

## Zmiany ziemskiego klimatu – spojrzenie w otchłań czasu

Marek Narkiewicz<sup>1</sup>

**Changes to earth's climate – a glimpse into the abyss of time.** Prz. Geol., 73: 189–191; doi: 10.7306/2025.18

Nauka o dawnych klimatach – paleoklimatologia – wyrosła w 1. połowie XIX w. z Lyellowskiej teorii aktualizmu, głoszącej, że kluczem do przeszłości Ziemi jest jej teraźniejszość. Badając przeszłość klimatu zaczęto jednak nieoczekiwanie odkrywać procesy i zdarzenia nieprzystające do wiedzy o świecie współczesnym. Przełomowa była tu hipoteza Louisa Agassiza (1830) o lodowcu plejstoceńskim pokrywającym całe Alpy Szwajcarskie. Takich nieaktualistycznych odkryć z czasem przybywało i wkrótce okazało się, że klimat współczesny nie najlepiej przystaje do swoich geologicznych poprzedników. Zwrot akcji nastąpił w miarę rosnącej akceptacji hipotezy o globalnym

ociepleniu antropogenicznym. Okazało się, że aby zmierzyć się z naukowym wytłumaczeniem tego zjawiska, warto spojrzeć w otchłań czasu – sięgnąć do wiedzy o podobnych epizodach w liczącej 4,5 mld lat (Ga) historii globu. Co oznacza odwrócenie aktualistycznego paradygmatu, bowiem to przeszłość staje się teraz kluczem do teraźniejszości.

Uruchamianie maszynierii klimatu następowało niemal od początku istnienia planety, w miarę rozwoju elementów jej systemu i ich wzajemnych interakcji. Kluczowe dla powstania między 4,0 a 2,5 mld lat temu trwałej atmosfery, początkowo gorącej, złożonej z wulkanicznych gazów cieplarnianych, było ziemskie pole magnetyczne chroniące

<sup>1</sup> emerytowany pracownik Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego, ul. Rakowiecka 4, 00–975 Warszawa; e-mail: mareknarkiewicz@gmail.com

planetę przed „dmuchawą” wiatru słonecznego. Równoległe tworzyły się zręby płyt litosfery i zbliżony do współczesnego układ dużych oceanów i kontynentów, powstały prawdopodobnie 3,5–3,0 mld lat temu. Zapewne nieco później (2,5 Ga) ruszyła, choć jeszcze nie z pełnym rozmachem, maszynaria tektoniki płyt litosferycznych z jej cyklicznym otwieraniem i zamykaniem basenów oceanicznych i zmianami aktywności wulkanizmu. W tej stopniowo zmieniającej się scenarii rozwijały się od 3,8 Ga załączki biosfery – pozbawione jądra komórkowego organizmy beztlenowe. Ich metabolizm uwalniał do atmosfery, kosztem zużywanego CO<sub>2</sub>, coraz większe ilości tlenu, co doprowadziło 2,4–2,0 Ga temu do stopniowego przejścia od warunków redukcyjnych do tlenowych. Uruchomiło to dalszy ciąg zdarzeń: spadek zawartości gazów cieplarnianych (CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub>), globalne ochłodzenie i powstanie ok. 2,3 Ga warunków rozwoju organizmów eukariotycznych. Materiał genetyczny w ich jądrze komórkowym stał się wehikułem łańcucha ewolucji: pojawienia się wielokomórkowców (ok. 1,6 Ga), pierwszych zwierząt (ok. 700 mln lat – Ma), wreszcie, w wyniku kambryjskiej eksplozji życia (ok. 540 Ma) utworzenia złożonych ekosystemów morskich, a następnie również lądowych, dopełniających współczesną biosferę.

Wprawdzie ślady pierwszej epoki lodowej znamy z okresu 2,4–2,1 Ga, ale dopiero z kriogenu (720–635 Ma) pochodzą pełne świadectwa wielkich zlodowaceń, które prawdopodobnie objęły cały glob. Scenariusz globalnej kuli śnieżnej już się później nie powtórzył, możemy więc założyć, że od tego czasu system ziemski osiągnął obecny stan chwiejnej równowagi. Jest ona zaburzana długookresowymi, cyklicznymi zmianami klimatu obrazowo określanymi jako walka postu (globalna chłodnia) z karnawalem (szklarnia). Klimat szklarniowy wiąże się z większą dynamiką płyt litosfery i silniejszym wulkanizmem uwalniającym CO<sub>2</sub>, ociepleniem, małymi równoleżnikowymi i głębokościowymi gradientami temperatury w oceanach, ich słabszą cyrkulacją oraz podwyższonym poziomem wód. W warunkach chłodni słabsza aktywność płyt prowadzi do silniejszej strefowości klimatu i ożywionej cyrkulacji silniej natlenionych wód oceanu. Po kriogenie nastąpiły długie okresy globalnej szklarni, przerywane etapami chłodniowymi z lądolodami w strefach okołobiegunowych: ok. 585 Ma, 450–443 Ma, 370–290 Ma, ok. 145 Ma (?), wreszcie w trwającej od 34 Ma obecnej epoce lodowej.

