

# 1. Klimat Ziemi od archaiku po antropocen

Jan Zalasiewicz, Mark Williams  
Tłumaczenie: Michał Pałasz\*

“ Sugerowane cytowanie: Zalasiewicz, J., Williams, M. (2022), *Klimat Ziemi od archaiku po antropocen*, w: Jasikowska, K., Pałasz, M. (red.), *Za pięć dwunasta koniec świata. Kryzys klimatyczno-ekologiczny głosem wielu nauk*. Kraków: Uniwersytet Jagielloński w Krakowie, Biblioteka Jagiellońska, s. 33–57. [za512.uj.edu.pl](https://za512.uj.edu.pl)

\* Pragnę wyrazić ogromną wdzięczność dr. hab. Mariuszowi Kędzierskiemu, dyrektorowi Instytutu Nauk Geologicznych UJ, za zaangażowaną i fachową konsultację naukową wybranych fragmentów rozdziału zawierających specjalistyczną terminologię – M.P.

Od Jana

**Zajmuję się tematyką kryzysu  
klimatyczno-ekologicznego,  
ponieważ wydaje mi się,  
że to najważniejsze, nad czym  
można obecnie pracować.  
Gdy myślę o kryzysie klimatyczno-  
ekologicznym, czuję, że wszyscy  
mamy wiele do zrobienia.  
Najważniejsze wyzwanie dla ludzkości  
w obliczu kryzysu klimatyczno-  
-ekologicznego stanowi, według mnie,  
wypracowanie zdolności wspólnego  
organizowania się i skutecznego  
działania, przedkładającego  
długoterminową planetarną  
równowagę (ang. *sustainability*)  
nad krótkoterminowe i lokalne korzyści.**

**Jan Zalasiewicz**

Urodzony w Wielkiej Brytanii  
*professor emeritus* paleo-  
biologii na Uniwersytecie  
w Leicester mający polskie  
korzenie. Jako terenowy  
geolog i paleontolog na-  
uczał historii Ziemi student-  
ki\_tów wielu stopni studiów,  
prowadził badania nad  
kopalnymi ekosystemami  
występującymi na prze-  
strzeni 0,5 mld lat w skali  
czasu geologicznego (w tym  
antropocenu) i jest autorem  
wielu raportów technicz-  
nych oraz prac popularno-  
naukowych. Kieruje Grupą  
Roboczą ds. Antropocenu  
(Anthropocene Working  
Group, AWG) pracującą nad  
gromadzeniem dowodów  
na zaistnienie nowej epoki  
geologicznej; jaz1@le.ac.uk.

Od Marka

**Zajmuję się tematyką kryzysu klimatyczno-ekologicznego, ponieważ nie chcę, by moja córka żyła w świecie bez raf koralowych. Gdy myślę o kryzysie klimatyczno-ekologicznym, czuję, że muszę przyczynić się do złagodzenia jego skutków, zarówno poprzez pisanie artykułów naukowych, jak i przez wspieranie przyrody, chociażby przez przywrócenie mojemu ogrodowi dzikości. Najważniejsze wyzwanie dla ludzkości w obliczu kryzysu klimatyczno-ekologicznego stanowi, według mnie, zrozumienie, w jaki sposób ekosystemy – zarówno wodne, jak i lądowe – mogą przystosowywać się do gwałtownych zmian środowiskowych.**

**Mark Williams**

Profesor paleobiologii na Uniwersytecie w Leicester, a wcześniej naukowiec w Brytyjskiej Służbie Geologicznej i Antarktycznej (British Geological Survey, British Antarctic Survey). Interesuje się ewolucją życia, zwłaszcza jej bieżącą trajektorią zmian w antropocenie. Mark napisał wraz z Janem 3 książki popularnonaukowe: na temat zmian klimatu, historii oceanów i ewolucji życia; mri@le.ac.uk.

## Wprowadzenie

Antropocen stał się, w ciągu zaledwie dwóch dekad od zaproponowania tej nazwy przez Paula Crutzena w ramach Międzynarodowego Programu Geosfera–Biosfera (International Geosphere–Biosphere Programme, IGBP)<sup>1</sup>, jedną z najdynamiczniej rozprzestrzeniających się koncepcji zarówno w obszarze nauk przyrodniczych, jak i humanistycznych. Dyskutuje się o nim na polu historii, filozofii, prawa, a także dyscyplin skoncentrowanych na *anthropos*, takich jak archeologia czy antropologia, oraz zajmujących się globalnymi zmianami środowiskowymi, jak klimatologia i ochrona przyrody<sup>2</sup>.

Zasadniczo jest to jednak pojęcie geologiczne, odnoszące się do nowego epizodu w długiej historii naszej planety, choć Paul Crutzen, który je ukuł, był laureatem Nagrody Nobla w dziedzinie chemii (atmosfery), a nie geologii (jednakowoż propozycję tę wysunął podczas dyskusji IGBP na temat geologicznych świadectw globalnych zmian). Istotą sprawy jest to, aby antropocen był przekonujący jako okres odmienny wobec nie tylko tysięcy lat historii człowieka, ale także 4,5 mld lat trwania naszej planety. To właśnie stanowi o jego sile – ale jest to roszczenie poważne, a takowe – tak w nauce, jak w sądzie – musi opierać się na mocnych dowodach.

Zadanie jest tym trudniejsze, że takie dowody, wykorzystywane w procesie walidacji<sup>3</sup> nowych jednostek geochronologicznych, obejmujące wskazówki dotyczące przeszłości Ziemi, uzyskane w wyniku geologicznych badań warstw skalnych muszą następnie zostać po-

1 Crutzen, P.J. (2002), *Geology of Mankind*, „Nature”, 415 (6867), s. 23.

2 Zalasiewicz, J. i in. (2021), *The Anthropocene. Comparing Its Meaning in Geology (Chronostratigraphy) with Conceptual Approaches Arising in Other Disciplines*, „Earth’s Future”, 9 (3).

3 W jego toku propozycje nowych geologicznych jednostek czasowych, jak antropocen, są rygorystycznie oceniane przez rozmaite składowe Międzynarodowej Komisji Stratygrafii (International Commission on Stratigraphy, ICS – ciało naukowe czuwające nad tabelą stratygraficzną): zob. Waters, C.N. i in. (2018), *A Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) for the Anthropocene Series. Where and How to Look for Potential Candidates*, „Earth-Science Reviews”, 178.

równane ze zmianami, o których myśleli Paul Crutzen i jego koleżanki\_dzy: dotyczącymi klimatu, zanieczyszczeń przemysłowych, skutków urbanizacji czy uprawy roli według nowoczesnych modeli. Na pierwszy rzut oka może się wydawać, że te dowody i zmiany należą do zupełnie różnych porządków, dlatego należy wypracować skuteczne sposoby porównywania naszego młodego, nowoczesnego, technologicznego świata z fizycznie mierzalnymi, ale (przynajmniej dla ludzkiego umysłu) niewyobrażalnie długimi eonami prehistorii naszej planety. Stanowi to nie lada wyzwanie – lecz nie jest to, jak sądzimy, niemożliwe.

