokości heliograficznej (odległości od równika, symetrycznie na obu półkulach) i głębokości. Można więc wyobrazić sobie warstwę konwektywną Słońca jako złożoną z równoleżnikowych pierścieni plazmy, krążących wokół osi Słońca z różnymi prędkościami, przy czym w pobliżu równika syderyczny (rzeczywisty) okres obiegu plazmy na powierzchni Słońca wynosi tylko około 25 dni, a w pobliżu biegunów aż 34 dni. Przepływ południkowy to natomiast powolne krążenie plazmy pomiędzy obszarem okołorównikowym a okołobiegunowym, przy czym w warstwie podpowierzchniowej plazma przepływa ku okolicom okołobiegunowym (w ciągu około 11 lat, poruszając się z prędkością rzędu 10-20 m/s), a w warstwie głębokiej, nad tachokliną, powraca ku równikowi.

Ponieważ plazma słoneczna jest niezwykle dobrym przewodnikiem, słoneczne pole magnetyczne i plazma są „zmrożone”, co oznacza, że jeżeli energia plazmy

jest większa niż energia pola, to plazma modyfikuje pole (jego topologię i natężenie) a w przeciwnym wypadku to pole modyfikuje topologię plazmy. Dlatego u podstawy warstwy konwektywnej (w pobliżu tachokliny), gdzie plazma jest bardzo gęsta i krąży z dużą energią, działa bardzo wydajny mechanizm rekonfiguracji i wzmacniania pola magnetycznego, zwany dynamem słonecznym. Dynamo cyklicznie najpierw przekształca względnie słabe pole poloidalne (globalne pole dwu-biegunowe) Słońca w bardzo silne pole toroidalne (rozciągające się niemal równoległe do równika) kosztem energii kinetycznej ruchu plazmy, a następnie, z zachowanych resztek przekształconego pola toroidalnego, odbudowuje pole poloidalne, zamykając cykl przemian trwających około 11 lat (czyli tyle, ile trwa transport pól resztkowych ku biegunom w wyniku cyrkulacji południkowej). Skutkiem wypływania wzmocnionych pól magnetycznych poprzez powierzchnię do atmosfery Słońca są wszelkie obserwowane przejawy aktywności magnetycznej naszej gwiazdy.

Niezwykle różnorodne – co do skali, geometrii i prędkości procesów - oddziaływania pól magnetycznych z plazmą zachodzą na całej powierzchni Słońca, ale najsilniejsze zjawiska występują z reguły w tzw. obszarach aktywnych (obszarach, gdzie stan plazmy w atmosferze słonecznej jest zdominowany przez silne, lokalne pola magnetyczne i ich ewolucję). Obserwuje się tam, między innymi, grupy plam słonecznych, w których pola magnetyczne mogą sięgać nawet 0.3-0.4 T (czyli niemal 10 000 razy więcej niż ziemskie pole magnetyczne), a temperatura plazmy jest o około 1-1.5 tysiąca K niższa niż fotosfery (dlatego przez kontrast plamy wydają się ciemne na tle tarczy słonecznej). Najpotężniejszymi zjawiskami zachodzącymi w obszarach aktywnych są rozbłyski słoneczne. Typowy rozbłysk słoneczny klasy M (czyli średniej mocy) powstaje w wyniku gwałtownego wydzielenia z pola magnetycznego energii rzędu  $E = 10^{25}$  J (czyli energii wybuchu 2.4 miliarda megaton TNT), co powoduje nagrzanie plazmy w pętlach magnetycznych do temperatur rzędu 10-20 MK (porównywalnej z temperaturą w jądrze gwiazdy), emisję silnych strumieni promieniowania w zakresie od gamma aż po radio (strumień promieniowania rentgenowskiego podczas fazy impulsowej rozbłysku może przekraczać 1 000 i więcej razy strumień emisji z całej tarczy Słońca), często rozbłyski stowarzyszone są z erupcjami protuberancji i wyrzutami koronalnych wyrzutów materii (z prędkościami dochodzącymi nawet do 2 000 km/s).