Krótkookresowym modulatorem dopływu energii słonecznej są cykle Milankovicia związane z regularnymi wahaniami parametrów astronomicznych – ekscentryczności orbity Ziemi (okres 100 tys. lat – ka), nachylenia osi jej obrotu do płaszczyzny ekliptyki (40 ka) i precesji (25 ka). Cykle astronomiczne wpływały na zmiany nasłonecznienia prawdopodobnie już od 2–3 Ga, ale pewniejsze dane pochodzą z ostatnich kilkudziesięciu mln lat. Cykle Milankovicia były odpowiedzialne w ostatnim milionie lat za wkraczanie lądolodów w etapie chłodnym i cofanie się w miarę ocieplania w interglacjale. Obecnie panują warunki interglacjalne, ale ocieplenie klimatu nie osiągnęło rozmiarów przedostatniego interglacjału sprzed ok. 130 tys. lat (ka), z jego średnią temperaturą wyższą o 2°C od obecnej, ekspansją lasów liściastych oraz zalewem morskim u ujścia Prawiśły aż po okolice Kwidzyna.

Badania zapisu skalnego ostatnich setek milionów lat ujawniają coraz więcej krótkotrwałych epizodów nagłych zmian klimatu nie związanych z cyklami systemu ziem-

skiego. Tłumaczy się je najczęściej upadkami dużych meteoroidów i następującą po nich tzw. zimą impaktową lub rozległymi erupcjami magmowymi, uwalniającymi gazy cieplarniane w okresach rzędu milionów lat. Potencjalnymi analogami współczesnego ocieplenia globalnego są oceaniczne zdarzenia anoksyczne (angielski skrót OAE), zapisane głównie w osadach oceanicznych jako czarne łupki osadzone w warunkach niskotlenowych. Znane są one od przynajmniej 400 Ma, ale najlepiej zbadano je w utworach wieku 200–80 Ma. Okazuje się, że tworzyły się w trakcie trwającego ok. 100–400 ka wilgotnego okresu gorącego, w którym wzrastał poziom i zakwaszenie wód, czemu towarzyszyły procesy wymierania organizmów morskich i lądowych.

Dane izotopowe wskazują, że OAE-sy, takie jak np. zdarzenie Jenkynsa (183 Ma), mogły być zapoczątkowane przez raptowną emisję CO<sub>2</sub> lub też CH<sub>4</sub> z wulkanów albo hydratów metanowych, powodującą wzrost średniej temperatury globu o 2–8°C. Ocieplenie i zwilgotnienie klimatu przyspieszało obieg wód powierzchniowych i, w ślad za tym, tempo wietrzenia na lądach. Miało to dwojakie konsekwencje – redukcję CO<sub>2</sub> zużywanego w trakcie wietrzenia skał oraz wprowadzanie do oceanów zwiększonej masy zwierzeliny, w tym substancji odżywczych, które zwiększały biologiczną produktywność wód. Masy wytworzonej dzięki temu materii organicznej gromadziły się w czarnych łupkach, co oznaczało sekwestrację węgla i ochłodzenie klimatu. Za pomocą takiego termostatu węglowego maszynaria ziemiska, wytracona z rytmu przez zdarzenie hipertermiczne, powracała do stanu równowagi cieplnej. Jednak okres potrzebny na powrót do „normalnych” temperatur sprzed OAE, mierzony dziesiątkami tysięcy lat, każe nam pamiętać o otchłani czasu geologicznego, który nie mieści się w skali naszych ludzkich oczekiwań na poprawę dzisiejszego klimatu.

Ten mało optymistyczny wniosek nie przekreśla nauki płynącej ze studiowania dawnych, naturalnych epizodów globalnego ocieplenia. Mówią nam one wiele o możliwym przebiegu zjawisk towarzyszących zmianom klimatu, reakcji różnych elementów maszynarii ziemskiej i jej, mimo wszystko, odporności na drastyczne skutki możliwych awarii.

#### CHANGES TO EARTH'S CLIMATE – A GLIMPSE INTO THE ABYSS OF TIME

The science of past climates – palaeoclimatology – grew out of Lyell's theory of actualism in the first half of the 19<sup>th</sup> century, which claimed that the present is a key to the Earth's past. However, when going back into the past of the global climate, unexpected processes and events began to be discovered that did not fit the knowledge of the contemporary world. The breakthrough here was Louis Agassiz's hypothesis (1830) about the Pleistocene ice sheet covering the entire Swiss Alps. Over time, more and more such non-actualistic discoveries appeared, and it soon turned out that the present climate does not fit its geological predecessors very well. The turning point appeared with the growing acceptance of the hypothesis of anthropogenic global warming. It turned out that in order to face the scientific explanation of this phenomenon, it is worth looking into the abyss of time – reaching for knowledge about similar episodes in the 4.5 Ga long history of the globe. Which means a reversal of the actu-

alistic paradigm, because the past is now becoming the key to the present.