Koncentrujemy się tu na porównaniu współczesnych zmian klimatu z naszym rozumieniem tego, jak klimat zmieniał się w przeszłości. Takie porównanie jest użyteczne, a nawet ze względów krytycznych ważne, gdyż pokazuje, w jaki sposób można tworzyć powiązania między teraźniejszością a odległą przeszłością, a także na podstawie czego klimat jest coraz częściej traktowany jako fundamentalny – być może najważniejszy – regulator zdolności Ziemi do podtrzymywania życia, także naszego. Być może trudno zdać sobie sprawę z powagi sytuacji, jeśli uwzględnić nasze osobiste doświadczenia dotyczące zmieniającej się jak w kalejdoskopie pogody oraz naszą ogólną świadomość tego, że klimat bywał w przeszłości bardzo odmienny, jak w czasie geologicznie nie tak znów odległych epok lodowcowych, które ukształtowały krajobraz, który znamy dziś. Jednak świadectwa zapisane w skałach ukazują, jak ściśle życie i klimat są powiązane. Kiedy już uświadomimy sobie siłę i znaczenie tych połączeń oraz pojmiemy faktyczną prędkość i skalę zachodzących obecnie zmian, nie sposób myśleć o nich bez niepokoju, a nawet głębokiej troski o losy przyszłych pokoleń. Stawka w tej grze naprawdę nie może być już wyższa.

**Klimat jest coraz częściej traktowany jako fundamentalny – być może najważniejszy – regulator zdolności Ziemi do podtrzymywania życia.**

### Klimat Ziemi w warstwach geologicznych

Obfitość, różnorodność i stopień szczegółowości świadectw geologicznych, dających podstawy dla powyższych spostrzeżeń, nie są powszechnie znane. Muzea koncentrują się na rzadkich, spektakularnych znaleziskach z przeszłości Ziemi – dinozaurach, mamutach, pterodaktylach itp., przez co łatwo przeoczyć liczne odmienne narracje historii planetarnej zapisane w warstwach geologicznych, a które można odśłonić dzięki cierpliwym i twórczym badaniom naukowym. Zresztą dlatego że zamieszkujemy żywą planetę, w większości pokrytą roślinnością, wieloma warstwami żyznych gleb i głębokimi oceanami, rzadko mamy okazję przyjrzeć się kryjącym się pod nimi warstwom skalnym, mającym wiele kilometrów grubości i liczącym sobie miliony lat.

Często nie zdajemy sobie nawet sprawy z samej natury tych niezliczonych warstw. Każda z nich stanowi piętro osadu (zazwyczaj

stwardniałego już do postaci skały) reprezentujące pewien wycinek powierzchni Ziemi w określonym geologicznym momencie przeszłości – może to być część dna morza, jeziora, koryta rzeki lub plaży, być może rozlewiska, gleby albo pustynnej wydmy. Każda warstwa może zawierać niezliczone wskazówki, jak wyglądał świat w czasie jej formowania. Mogą nimi być różnego rodzaju pokruszone minerały, skamieniałości roślin i zwierząt lub skład chemiczny osadu. I tak, warstwa za warstwą, powstaje niemal nieskończona liczba, najczęściej podwodnych krajobrazów, z których każdy pogrzebany jest przez ten przy-

**Świadectwa zapisane w skałach ukazują, jak ściśle życie i klimat są powiązane. Kiedy już uświadomimy sobie siłę i znaczenie tych połączeń oraz pojmiemy faktyczną prędkość i skalę zachodzących obecnie zmian, nie sposób myśleć o nich bez niepokoju, a nawet głębokiej troski o losy przyszłych pokoleń. Stawka w tej grze naprawdę nie może być już wyższa.**

krywający go, które kryją w sobie historię będącą nie statycznym kadrem, lecz czymś na podobieństwo klatek filmowych pokazujących zmieniające się warunki życia w tej części Ziemi, którą dane warstwy

reprezentują. Rzecz jasna świadectwa nie zawsze są kompletne – zdarzają się luki i przeoczenia – a seans jest bardzo długi! Sama długość trwania Ziemi stanowi jeden z głównych problemów w uzgadnianiu naszej planetarnej narracji o klimacie. Jednak na przestrzeni mniej więcej ostatnich 50 lat, kiedy to paleoklimatologia wyłoniła się i rozwijała jako odrębna dyscyplina geologii, nie ustawano w opracowywaniu solidnego i coraz bardziej szczegółowego obrazu historii klimatu<sup>4</sup>.

Na opowieść zatem składają się wskazówki zawarte w warstwach skał. Nie lada wysiłkiem było pokazanie nie tylko tego, jak klimat się zmieniał, ale i wyjaśnienie tych zmian: poprzez rekonstruowanie konfiguracji sił kształtujących klimat w przeszłości z wykorzystaniem komputerowych modeli numerycznych dawnego klimatu, podobnych do budowanych przez (często te \_ych same \_ych) naukowczyni\_ców modeli mających pokazać prognozy klimatyczne w bliższej i dalszej przyszłości, w nadchodzących dekadach i wiekach. Najczęściej chodzi o tworzenie modeli ogólnej cyrkulacji (General Circulation Models, GCM), które dzielą Ziemię na trójwymiarowe komórki siatki. Dla każdej z nich obliczane są istotne dla klimatu zmienne, jak ciepło pochodzące od Słońca, ilość tego ciepła, która jest odbijana lub ponownie wypromieniowana, stężenie gazów cieplarnianych zatrzymujących ciepło w atmosferze powyżej, ilość opadów w porównaniu do parowania itp.<sup>5</sup> Następnie każda komórka musi zostać powiązana z sąsiednimi, aby wyłonił się regionalny lub globalny obraz klimatu. Działanie programu – o ogromnej mocy obliczeniowej – dostarcza przykładowo wyobrażeń na temat wzorców globalnego rozkładu temperatury, opadów czy cyrkulacji oceanicznej lub atmosferycznej. Stopień, w którym te wyobrażenia (zawsze orientacyjne, lecz w miarę zwiększania się moż-

4 Zalasiewicz, J., Williams, M. (2021), *Climate Change through Earth's History*, w: Letcher, T. (red.), *Climate Change. Observed Impacts on Planet Earth*. Amsterdam: Elsevier.

