

## Wpływ efektu cieplarnianego na klimat Ziemi

Leszek Marks<sup>1</sup>

**The impact of the greenhouse effect on the earth's climate.** Prz. Geol., 73: 192–193; doi: 10.7306/2025.19

Promieniowanie słoneczne jest głównym źródłem energii, lecz jego ilość dostarczana do powierzchni Ziemi podlega modyfikacji w atmosferze ziemskiej (przede wszystkim wskutek efektu cieplarnianego), a także w wyniku działania różnych strefowych, astrefowych i cyrkulacyjnych czynników klimatotwórczych. Ziemia jest zasadniczo systemem zamkniętym, ale otrzymuje energię z zewnątrz, a także zwraca ją częściowo do przestrzeni kosmicznej w postaci promieniowania długofalowego, natomiast skutki zmian insolacji są wzmacniane i przekształcane przez różne sprzężenia zwrotne. Strumień promieniowania słonecznego, napotykając cząstki powietrza atmosfery i aerozole (pyły, kryształki soli, wody itp.), zmienia kierunek rozchodzenia się, co skutkuje jego częściowym rozpraszaniem selektywnym, i dlatego część promieniowania nie dociera do powierzchni Ziemi.

Skład atmosfery i zachodzące w niej procesy wpływają na system klimatyczny Ziemi. Obecność gazów cieplarnianych w atmosferze powoduje podwyższenie temperatury planety w wyniku efektu cieplarnianego, którego wymiar termiczny wyraża różnica między średnią obserwowaną temperaturą powierzchni Ziemi a temperaturą efektywną Ziemi pozbawionej atmosfery. Zależnie od transferu i transmisji promieniowania słonecznego w atmosferze, efekt cieplarniany jest wywołany przez różne jej składniki, które pochłaniają poszczególne pasma promieniowania podczerwonego. Pochłanianie energii promieniowania polega na jej transformacji, przeważnie w energię ciepłą, co powoduje ogrzewanie substancji pochłaniającej. Zachodzi to selektywnie i dotyczy poszczególnych pasm promieniowania, za co są odpowiedzialne różne składniki atmosfery.

Efekt cieplarniany jest uzależniony od obecności w atmosferze nie tylko gazów cieplarnianych (m.in. para wodna, dwutlenek węgla, metan, tlenki azotu, ozon, freony, halony, węglowodory, gazy przemysłowe), ale także innych gazów i aerozoli, których oddziaływanie może mieć odwrotny skutek i powodować ochładzanie (np. związki siarki, pyły). Źródła emisji gazów cieplarnianych były w przeszłości geologicznej wyłącznie naturalne (wskutek m.in. parowania wody oraz uwalniania rozpuszczonych w niej gazów, aktywności biologicznej flory i fauny oraz emisji wulkanicznych), ale obecnie są również pochodzenia antropogenicznego (spowodowane m.in. przez spalanie paliw kopalnych i produkcję cementu oraz przez wylesianie, rolnictwo i hodowlę zwierząt). Dzięki obecności gazów cieplarnianych w atmosferze średnia temperatura przy powierzchni Ziemi wynosi obecnie 15,5°C, natomiast ich usunięcie z atmosfery spowodowałoby ochłodzenie o ~35°C w ciągu paru dekad, koncentracja pary wodnej spadłaby

dziesięciokrotnie, a dwie trzecie powierzchni oceanów pokryłoby się lodem.

Najważniejszą rolę w utrzymywaniu się temperatury obserwowanej na poziomie znacznie przewyższającym temperaturę efektywną powierzchni Ziemi odgrywają para wodna oraz cząsteczki wody zawarte w atmosferze, co wpływa na zachmurzenie, które z kolei na ogół ogranicza dopływ promieniowania słonecznego do powierzchni Ziemi. Koncentracja pary wodnej przewyższa wprawdzie co najmniej o rząd wielkości koncentrację pozostałych gazów cieplarnianych, ale najefektywniejsze w zakresie pochłaniania i reemisji promieniowania są dwutlenek węgla, metan, tlenki azotu i inne gazy śladowe.