Słońce nie ma żadnej powierzchni, która jednoznacznie definiowałaby zewnętrzną granicę jego atmosfery. Korona słoneczna przechodzi płynnie w wiatr słoneczny, wypełniający przestrzeń międzyplanetarną w całym Układzie Planetarnym, aż po granicę heliosfery (czyli do odległości rzędu 100 AU). Cała atmosfera Słońca jest jednak ośrodkiem o bardzo małej gęstości: gęstość plazmy fotosferycznej wynosi zaledwie  $\rho_f = 3 \times 10^{-4}$  kg/m<sup>3</sup> (czyli 10 000 razy mniej niż gęstość atmosfery ziemskiej); gęstość plazmy w dolnej koronie, na wysokości

0.1  $R_s$  nad fotosferą, wynosi tylko  $\rho_k = 2 \times 10^{-10} \text{ kg/m}^3$  ( $5 \times 10^{-11}$  gęstości atmosfery ziemskiej), natomiast w pobliżu orbity ziemskiej gęstość plazmy wiatru słonecznego spada do 5 cząstek na  $\text{cm}^3$ . W pobliżu orbity Ziemi parametry plazmy napływającej ze Słońca ulegają częstym i gwałtownym zmianom, zarówno ze względu na strukturę sektorową międzyplanetarnego pola magnetycznego, zmienność parametrów samego wiatru jak i docierające w okolice Ziemi strumienie plazmy koronalnych wyrzutów materii. Tak więc, Ziemia cały czas znajduje się w zasadzie wewnątrz skrajnie rzadkiej, ale niezwykle zmiennej i dynamicznej, zewnętrznej warstwy atmosfery gwiazdy, oddziałującej na ziemską magnetosferę, jonosferę i całą atmosferę.

Zmienność poziomu aktywności magnetycznej Słońca obserwowana jest bezpośrednio od początku XVII wieku, natomiast na podstawie analizy wskaźników pośrednich zmiany aktywności można prześledzić od znacznie bardziej odległych epok (co najmniej od początku holocenu). Obserwacje gwiazd podobnych do Słońca, ale znajdujących się w różnych fazach ewolucji wskazują, iż aktywność magnetyczna Słońca trwa zapewne od momentu jego uformowania, przy czym poziom aktywności we wczesnej fazie ewolucji był znacznie wyższy niż obecnie. Współcześnie aktywność magnetyczna Słońca cyklicznie zmienia się w okresie około 11 lat (dokładniej od 8.5 do 14.5 lat), choć w zasadzie poprawnie powinno się mówić o cyklu 22-letnim, gdyż tyle czasu potrzeba dla odbudowy pola biegunowego o tej samej polaryzacji, co pierwotna. Cykl 11-letni nie jest jedyną okresowością działania dynamy słonecznego: wykryto również okresowości 88-letnią (cykl Gleissberg'a, prawdopodobnie wpływający na modulację amplitudy poszczególnych cykli), okresowość 203-205-letnią (cykl de Vries'a) oraz być może występuje także cykl 2100-2300-letni (Hallstattcki). Co ciekawe, mniej czy bardziej regularne, umiarkowane zmiany aktywności słonecznej zachodzą, jak się ocenia, tylko podczas 75% czasu jego życia. W pozostałym okresie aktywność dynamy słonecznego jest albo znacznie wzmocniona (tzw. wielkie maksima aktywności) albo odwrotnie, bardzo słaba (tzw. wielkie minima aktywności), gdy generowane pola magnetyczne są zbyt słabe dla wywołania typowych zjawisk aktywnych.