5 NOAA Climate.gov [b.r.], *Climate Models*, NOAA Climate.gov: [climate.gov/maps-data/primer/climate-models](https://climate.gov/maps-data/primer/climate-models) [dostęp: 29.09.2021].

liwości komputerów coraz precyzyjniejsze) odzwierciedlają rzeczywistość, może być następnie optymalizowany przez zestawianie ich z innymi danymi. Dla aktualnych potrzeb można porównywać model z zaobserwowaną i zarejestrowaną rzeczywistością klimatyczną oraz korygować go tak długo, aż się do niej zbliży. Dla potrzeb zamierchłej przeszłości takie „pomiaru terenowe” przeprowadza się za sprawą porównań z niezależnymi dowodami dotyczącymi temperatury, wilgotności/suchości oraz kierunków prądów morskich/powietrznych zachowanymi w zapisie skalnym<sup>6</sup>. Zwiększenie precyzyjności modeli klimatu, teraźniejszego i przeszłego, pomoże nam wykorzystywać je do tego, co jest ich głównym przeznaczeniem, czyli do przewidywania klimatu niedalekiej przyszłości, w świecie, w którym przyjdzie żyć naszym dzieciom i wnukom (i ich dzieciom i wnukom).

### Od archaiku...

Na najdawniejszej z Ziemi, z którą jesteśmy stosunkowo sensownie obeznani, podczas eonu zwanego archaikiem, który zaczął się ok. 4 mld lat temu, warunki były tak inne od dzisiejszych, że zarówno świadectwa geologiczne, jak i próby modelowania klimatu tamtych czasów są obciążone znaczną niepewnością (przy czym nasza wiedza o pierwszej połowie miliarda lat historii Ziemi, eonie trafnie nazwanym hadeikiem<sup>7</sup>, jest jeszcze wątlejsza – tak bardzo, że w niniejszym rozdziale możemy w ogóle pominąć ten okres). Niemniej Ziemia archaiku (w przeciwieństwie do Ziemi hadeiku) pozostawiła nam do przeanalizowania garść świadectw przedstawiających tamten okres w postaci zachowanych z tamtych czasów warstw: rozproszonych, wysoce fragmentarycznych, silnie zmodyfikowanych na skutek pogrzebania głęboko w Ziemi na tak długo – niemniej warstw zawierających wskazówki, jaka była wtedy

6 Zob. Haywood, A.M. i in. (2019), *What Can Palaeoclimate Modelling Do for You?*, „Earth Systems and Environment”, 3 (1).

7 Hades to w mitologii greckiej bóg podziemnego świata zmarłych [przyp. M.P.].



powierzchnia Ziemi. I z nich zrodziło się pierwsze (z wielu) zaskoczenie dotyczące klimatu Ziemi. Świat był wtedy ciepły, choć nie powinien.

Ziemia powinna była być zimna – wręcz zamrażnięta – ponieważ Słońce, gwiazda w naszej galaktyce pospolitego rodzaju, ma ściśle określone dzieje – bardzo powolnego nagrzewania się przez całą swoją długą historię. W archaiku Słońce było ok. 25% chłodniejsze<sup>8</sup>, zatem Ziemia powinna była być na tyle zimna, że pokrywałby ją lód. Ale nie była. Nawet fragmenty warstw, które ocalały z tych bardzo zamierzchłych czasów, pokazują to w sposób niebudzący wątpliwości, ponieważ lodowce pozostawiają oczywiste ślady swej działalności w krajobrazie oraz w nagromadzonych osadach, w szczególności w postaci chaotycznej mieszaniny piasku, mułu oraz porysowanych lodem głazów, czyli gliny zwałowej. Żadne skamieniałe odpowiedniki takich charakterystycznych polodowcowych skał osadowych nie zostały wykryte w zapisie odnoszącym się do wczesnego archaiku, co sugeruje, że świat był przynajmniej na tyle ciepły, by nie istniały zlodowacenia. Co sprawiało, że był ciepły? Skoro Słońce grzało słabiej, Ziemia musiała mieć coś w rodzaju cieplejszego płaszcza atmosferycznego – prawdopodobnie ze znacznie wyższymi stężeniami dwutlenku węgla i metanu niż obecnie, co skutkowało większym efektem cieplarnianym<sup>9</sup>.

Pierwsza poważna zmiana klimatu, o której wiemy, miała miejsce ok. 3–2,5 mld lat temu, kiedy to, być może 2 lub 3 razy, Ziemia istotnie zamarzała, a lądolód pokrył krajobraz, by pozostawić po sobie wspomniane charakterystyczne warstwy osadów glacialnych (polodowcowych), które nadal jeszcze odnajdujemy i które możemy obecnie

8 Cnossen, I. i in. (2007), *Habitat of Early Life. Solar X-ray and uv Radiation at Earth's Surface 4–3.5 Billion Years Ago*, „Journal of Geophysical Research. Planets”, 112 (E2).

9 ESRL'S GML of NOAA – Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory of the National Oceanic and Atmospheric Administration [b.r.], *Basics of the Carbon Cycle and the Greenhouse Effect*, „GML – ESRL – NOAA”: [esrl.noaa.gov/gmd/education/carbon\\_toolkit/basics.html](http://esrl.noaa.gov/gmd/education/carbon_toolkit/basics.html) [dostęp: 29.09.2021].

badać<sup>10</sup>. Ponieważ działo się to, kiedy Słońce powoli się nagrzewało, coś musiało uszkodzić – lub rozbić – szklarnię archaiku. Istnieją przypuszczenia, że związek z tą zmianą klimatu miało wczesne (wtedy wyłącznie mikrobiologiczne) życie, drobnoustroje, które wykształciły zdolność do fotosyntezy z wykorzystaniem promieniowania słonecznego, wody i dwutlenku węgla zawartego w powietrzu i jako produkt uboczny zaczęły uwalniać do atmosfery tlen. Ów tlen – podobnie jak czerwienie (rdzewienie) krajobrazu – utleniałby metan z atmosfery, przekształcając go w gaz cieplarniany o słabszym działaniu – dwutlenek węgla. Obecnie wydaje się, że to najbardziej przekonujący mechanizm ochładzania wczesnej Ziemi tego okresu<sup>11</sup>.