Rejestry geologiczne umożliwiają określenie składu dawnej atmosfery ziemskiej, w tym również stwierdzenie zmian zawartości gazów cieplarnianych. Wahania poziomu morza, wynurzenie kontynentów i zmiany składu gazów wulkanicznych wpłynęły na zwiększenie ilości tlenu w atmosferze ziemskiej już w archaiku górnym i proterozoiku. Tlen pojawił się w atmosferze wskutek fotosyntezy przez prokarioty i eukarioty, prawdopodobnie ~3,5 Ga. Fotosynteza była wówczas niewielka, ale pojawienie się tlenu zapobiegało rozkładowi (fotolizie) SO<sub>2</sub>. Tlen był szybko pobierany z atmosfery wskutek wietrzenia, szczególnie minerałów Fe, co doprowadziło do powstania warstwowych formacji żelazistych, jednak późniejsze spowolnienie tego procesu spowodowało wzrost zawartości O<sub>2</sub> w atmosferze, doprowadzając do wielkiej katastrofy tlenowej i zlodowacenia. Od tego czasu historia Ziemi składa się na przemian z okresów ciepłych o zwiększonej zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze (prawdopodobnie wskutek drastycznie zwiększonej aktywności wulkanicznej) i zimnych z dużą (do 30%) zawartością tlenu (wskutek intensywnej fotosyntezy). Takie cykle, kolejno w neoproterozoiku, ordowiku, karbonie i kenozoiku, kończyły się każdorazowo katastrofalnym globalnym zlodowaceniem. Na główne fazy zmian składu atmosfery i klimatu na Ziemi nakładały się zjawiska ekstremalne, spowodowane wybuchami superwulkanów i kolizjami z kometami (asteroidami?), co doprowadzało do zwielokrotnienia zawartości pyłu i związków siarki w atmosferze oraz utworzenia grubej pokrywy chmur zatrzymującej promieniowanie słoneczne, prowadząc do wieloletniego, katastrofalnego ochłodzenia. Szacuje się na podstawie danych geologicznych, że w górnej kredzie i na początku paleogenu zawartość CO<sub>2</sub> w atmosferze była 6–8 razy większa niż obecnie. Na podstawie składu gazów atmosfery uwieczonych w lodzie lodowcowym stwierdzono, że w ciągu ostatnich 800 tysięcy lat zawartość CO<sub>2</sub> w atmosferze wynosiła ~280 ppm

<sup>1</sup> Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02–089 Warszawa; e-mail: leszek.marks@uw.edu.pl; ORCID ID: 0000-0002-4507-1828

w interglacjalach i ~180 ppm w czasie zlodowaceń, i jednocześnie wzrost temperatury wyprzedzał zwiększanie zawartości CO<sub>2</sub> w atmosferze. Podobne obserwacje poczyniono również dla holocenu oraz dla współczesnego lata i zimy na obu półkulach. Wynika z tego jednoznacznie, że mimo wzajemnej zależności w sprzężeniu zwrotnym temperatura–gazy cieplarniane, promieniowanie słoneczne jest przyczyną dominującą, a zmiany zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze są w znacznym stopniu spowodowane przyspieszeniem lub spowolnieniem procesów ich dostarczania, czym sterują zmiany temperatury.

### THE IMPACT OF THE GREENHOUSE EFFECT ON THE EARTH'S CLIMATE

Solar radiation is the main source of energy, but its amount delivered to the Earth's surface is subject to modification in the Earth's atmosphere (primarily due to the greenhouse effect), as well as due to the action of various zonal, azonal and circulation-related climate-forming factors. The Earth is essentially a closed system, but it receives energy from the outside and also returns it partly to space in the form of long-wave radiation, while the effects of insolation changes are amplified and transformed by various feedbacks. Encountering atmospheric air particles and aerosols (dust, salt crystals, water, etc.), the solar radiation flux changes its direction of propagation, which causes its partially selective scattering, as a result of which some of it does not reach the Earth's surface.