Cykliczne zmiany poziomu aktywności magnetycznej Słońca, w tym jej okresowej zanikanie, powodują skorelowane w czasie zmiany międzyplanetarnego pola magnetycznego, modulującego strumień promieniowania kosmicznego docierającego w okolice Ziemi. Promienie kosmiczne oddziałujące z cząstkami atmosfery ziemskiej generują kaskady atmosferyczne cząstek, inicjując przy tym syntezę wskaźnikowych izotopów promieniotwórczych  $^{14}\text{C}$  i  $^{10}\text{Be}$ . Na podstawie zmian zawartości tych izotopów w miejscach, gdzie są efektywnie deponowane (odpowiednio biosfera i oceany oraz lodowce) stwierdzono, że w ciągu ostatnich 11 700 lat (czyli podczas holocenu), na Słońcu wystąpiło 27 „wielkich minimumów” aktywności (w tym 80-letnie Minimum Maunder'a w latach 1645-1715

i 160-letnie Minimum Spoerera na przełomie XV/XVI w.) oraz 19 „wielkich maksimumów” aktywności, w tym najnowsze, w 2-giej połowie XX wieku, przy czym to maksimum aktywności Słońca było oceniane jako najsilniejsze od 11 tysięcy lat. Łącznie wielkie minima obejmowały 17% trwania holocenu, a wielkie maksima 10%. Nie jest wykluczone, iż obserwowany obecnie spadek temperatury i gęstości wiatru słonecznego (pomiarzy wykonane w 2007 roku przez sondę Ulysses wykazały spadek gęstości wiatru o 20% i jego temperatury o 13% względem wyników pomiarów w latach 1994-95), spadek prędkości cyrkulacji południkowej, spadek natężenia pola w plamach słonecznych i inne symptomy są objawami zmniejszania się wydajności dynama słonecznego lub wręcz zbliżania się Słońca do kolejnego okresu wielkiego minimum aktywności, być może trwającego nawet około 150 lat.

Całkowita energia docierająca do Ziemi ze Słońca wynosi  $P = 1,74 \times 10^{17}$  W. Energia ta nie tylko napędza wszelkie zjawiska i procesy hydrologiczne i atmosferyczne (w tym pogodowe), stanowi też dominujący składnik budżetu energii Ziemi a więc istotnie wpływa na klimat. Oczywiście, jest ona również niezbędna dla życia biologicznego. Strumień energii docierającej ze Słońca w okolice Ziemi ( $\sim 1366$  W/m<sup>2</sup>) zmienia się nieco wraz z 11-letnim cyklem aktywności, przy czym amplituda zmian wynosi zaledwie  $\pm 1.3$  W (czyli 0.1%) wartości średniej (strumień jest największy w okresach maksimum aktywności a najmniejszy w okresach minimum). Krótkotrwałe zmiany strumieni energii emitowanych w poszczególnych pasmach energii (np. w pasmach rentgenowskim i ultrafioletowym w wyniku rozbłysków) nie mają zapewne znaczenia dla zmian klimatu, ale są dla różnych dziedzin techniki (łączność, nawigacja, przesyłania energii itd.).

Analiza dostępnych źródeł historycznych jak również pośrednich wskaźników temperatury (np. pomiary stosunków izotopów  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  i  $^2\text{H}/^1\text{H}$  czy zawartości  $^{10}\text{Be}$  w rdzeniach lodowych) wskazują, iż okresy wielkich minimów aktywności magnetycznej Słońca skorelowane są z okresami globalnego ochłodzenia klimatu na Ziemi, podczas gdy okresy wielkich maksimumów aktywności Słońca skorelowane są z okresami globalnego ocieplenia. Korelacja pomiędzy zmianami poziomu aktywności magnetycznej Słońca a zmianami pogody i klimatu jest doskonale widoczna przy porównaniu zmian wskaźników aktywności Słońca ze zmianami odpowiednich wskaźników meteorologicznych czy geofizycznych, np. ze średnią globalną temperaturą powierzchni mórz, zmianami temperatury stratosfery, lokalnymi temperaturami w wybranych miejscach, zmianami przepływu wody w rzekach czy też poziomem zachmurzenia. Dla przykładu, poziom zachmurzenia globalnego jest bardzo silnie skorelowany z obserwowanym strumieniem promieniowania kosmicznego, czyli jest anty-skorelowany z cyklem aktywności słonecznej (w okresach maksimum aktywności globalne zachmurzenie jest mniejsze niż w okresach minimów aktywności). Powszechnie znane jest, iż w okresie Minimum Maundera klimat był na tyle chłodny, że regularnie zama-

rzały rzeki w Europie zachodniej (w tym i Tamiza), a na środku Zatoki Pomorskiej w zimie ustawiano karcznię na lodzie, aby podróżni skracający sobie drogę w poprzek zatoki mieli gdzie odsapnąć i ogrzać się. Z kolei w okresie podwyższonej aktywności Słońca w X i XI wieku klimat w Europie był na tyle ciepły, że wręcz można mówić o średniowiecznym optimum klimatycznym (z punktu widzenia rozwoju i wydajności rolnictwa).