Kolejny eon, zwany proterozoikiem, jest godny uwagi ze względu na 2 zupełnie różne i pozbawione podobieństw fazy. Jego wczesna część była okresem umiarkowanego ciepła, tak długim i stabilnym, że geologowie nazwali go „nudnym miliardem”<sup>12</sup>. W prawdziwie rewolucyjnych (w kategoriach klimatycznych) czasach, jak obecne, warto mieć w pamięci to, że Ziemia, pozostawiona sama sobie, nie zawsze podlega ciągłym przemianom: okresy stabilności (nieco w tym przypadku tajemnicze) mogą trwać bardzo długo. Nudny miliard zakończył się ostatecznie w dobitnie nienudnym stylu, najsroższym zlodowaceniem, jakie kiedykolwiek dotknęło naszą planetę: „Ziemią śnieżką”, kiedy to na 2 długie okresy lód pokrył większość (a niekiedy wydaje się, że praktycznie całość) zarówno kontynentów, jak i oceanów, aż po równik<sup>13</sup>, sprawiając, że Ziemia bardziej przypominała któryś z księżyców

10 Tang, H., Chen, Y. (2013), *Global Glaciations and Atmospheric Change at ca. 2.3 Ga*, „Geoscience Frontiers”, 4 (5).

11 Kopp, R.E. i in. (2005), *The Paleoproterozoic Snowball Earth. A Climate Disaster Triggered by the Evolution of Oxygenic Photosynthesis*, „PNAS”, 102 (32).

12 Mukherjee, I. i in. (2018), *The Boring Billion, a Slingshot for Complex Life on Earth*, „Scientific Reports”, 8 (4432).

13 Hoffman, P.F. i in. (2017), *Snowball Earth Climate Dynamics and Cryogenian Geology-geobiology*, „Science Advances”, 3 (11).

zewnątrznych planet Układu Słonecznego, jak Europa czy Tytan, niż gościnną planetę o umiarkowanym klimacie, którą znamy.

Hipoteza Ziemi śnieżki jest wciąż szeroko dyskutowana, a wiele z jej wątków nadal stanowi zagadkę. Początek tego okresu wyjaśniano rozmaicie, być może najbardziej przekonujące jest mówienie o konsekwencji wycofania z atmosfery wielkich ilości dwutlenku węgla w wyniku procesów chemicznego wietrzenia olbrzymiego obszaru skał wulkanicznych oraz pogrzebienia materii organicznej w osadach na dnie oceanu<sup>14</sup>. Natomiast co do jego zakończenia – coraz jaśniejsze staje się, że było ono nagłe, co w warstwach skalnych uwidacznia się w ostrym jak brzytwa przejściu od osadów glacialnych (polodowcowych) do wapieni typowych dla ciepłych wód. Uzmysławia to nam, że planeta może zmienić klimat gwałtownie i globalnie. Do tej zmiany doszło najprawdopodobniej w wyniku nagromadzenia wydzielanego przez wulkany dwutlenku węgla. Miało to miejsce powyżej powierzchni zbyt zamrożonej, aby możliwe było wchłanianie go w wyniku reakcji ze skałami bądź jego rozpuszczenie w wodzie morskiej. Tak oto stężenie gazu rośnie, aż było na tyle wysokie, aby jego efekt cieplarniany zaczął działać w kontrze do globalnej lodowej skorupy. Gdy tylko osiągnęło ono ten poziom, szybko nastąpił kres zlodowacenia<sup>15</sup>.

**Planeta może zmienić klimat gwałtownie i globalnie.**

Ostatnie 0,5 mld lat – „normalne” dla nas czasy eonu historii Ziemi zwanego fanerozoikiem, kiedy to różnorodne wielokomórkowe zwierzęta i rośliny dołączyły w biosferze do drobnoustrojów – obfitowały w zmiany klimatu, lecz żadna z nich nie była tak ekstremalna jak powstanie Ziemi śnieżki i jej pokłosie. Ówczesne zmiany klimatyczne wykazywały szereg wyraźnych prawidłowości.

14 Tamże.

15 Tamże.

W skali największej – dziesiątek do setek milionów lat – Ziemia oscylowała między długotrwałymi okresami ziąbu (ang. „*icehouse*” states), jak ten, w którym żyjemy, kiedy to duże ilości lodu permanentnie pokrywają strefy podbiegunowe, utrzymując takie ilości wody w stanie zamrożenia, że poziom morza jest obniżony o 100 lub więcej metrów, oraz okresami cieplarnianymi (ang. „*greenhouse*” states) z niewielką ilością lodu polarnego lub bez niego. Przez większość ery mezozoicznej („środkowa trzecia” eonu fanerozoicznego) i w początkach ery kenozoicznej („ostatnia trzecia”, w której wciąż żyjemy) panował tego rodzaju klimat. Tropiki były wtedy niewiele gorętsze niż dziś, lecz strefy podbiegunowe były znacznie cieplejsze, o ok. 40°C, i wilgotniejsze, wskutek czego łąd pokrywały „polarne lasy”, które w mezozoiku zamieszkiwały „polarne dinozaury”<sup>16</sup>.

Owe czasy cieplarniane były ciepłe, ale mogły stawać się jeszcze cieplejsze w ramach (geologicznie) krótkich wydarzeń, które nazwano „hipertermiami” (lp. hipertermialium; okresy ekstremalnego gorąca, okresy hipertermiczne; ang. *hyperthermals*), a które przekonująco powiązано z nagłymi masowymi transferami gazów cieplarnianych (dwutlenku węgla i/lub metanu) ze źródeł podziemnych do systemu oceanicznego/atmosferycznego<sup>17</sup>. Najlepiej rozpoznany z nich jest „paleoceńsko-eoceńskie maksimum termiczne” sprzed 55 mln lat, o którym sądzi się dziś, że doprowadziła do niego wzmożona aktywność wulkanów towarzysząca procesom wyłaniania się Oceanu Atlantyckiego, która uwolniła do powietrza kilka bilionów ton dwutlenku węgla<sup>18</sup>. Ocieplanie (globalnie o ok. 5°C) trwało prawdopodobnie przez kilka mileniów, podczas gdy ochładzanie i powrót do stanu wyjścio-

16 Godefroit, P. i in. (2009), *The Last Polar Dinosaurs. High Diversity of Latest Cretaceous Arctic Dinosaurs in Russia*, „Naturwissenschaften”, 96 (4).

17 Cohen, A.S. i in. (2007), *The Late Palaeocene – Early Eocene and Toarcian (Early Jurassic) Carbon Isotope Excursions. A Comparison of Their Time Scales, Associated Environmental Changes, Causes and Consequences*, „Journal of the Geological Society”, 164 (6).