The composition of the atmosphere and the processes occurring in it affect the Earth's climate system. The presence of greenhouse gases in the atmosphere causes an increase in the planet's temperature as a result of the greenhouse effect, the thermal dimension of which is expressed by the difference between the average observed temperature of the Earth's surface and the effective temperature of the Earth if devoid of atmosphere. Depending on the transfer and transmission of solar radiation in the atmosphere, the greenhouse effect is caused by its various components, which absorb individual bands of infrared radiation. Absorption of radiation energy consists in its transformation, usually into thermal energy, which causes the heating of the absorbing substance. This occurs selectively and concerns individual bands of radiation, for which different components of the atmosphere are responsible. The greenhouse effect is therefore caused by the presence of not only greenhouse gases in the atmosphere (including water vapor, carbon dioxide, methane, nitrogen oxides, ozone, freons, halon, hydrocarbons, industrial gases), but also other gases and aerosols, the presence of which in the atmosphere has a completely opposite effect (e.g., sulphur compounds, dust, black carbon). The sources of greenhouse gas emissions in the geological past were exclusively natural (including water evaporation and the release of gases dissolved in it, biological activity of flora and fauna, and volcanic emis-

sions), but currently they are also of anthropogenic origin (including the combustion of fossil fuels, cement production, deforestation, agriculture, and animal husbandry). Due to the presence of greenhouse gases in the atmosphere, the average temperature at the Earth's surface is currently 15.5°C, while their removal from the atmosphere would result in a cooling of ~35°C within a few decades, the concentration of water vapor would decrease tenfold, and two thirds of the ocean surface would be covered with ice.

Geological records allow us to determine the composition of the ancient atmosphere of the Earth, including changes in the content of greenhouse gases. Sea-level fluctuations, the emergence of continents and changes in the composition of volcanic gases influenced the increase in the amount of oxygen in the Earth's atmosphere in the Late Archean and Proterozoic. Oxygen appeared in the atmosphere as a result of photosynthesis by prokaryotes and eukaryotes, probably ~3.5 Ga. Photosynthesis was small at that time, but the appearance of oxygen prevented the decomposition (photolysis) of SO<sub>2</sub>. Oxygen was quickly taken from the atmosphere due to weathering, especially Fe minerals, which led to the formation of banded iron formations, but the later slowing down of this process caused an increase in the O<sub>2</sub> content in the atmosphere, leading to the great oxygen catastrophe and glaciation. Since then, the history of the Earth has consisted of alternating warm periods with increased greenhouse gas content in the atmosphere (probably due to drastically increased volcanic activity) and cold periods with high (up to 30%) oxygen content (mostly due to intensive photosynthesis). Such cycles, successively in the Neoproterozoic, Ordovician, Carboniferous and Cenozoic, each time ended with a catastrophic global glaciation. These major phases of changes in the composition of the atmosphere and climate on Earth were superimposed on extreme phenomena caused by supervolcano eruptions and collisions with comets (asteroids?), resulting in an increase in the content of dust and sulphur compounds in the atmosphere and the formation of a thick cloud cover blocking solar radiation, leading to many years of catastrophic cooling. It is estimated on the basis of geological data that in the Upper Cretaceous and at the beginning of the Paleogene the content of CO<sub>2</sub> in the atmosphere was 6–8 times higher than today. Based on the composition of atmospheric gases trapped in glacial ice, it was found that over the last 800 thousand years the content of CO<sub>2</sub> in the atmosphere was ~280 ppm in interglacials and ~180 ppm during glaciations, while at the same time the increase in temperature outpaced the increase in the content of CO<sub>2</sub> in the atmosphere. Similar observations have also been made for the Holocene and for the present summer and winter seasons in both hemispheres. This clearly shows that, despite the mutual dependence, in the temperature–greenhouse gas feedback, solar radiation is the dominant cause, and changes in the greenhouse gas content in the atmosphere are largely caused by the acceleration or deceleration of their release processes due to temperature changes.