Zmiany ewolucyjne mocy promieniowania Słońca są czynnikiem modyfikującym klimat na Ziemi w bardzo długich (wręcz geologicznych) skalach czasowych, podczas gdy zmiany poziomu aktywności magnetycznej Słońca i związane z nimi zmiany krótkookresowe mocy promieniowania modyfikują klimat w krótkich okresach (dziesiątki-setki lat). Zmiany o pośrednich skalach czasowych są prawdopodobnie spowodowane okresowymi zmianami parametrów orbity Ziemi (spłaszczenia, nachylenia osi Ziemi do płaszczyzny orbity oraz orientacji osi w przestrzeni), co prowadzi do okresowych modulacji strumienia energii słonecznej docierającej do różnych obszarów Ziemi. Ten proces nazywany jest, od nazwiska odkrywcy, cyklami Milankovica. Choć poprawność teorii Milankovica była wielokrotnie w przeszłości kwestionowana, obecnie teoria ta ponownie zdobywa uznanie jako opis istotnego procesu kształtującego klimat. Jednym z bardziej ciekawych, ale i często krytycznie dyskutowanych, wyników teorii Milankowicza jest uderzająca zgodność pomiędzy zmianami insolacji na dużych szerokościach geograficznych a występującym co najmniej od miliona lat cyklem kolejnych okresów powiększania się i malenia zasięgu lodowców (oziębień i ociepleń) w ramach obecnego zlodowacenia plejstoceniowego (na przemian około 80 000 lat chłodnego klimatu, z ekspansją pokryw lodowych, a potem 20 000 lat cieplejszego klimatu, z regresją lodowców).

Dla dopełnienia obrazu zmian klimatu Ziemi należy wspomnieć, że długookresowe wahania średniej temperatury globalnej i temperatur lokalnych na Ziemi były w przeszłości bardzo znaczne. Współczesne zlodowacenie plejstoceniowe jest tylko jednym z szeregu wcześniejszych wielkich zlodowaceń, które wystąpiły między innymi w okresach 260-360, 420-450 oraz 635-800 mln lat temu. Jednak przez znakomitą większość czasu klimat na Ziemi był zdecydowanie cieplejszy niż obecnie. Szczególnie znanym epizodem ekstremalnego, gwałtownego ocieplenia globalnego jest paleoceniowo-eoceniowe maksimum termiczne, czyli gwałtowne globalne ocieplenie klimatu, które wystąpiło około 55.8 mln lat temu (podobne krótkotrwałe, gwałtowne wzrosty temperatury globalnej wystąpiły zresztą jeszcze kilkakrotnie). Jak się ocenia średnia temperatura globalna najpierw wzrosła wówczas na krótko aż o 6°C (na biegunach średnia roczna temperatura wody mogła sięgać nawet 10°C) a następnie wróciła do poziomu wyjściowego. Paleoceniowo-eoceniowe maksimum termiczne było jakby zapowiedzią długotrwałego, globalnego ocieplenia, tak zwanego wczesno-eoceniowego optimum klimatycznego, gdy na wiele milionów lat temperatura

wzrosła stopniowo do tego samego poziomu. Oczywiście, zarówno okresy ochłodzenia jak i ocieplenia powodowały istotne gwałtowne zmiany w ekosystemie, w tym wpływały na skład gatunkowy, liczebność i rozprzestrzenienie fauny i flory.