18 Gutjahr, M. i in. (2017), *Very Large Release of Mostly Volcanic Carbon during the Palaeocene–Eocene Thermal Maximum*, „Nature”, 548 (7669).

wego (jako że dwutlenek węgla był pochłaniany z atmosfery w wyniku wchodzenia w reakcje ze skałami w ramach chemicznego wietrzenia oraz przez przykrywanie osadu o wysokiej zawartości węgla) zajęło ok. 100 tys. lat<sup>19</sup>. Jest to obecnie dogłębnie badane w celu dowiedzenia się, jaki może być prawdopodobny przebieg wywołanego przez człowieka obecnego incydentu uwolnienia dwutlenku węgla<sup>20</sup>.

Koniec mezozoicznej/wczesno kenozoicznej cieplarni nastąpił nieco ponad 33 mln lat temu, w miarę gwałtownego (trwającego ok. 200 tys. lat) przyrostu lodu na Antarktydzie, który przekształcił ten kontynent w pokrytą lodem pustynię, jaką znamy dziś<sup>21</sup>. Był to kolejny przełom w klimatycznej historii Ziemi, w praktyce stanowiący geologicznie nagłą przemianę jednego typu planety w zupełnie inny. Powiązano go z długotrwałym spadkiem stężenia dwutlenku węgla w atmosferze – z ok. 800 części na 1 mln (ang. *parts per milion* – ppm) do ok. 400 ppm – spowodowanym z kolei być może zmianami względnych pozycji kontynentów i oceanów związanych z tektoniką płyt<sup>22</sup>.

Dziś wciąż znajdujemy się w tymże okresie ziąbu (ang. *icehouse state*), choć w nieco wyraźniejszej jego fazie, którą nazywamy okresem czwartorzędu, a która rozpoczęła się ok. 2,6 mln lat temu, gdy znaczne ilości lodu zaczęły przyrastać w północnej strefie podbiegunowej oraz na biegunie południowym<sup>23</sup>. Stan ten charakteryzuje się licznymi wyraźnymi prawidłowościami, przede wszystkim wieloma rytmicznymi oscylacjami między okresami „lodowcowymi” (glacjami; kiedy lód napiera, by – przykładowo – pokryć sporą część Polski) oraz „między-

- 19 Bowen, G.J., Zachos, J.C. (2010), *Rapid Carbon Sequestration at the Termination of the Paleocene-Eocene Thermal Maximum*, „Nature Geoscience”, 3 (12).
- 20 Burke, K.D. i in. (2018), *Pliocene and Eocene Provide Best Analogs for Near-future Climates*, „PNAS”, 115 (52).
- 21 Lear, C.H. i in. (2008), *Cooling and Ice Growth across the Eocene–Oligocene Transition*, „Geology”, 36 (3).
- 22 Pearson, P.N. i in. (2009), *Atmospheric Carbon Dioxide through the Eocene–Oligocene Climate Transition*, „Nature”, 461 (7267).
- 23 Haug, G.H. i in. (2005), *North Pacific Seasonality and the Glaciation of North America 2.7 Million Years Ago*, „Nature”, 433 (7028).

lodowcowymi” (interglacjami), gdy lód się cofa. Oscylacje te zgodnie wiąże się dziś z regularnymi astronomicznymi zmianami w ruchu obiegowym i obrotowym Ziemi (zwanymi cyklami Milankowicia, od nazwiska serbskiego matematyka, który szczegółowo opisał je na początku xx w.). Te z kolei wpływają na ilość i okresowy rozkład promieniowania słonecznego przyjmowanego przez powierzchnię Ziemi<sup>24</sup>. Owe wariacje w zakresie promieniowania słonecznego są niewielkie, właściwie zbyt małe, aby wywoływać znaczne różnice między lodowcowymi i międzylodowcowymi fazami Ziemi w okresie ziąbu (*icehouse state*), a zatem muszą być wzmacniane, aby mieć tak duży wpływ.

Charakter tego wzmocnienia można odczytać ze szczególnego rodzaju warstw – gromadzących się na sobie rok po roku i ściskanych warstw śnieżnych, które utworzyły czapy lodowe Grenlandii i Antarktydy. Wiedzę o najwcześniejszych dziejach, jak na razie sięgającą nieprzerwanie ponad 1 mln lat wstecz, zaczerpnięto z Antarktydy, przez wywiercanie i badanie rdzeni z grubego na 4 km lądolodu<sup>25</sup>. Lód składa się z warstw wiekowego śniegu (ang. *fossil snow*) (jego skład chemiczny wskazuje na lokalną temperaturę) zawierających uwiecznione pęcherzyki powietrza z czasu jego opadów (ang. *fossil air*), które można analizować, aby uzyskać precyzyjne pomiary stężenia dwutlenku węgla (i innych gazów) w powietrzu w danym czasie. Warstwy lodu w zachwycających detalach ukazują prawidłowości Milankowicia związane z rosnącą i spadającą temperaturą, do nich zaś jak ulał pasują wzrosty i spadki poziomów dwutlenku węgla, które w ciągu ostatnich 800 tys. lat wahały się od ok. 180 ppm (w czasach lodowcowych) do ok. 280 ppm (w czasach międzylodowcowych)<sup>26</sup>. Przyjmuje się obecnie, że promieniowanie

24 Hays, J.D. i in. (1976), *Variations in the Earth's Orbit. Pacemaker of the Ice Ages*, „Science”, 194 (4270).

25 Wolff, E.W. (2008), *The Past 800 ka Viewed through Antarctic Ice Cores*, „Episodes”, 31 (2).

26 Petit, J.R. i in. (1999), *Climate and Atmospheric History of the Past 420,000 Years from the Vostok Ice Core, Antarctica*, „Nature”, 399 (6735). Zob. też: EPICA Community Members (2006), *One-to-one Coupling of Glacial Climate Variability in Greenland and Antarctica*, „Nature”, 444 (7116).

słoneczne wywoływało zmiany w prądach morskich, które z kolei albo uwalniały dwutlenek węgla z oceanu (w którym magazynowane są olbrzymie ilości węgla) do powietrza, albo pochłaniały go na powrót z atmosfery, znacznie przyczyniając się do zmian klimatycznych<sup>27</sup>. Mamy tu do czynienia z niezwykle jednostajnie i sprawnie działającą maszyną klimatyczną. Wykazywała ona zmiany (na przykład mniej więcej 1 mln lat temu wystąpiła stopniowa zmiana dominującego rodzaju cyklu astronomicznego znajdującego odzwierciedlenie w klimacie, kiedy to okresy lodowcowe stały się nieco zimniejsze, a międzylodowcowe nieco cieplejsze<sup>28</sup>), lecz przez długi czas panowała stabilność, ze zmianami klimatu wyraźnymi, ale zachodzącymi w określonych granicach<sup>29</sup>. Ta przewidywalność była skądinąd dobra dla życia i jego różnorodności. Biosfera Ziemi dostrajała się do rytmu zmian klimatu zachodzących na przestrzeni dziesiątek tysięcy lat, w miarę jak zwierzęta i rośliny zmieniały obszary zamieszkiwania i rozmiary populacji, aby nadażyć i dostosować się do zmieniających się stref klimatycznych; w czwartorzędzie (dopóki ludzie na poważnie nie zaczęli polować), ogólnie rzecz ujmując, rozmiary wymierania były dość skromne<sup>30</sup>.