The global climate machinery has been activated almost since the beginning of the planet's formation, as the elements of its system and their mutual interactions developed. The key factor for the formation of a permanent atmosphere between 4.0 and 2.5 Ga, initially hot, composed mainly of volcanic greenhouse gases, was the Earth's magnetic field, protecting the planet from the "blower" of the solar wind. Probably 3.5–3.0 Ga ago the lithospheric plates were formed, along with a pattern of large oceans and continents similar to the present day. Probably a little later (2.5 Ga), the machinery of lithospheric plate tectonics started, although not yet on a full scale, with its cyclical opening and closing of ocean basins and changes in volcanism activity. In this gradually changing scenery, the rudiments of the biosphere, anaerobic organisms devoid of a cell nucleus, have developed since 3.8 Ga. Their metabolism released into the atmosphere, at the expense of the CO<sub>2</sub> consumed, increasing amounts of oxygen, which led 2.4–2.0 Ga ago to a gradual transition from reducing to aerobic conditions. This triggered a further chain of events: removal of greenhouse gases (CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>), global cooling and the emergence of conditions for the development of eukaryotic organisms (~2.3 Ga). The genetic material in their cell nucleus became a vehicle for evolution: the emergence of multicellular organisms (~1.6 Ga), the first animals (~700 Ma), and finally, as a result of the Cambrian explosion of life (~540 Ma), the formation of complex ecosystems, first marine then also terrestrial, complementing the modern biosphere.

Although we know traces of the first ice age from 2.4–2.1 Ga, it is only for the Cryogenian Period (720–635 Ma) that there is convincing evidence of extensive glaciations, which probably covered the entire globe. Such a global snowball scenario has not been repeated yet, so we can assume that since then the Earth system has reached its current state of unstable equilibrium. It is disturbed by long-term cyclical climate changes compared by some authors to the fight between Lent (global icehouse) and Carnival (greenhouse). The greenhouse climate is associated with greater dynamics of the lithospheric plates and stronger volcanism, which results in an increase in CO<sub>2</sub> content of the atmosphere, warming, small latitudinal and water-depth temperature gradients in the ocean waters, their sluggish circulation and increased sea-levels. In icehouse conditions, weaker plate activity leads to stronger climate zonation and increased circulation of more oxygenated ocean waters. After the Cryogenian, the long periods of a global greenhouse alternated with icehouse phases hosting thick ice sheets in the circumpolar zones: around 585 Ma, 450–443 Ma, 370–290 Ma, around 145 Ma (?), and finally from 34 Ma to present.

A short-term modulator of solar energy supply is the Milankovitch cycle, associated with regular fluctuations in the planet's astronomical parameters – orbital eccentricity (period of 100 ka), inclination of its axis of rotation to

the ecliptic plane (axial tilt – 40 ka) and axial precession (25 ka). Astronomical cycles have influenced changes in solar luminosity probably since 2–3 Ga, but more reliable data are for strata only from the last several tens of million years. Over the last million years, Milankovitch cycles have propelled the expansion of ice sheets during cold stages and their retreat with warming in the interglacial periods. Interglacial conditions prevail today, but the warming of the climate has not reached the level of the Eemian Interglacial started about 130 ka ago, with its average temperature 2°C higher than the present day, the expansion of deciduous forests, and the marine transgression at the mouth of the Vistula River up to the vicinity of the present Kwidzyna City.

Studies of the rock record of the last hundreds of millions of years reveal more and more short-term episodes of sudden climate change unrelated to the cycles of the Earth System. They are most often explained by the impact of large meteorites and the subsequent so-called impact winters, or extensive magmatic eruptions releasing greenhouse gases over periods of millions of years. Potential analogues of contemporary global warming are oceanic anoxic events (OAEs) recorded mainly in oceanic sediments as black shales deposited in low-oxygen conditions. They have been known since at least 400 Ma, but have been best studied in strata aged 200–80 Ma. It turns out that they formed during a humid hyperthermal period lasting ca. 100–400 ka, during which sea levels and seawater acidification increased, which was accompanied by the extinction of marine and terrestrial organisms.

Isotope data suggest that OAEs, such as the Jenkyns Event of 183 Ma, could have been initiated by a sudden release of CO<sub>2</sub> and/or CH<sub>4</sub> from volcanoes or methane hydrates, which increased the average global temperature by 2–8°C. The warming and humidization of the climate accelerated the circulation of surface waters and the rate of weathering on land. This had two consequences – withdrawal of the atmospheric CO<sub>2</sub>, consumed during the weathering of rocks, and increased influx of weathered material into the oceans, including nutrients that fostered marine biological productivity. The masses of organic carbon thus produced were sequestered in black shales, leading to a cooling of the climate. By means of such a carbon thermostat, the Earth's machinery, thrown out of rhythm by the hyperthermal event, returned to a previous state of equilibrium. However, the time needed to return to "normal" pre-OAE temperatures, measured probably in tens of thousands of years, reminds us of the abyss of geological time, which does not fit into the scale of our human expectations for an improvement in today's climate. This less-than-optimistic conclusion does not invalidate the lessons learned from studying past natural episodes of global warming. They tell us a lot about the possible course of phenomena accompanying climate change, the responses of various elements of the Earth's machinery and, despite everything, its resistance to the drastic effects of possible failures.