### **Wyzwania przyszłości**

Szczegółowe oszacowanie skutków bezpośrednich i pośrednich czynników, powodujących zmiany klimatu Ziemi, wymaga budowy niezwykle skomplikowanych, zależnych od czasu modeli opisujących zmiany stanu atmosfery, hydrosfery, pokryw lodowych, lądów oraz ich wzajemnych interakcji itd.. W modelach tych należy uwzględnić wiele czynników, procesów i zjawisk wpływających na lokalny oraz globalny bilans energii, w tym również czynników związanych z aktywnością technologiczną, gospodarczą i społeczną ludzi. Aż do połowy XIX wieku zmiany klimatu były spowodowane praktycznie wyłącznie przez procesy naturalne, takie jak zmiany mocy promieniowania i aktywności magnetycznej Słońca, zmiany składu atmosfery ziemskiej, zjawiska tektoniki płyt i wulkanizmu oraz, być może, zmiany parametrów orbity ziemskiej. Jednak współczesna, różnorodna i globalna aktywność człowieka powoduje bez wątpienia istotne zakłócenie ekosystemu Ziemi. Emisja gazów cieplarnianych, pyłów i aerozoli, zmiany albedo planety spowodowane globalnym spadkiem zalesienia i wzrostem obszaru upraw rolnych, budowa ogromnych sztucznych zbiorników wodnych a jednocześnie zmiany strumienia przepływów wody w rzekach (najczęściej zmniejszanie w wyniku nadmiernego wykorzystania wody do nawadniania) – listę można by znacznie wydłużyć – spowodowały pojawienie się dodatkowych, zmiennych i trudnych do oszacowania czynników kształtujących klimat.

Niestety, nie jest łatwo obiektywnie ustalić, jaki jest udział ilościowy czynników antropogenicznych w obserwowanych zmianach klimatu (często syntetycznie, acz błędnie, sprowadzanych do wzrostu średniej temperatury globalnej). Zmiany klimatu wywołane przez czynniki antropogeniczne nakładają się bowiem na zmiany wywoływane przez stale działające procesy naturalne, w tym tak istotne, jak XX-wieczne maksimum aktywności Słońca czy też naturalna tendencja do utrzymywania raczej ciepłego klimatu na Ziemi. Problem jest tym trudniejszy, iż nie jest do końca znany system sprzężeń zwrotnych, mogących prowadzić do istotnego wzmocnienia wpływu nawet drobnych początkowo zakłóceń, zaś badania wielkości i tempa zmian klimatu napotykają ogromne problemy z powodu braku obiektywnych, powszechnie akceptowanych metod, standardów i punktów odniesienia.

Klimat Ziemi jest jednym z najważniejszych czynników wpływających na rozwój naszej cywilizacji. Choć chlubimy się niebywałymi osiągnięciami w dziedzinie technologii, to wciąż kluczowe znaczenia dla przetrwania cywilizacji ma



rolnictwo, całkowicie zależne od klimatu. Jednocześnie nie ulega wątpliwości, że globalne skutki ocieplenia klimatu, takiej jak pustoszczenie dużych obszarów czy też podnoszenie się poziomu mórz, będą miały bezpośredni wpływ na warunki życia całej populacji. Dlatego też obiektywne określenie przyczyn oraz kierunków zmian klimatu w perspektywie dziesięcioleci i stuleci jak również określenie możliwych działań, co najmniej zmniejszających skutki zmian klimatu, a może nawet w jakimś stopniu zapobiegające im, są jednym z najpilniejszych zadań nauki.

**Literatura uzupełniająca:**

- M.J. Aschwanden, A.I. Poland and D.M. Rabin: *The New Solar Corona*, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 39, 175-210, 2001.
- J.D. Haigh: *The Sun and the Earth's Climate*, Living Rev. Solar Phys. 4 (2007), 2.
- K. Lang: *Sun, Earth and Sky*, Springer, 2006.
- K.J.H. Phillips: *Guide to the Sun*, Cambridge Univ. Press, 1995.
- K. Petrovay: *Solar Cycle Prediction*, Living Rev. Solar Phys. 7 (2010), 6.
- I.G. Usoskin: *A History of Solar Activity over Millennia*, Living Rev. Solar Phys. 10 (2013), 1.