### ...po antropocen

Stabilność właśnie się kończy. Cywilizacja ludzka skorzystała z ostatnich jej przejawów, 11 mileniów okresu międzylodowcowego zwanego przez nas holocenem, w którym nadal (formalnie) żyjemy. Stabilność temperatury oraz (od ok. 7 tys. lat, kiedy to główna faza topnienia lodów

27 Skinner, L.C. i in. (2010), *Ventilation of the Deep Southern Ocean and Deglacial CO<sub>2</sub> Rise*, „Science”, 328 (5982).

28 Willeit, M. i in. (2019), *Mid-Pleistocene Transition in Glacial Cycles Explained by Declining CO<sub>2</sub> and Regolith Removal*, „Science Advances”, 5 (4).

29 Więcej o tych prawidłowościach m.in. tu: Lisiecki, L.E., Raymo, M.E. (2005), *A Pliocene-Pleistocene Stack of 57 Globally Distributed Benthic δ18O Records*, „Paleoceanography”, 20 (1).

30 Koch, P.L., Barnosky, A.D. (2006), *Late Quaternary Extinctions. State of the Debate*, „Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics”, 37.

dobiegła końca<sup>31</sup>) poziomu morza umożliwiły rozwój i szerzenie się rolnictwa i urbanizacji, w tym powstawania miast przybrzeżnych, które ułatwiły handel międzynarodowy, a następnie umożliwiły wymianę międzykontynentalną. Rdzenie lodowe i ich wiekowe pęcherzyki powietrza pokazują jednoznacznie, że przez cały ten długi (w kategoriach ludzkiego życia) okres stężenia atmosferycznego dwutlenku węgla utrzymywały się na prawie stałym poziomie, między 265 a 280 ppm, obniżając się niezwykle powoli przez pierwszych kilka tysięcy lat. Następnie, ok. 7 tys. lat temu, zaczęły równie delikatnie i powoli rosnąć, co mogło (dane nie są jednoznaczne) być konsekwencją z wolna rozwijającego się rolnictwa<sup>32</sup> i co również mogło (i tutaj dowody wydają się silniejsze) zapobiec powrotowi Ziemi do okresu lodowcowego<sup>33</sup>.

Rewolucja przemysłowa, oparta na przeogromnej i stale rosnącej produkcji energii z węgla, a następnie z ropy i gazu<sup>34</sup>, zaburzyła tę (być może będącą wynikiem szczęśliwego zbiegu okoliczności) równowagę klimatyczną. Rdzenie lodowe pokazują, że globalne skutki zaczęły być odczuwalne od ok. 1850 r., kiedy to poziomy dwutlenku węgla zaczęły przekraczać 280 ppm. Do 1950 r. wzrosły one do 310 ppm – co już oznaczało wartości wyższe niż kiedykolwiek w ciągu ostatnich 800 tys. lat. Następnie miał miejsce nagły skok związany z powojennym „Wielkim Przyspieszeniem” populacji, uprzemysłowienia i globalizacji<sup>35</sup>. Obecnie, zaledwie 70 lat później, poziomy przekraczają 410 ppm<sup>36</sup>

31 Lambeck, K. i in. (2014), *Sea Level and Global Ice Volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene*, „PNAS”, 111 (43).

32 Ruddiman, W.F. (2003), *The Anthropogenic Greenhouse Era Began Thousands of Years Ago*, „Climatic Change”, 61 (3).

33 Ganopolski, A. i in. (2016), *Critical Insolation – CO<sub>2</sub> Relation for Diagnosing Past and Future Glacial Inception*, „Nature”, 529 (7585).

34 Syvitski, J. i in. (2020), *Extraordinary Human Energy Consumption and Resultant Geological Impacts Beginning around 1950 CE Initiated the Proposed Anthropocene Epoch*, „Communications Earth & Environment”, 1 (1).

35 Steffen, W. i in. (2015), *The Trajectory of the Anthropocene. The Great Acceleration*, „The Anthropocene Review”, 2 (1).

36 Zob. Fig. 5 w: Waters, C.N. i in. (2016), *The Anthropocene Is Functionally and Stratigraphically Distinct from the Holocene*, „Science”, 351 (6269).



(i bardzo przypominają te, które wskazywane są dla stosunkowo ciepłej epoki pliocenu sprzed ok. 3 mln lat<sup>37</sup>, która poprzedzała zlodowacenia czwartorzędu) – i nic dziwnego, skoro wyliczenia pokazują, że ludzkość od 1950 r. zużyła więcej energii, pochodzącej głównie z węglowodorów kopalnych, niż przez poprzedzające ten czas całe 11 mileniów holocenu<sup>38</sup>. Jest to ogromny skok. Globalna temperatura musi jeszcze nadgonić (ponieważ Ziemia jest rozległym obiektem i potrzeba czasu, aby dodatkowe ciepło rozprzestrzeniło się poprzez powietrze, oceany i skały skorupy ziemskiej). Jednak już teraz efekt dodatkowego ogrzewania (w przypadku oceanów odpowiadający wlewaniu do morza ok. 1 mld filiżanek gorącej herbaty co sekundę<sup>39</sup>) zaczyna w widoczny sposób wpływać na podwyższenie temperatury na świecie, z wszelkimi tego konsekwencjami, które zaczynamy odczuwać, a z pewnym opóźnieniem prowadzi także do topnienia lodu polarnego i wzrostu poziomu morza<sup>40</sup>.

Wielki wzrost dwutlenku węgla czasów „Wielkiego Przyspieszenia” może być bezprecedensowym zjawiskiem w historii Ziemi, jeśli chodzi o jego tempo, obliczane jako szybsze niż to związane z paleocean-skoeceńskim maksimum termicznym, być może o rząd wielkości<sup>41</sup>. Zgrabnie symbolizuje ono proponowaną epokę antropocenu (gdyż linia na wykresie koncentracji CO<sub>2</sub> zmienia się z niemal poziomej na

37 Tierney, J.E. i in. (2019), *Pliocene Warmth Consistent with Greenhouse Gas Forcing*, „Geophysical Research Letters”, 46 (15).

38 Zob. Syvitski, J. i in. (2020), *Extraordinary Human Energy Consumption...*

39 Cyt. za: Thomas, J.A. i in. (2020), *The Anthropocene. A Multidisciplinary Approach*. Cambridge: Polity, s. 76–77. Dane za: Zanna, L. i in. (2019), *Global Reconstruction of Historical Ocean Heat Storage and Transport*, „PNAS”, 116 (4).

40 Rignot, E. i in. (2019), *Four Decades of Antarctic Ice Sheet Mass Balance from 1979–2017*, „PNAS”, 116 (4); The IMBIE team (2018), *Mass Balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017*, „Nature”, 558 (7709).

41 Zeebe, R.E. i in. (2016), *Anthropogenic Carbon Release Rate Unprecedented during the Past 66 Million Years*, „Nature Geoscience”, 9 (4).

prawie pionową<sup>42</sup>), choć stanowi tylko jedną składową tej ogromnej, zachodzącej obecnie zmiany systemu Ziemi. Inne zjawiska charakterystyczne dla antropocenu, takie jak ogromny przyrost ilości betonu, tworzyw sztucznych i rozprzestrzenianie się gatunków inwazyjnych, są aktualnie łatwiej dostrzegalne pod względem geologicznym<sup>43</sup> i bardziej przyciągają uwagę.

Jednak to klimat ma fundamentalne znaczenie dla kształtowania się powierzchni planety i życia na niej. Z plioceńską atmosferą prawdopodobnie skończymy z plioceńskim globalnym klimatem i poziomem morza (być może o 20 m wyższym, a więc wyjątkowo problematycznym dla miast wybudowanych wzdłuż obecnej linii brzegowej)<sup>44</sup>. A kolejne stulecie emisji dwutlenku węgla w scenariuszu jak-gdyby-nigdy-nic (ang. *business as usual*) prawdopodobnie doprowadzi do przekroczenia tego stanu w kierunku „Ziemi supercieplarnianej” (ang. *hothouse Earth*) o atmosferze eoceńskiej, gwałtownie cofając ewolucję klimatyczną o ok. 50 mln lat<sup>45</sup>. Jest to rodzaj stanu klimatycznego, którego w miarę postępowania antropocenu wciąż jeszcze można uniknąć – i najlepiej byłoby to zrobić.

Co zatem możesz zrobić ty, jako czytelniczka\_k (i twoja rodzina, przyjaciółki\_ele i współpracownicy\_y, jako tylko nieliczne\_i spośród miliardów ludzkich istot), z tym wyłaniającym się właśnie ogólnoplanetarnym położeniem – krytycznym<sup>46</sup> dla nas wszystkich i w rzeczy samej

42 Zob. Fig. 1 w: Zalasiewicz, J. i in. (2019), *A Formal Anthropocene Is Compatible with but Distinct from Its Diachronous Anthropogenic Counterparts. A Response to W.F. Ruddiman's „Three Flaws in Defining a Formal Anthropocene”*, „Progress in Physical Geography. Earth and environment”, 43 (3).

43 Zob. Syvitski, J. i in. (2020), *Extraordinary Human Energy Consumption...*

44 Burke, K.D. i in. (2018), *Pliocene and Eocene Provide Best Analogs...* Zob. także: Clark, P.U. i in. (2016), *Consequences of Twenty-first-century Policy for Multi-millennial Climate and Sea-level Change*, „Nature Climate Change”, 6 (4).

45 Burke, K.D. i in. (2018), *Pliocene and Eocene Provide Best Analogs...*

46 „Krytyczne położenie”, ang. *predicament* – zdecydowałem się na „krytyczne” – a nie np. „kłopotliwe” czy „trudne” – „położenie” z uwagi na oczywistą powagę sytuacji, jak również z powodu takiegoż tłumaczenia tego terminu w przedmowie Klubu Rzymskiego do jego raportu dotyczącego „krytycznego położenia ludzkości”; pełny

dla wszystkich żywych organizmów na Ziemi? Wydaje się, że to zadanie wykracza daleko poza możliwości jakiegokolwiek osoby czy grupy ludzi, nie tylko ze względu na konieczność stawienia czoła omówionym potężnym siłom o naturze globalnej, ale z powodu tego, co determinuje ludzką naturę – dążenie do bogacenia się i władzy – a to napędza zmiany klimatyczne. Niemniej jest to zjawisko, które można badać (a przed akademikami wszystkich dyscyplin otwiera się tu mnóstwo nowych interakcji i połączeń, które należy wykorzystać, oraz nowych kierunków badań, ku którym należy się zwrócić), o którym można uczyć nowe pokolenia studentów, o którym można dyskutować i na które można oddziaływać szerzej, w obszarze (przykładowo) zarządzania i rządzenia na wszystkich poziomach. Jest wiele do zrobienia i wiele do osiągnięcia, jeśli będziemy pracować wspólnie. A co możemy zrobić indywidualnie? Istnieje wiele sposobów, które pomogą nam zmienić nasze życie tak, aby przystawało do wyłaniającego się świata epoki antropocenu: od poddawania recyklingowi ubrań, kupowania rzeczy wykonanych z materiałów pochodzących ze zrównoważonych źródeł, przez ograniczenie spożycia mięsa, korzystanie z energii ze źródeł odnawialnych (i używania energooszczędnych urządzeń), po przywracanie ogrodom dzikości.

...

tytuł oryginału: *The Limits to Growth. A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*: Meadows, D.H. i in. (1973), *Granice wzrostu*. Tłum. Rączkowska, W., Rączkowski, S. Warszawa: pwe, s. 29. Na s. 34 można przeczytać: „Na tym właśnie polega «krytyczne położenie ludzkości»: umiemy dostrzec poszczególne symptomy głębokiego niedomagania społeczeństwa, ale nie jesteśmy w stanie pojąć znaczenia i wzajemnych powiązań niezliczonych składających się na nie elementów ani rozpoznać jego podstawowych przyczyn i tym samym nie potrafimy znaleźć odpowiednich środków zaradczych” [przyj. M.P.].

### Zaproszenie do dyskusji

Tak wygląda sytuacja naszego współczesnego świata, jeśli spojrzeć na nią oczami geologów, patrzących nań raczej z perspektywy dawniejszych stanów planety. Co zatem powinniśmy my – czy ty lub wy – zrobić w tej sytuacji, która – jak zauważyła nasza koleżanka, historyczka Julia Adeney Thomas<sup>47</sup> – jest raczej złożonym, wieloaspektowym krytycznym położeniem<sup>48</sup>, w którym wszyscy będziemy musieli jakoś nauczyć się żyć i ukierunkowywać swoje działania, niż problemem, który można po prostu „rozwiązać”? Nie mamy do zaproponowania zbyt wielu mądrych rad, nie tylko dlatego że nasza nauka jest zasadniczo nauką śledczą: przypominamy raczej umiarkowanie wyspecjalizowanych diagnostyków medycznych, zdecydowanie mniej zorientowanych w tym, jakie lekarstwo należy przepisać.

Niemniej wydaje nam się jasne, że zbiorowe działania ludzkości, przede wszystkim bardzo szybkie spalanie bardzo dużych ilości paliw kopalnych, zaczynają obecnie poważnie zmieniać trajektorię klimatu Ziemi w kierunku stanu znacznie bardziej niekomfortowego i niebezpiecznego dla ludzkich społeczeństw, a nawet dla większości organizmów na Ziemi. Odsunięcie nas od tej trajektorii ku mniej niszczyielskiej będzie wymagało wiele wyobraźni, pracy i działania i prawdopodobnie będzie oznaczało zmiany idące o wiele dalej niż zwykła dekarbonizacja gospodarki z użyciem środków technicznych (choć stanowiłoby to dobry początek). Z pewnością nadszedł czas, aby zająć się tym krytycznym położeniem<sup>49</sup>.

47 Zob. Thomas, J.A. i in. (2020), *The Anthropocene...*, zwłaszcza rozdz. 1, 7, 8 oraz Thomas, J.A. (2020), *The Anthropocene Earth System and Three Human Stories*, „RCC Perspectives. Transformations in environment and society – «Strata and Three Stories»”, 3.

48 Zob. przyp. 46.

49 Tamże.

## Polecane źródła

### Historia klimatu Ziemi

- Zalasiewicz, J., Williams, M. (2021), *Climate Change through Earth's History*, w: Letcher, T. (red.), *Climate Change. Observed Impacts on Planet Earth*. Amsterdam: Elsevier, s. 49–65. (Rozdział ten dokładniej rozwija narrację historii klimatu zaproponowaną w powyższym eseju).
- Zalasiewicz, J., Williams, M. (2012), *The Goldilocks Planet. The Four Billion Year Story of Earth's Climate*. Oxford: Oxford University Press. (Narracja jest tutaj rozszerzona, zaś jej naukowe fundamenty wyjaśniono przy użyciu języka dla niespecjalistów).
- Summerhayes, C.P. (2020), *Palaeoclimatology. From Snowball Earth to the Anthropocene*. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell. (Jest to aktualne, wyczerpujące i miarodajne opracowanie dla zaawansowanych).

### Antropocen

- Zalasiewicz, J., Waters, C.N., Williams, M., Summerhayes, C.P. (red.) (2019), *The Anthropocene as a Geological Time Unit. A Guide to the Scientific Evidence and Current Debate*. Cambridge: Cambridge University Press. (Tu wyczerpująco przedstawiono geologiczne świadectwa antropocenu).
- Syvitski, J., Waters, C.N., Day, J. i in. (2020), *Extraordinary Human Energy Consumption and Resultant Geological Impacts Beginning around 1950 CE Initiated the Proposed Anthropocene Epoch*, „Communications Earth & Environment”, 1 (1), s. 1–13: [doi.org/10.1038/s43247-020-00029-y](https://doi.org/10.1038/s43247-020-00029-y). (Obszerne i świeżej daty podsumowanie, skoncentrowane na narracji i czynnikach napędzających antropocen).

Thomas, J.A., Williams, M., Zalasiewicz, J. (2020), *The Anthropocene. A Multidisciplinary Approach*. Cambridge: Polity. (Eksploracja antropocenu łącząca perspektywy nauk przyrodniczych i humanistycznych).

Thomas, J.A., Zalasiewicz, J. (2020), „*Strata and Three Stories*” – *RCC Perspectives. Transformations in Environment and Society*, 3. Do bezpłatnego pobrania: [environmentandsociety.org/perspectives/2020/3/strata-and-three-stories](https://environmentandsociety.org/perspectives/2020/3/strata-and-three-stories). (Zwięźlejsze połączenie perspektyw nauk przyrodniczych i humanistycznych).

### Wyjaśnione w słowniku

antropocen, biosfera, Milankowicia teoria/cykle, efekt cieplarniany/szklarniowy, eon/era/okres/epoka w geologii, epoki lodowcowe, geologia, hipertermalia/hipertermalium (ang. *hyperthermal/s*), modele ogólnej cyrkulacji, modelowanie klimatu, „nudny miliard”, paleoceanoeceńskie maksimum termiczne, paleoklimat, koncentracja/poziomy/stężenie dwutlenku węgla (ppm), okres ziąbu (ang. *icehouse state*), okres cieplarniany (ang. *greenhouse state*), stratygrafia, warstwy geologiczne, Wielkie Przyspieszenie, wietrzenie chemiczne, „Ziemia supercieplarniana” (ang. „*Hothouse Earth*”), „Ziemia śnieżka”, zmiana klimatu (geologia)

### BIBLIOGRAFIA

- Bowen, G.J., Zachos, J.C. (2010), *Rapid Carbon Sequestration at the Termination of the Paleocene-Eocene Thermal Maximum*, „*Nature Geoscience*”, 3 (12), s. 866–869: [doi.org/10.1038/ngeo1014](https://doi.org/10.1038/ngeo1014).
- Burke, K.D., Williams, J.W., Chandler, M.A. i in. (2018), *Pliocene and Eocene Provide Best Analogs for Near-future Climates*, „*PNAS*”, 115 (52), s. 13288–13293: [doi.org/10.1073/pnas.1809600115](https://doi.org/10.1073/pnas.1809600115).
- Clark, P.U., Shakun, J.D., Marcott, S.A. i in. (2016), *Consequences of Twenty-first-century Policy for Multi-millennial climate and Sea-level change*, „*Nature Climate Change*”, 6 (4), s. 360–369: [doi.org/10.1038/nclimate2923](https://doi.org/10.1038/nclimate2923).
- Cnossen, I., Sanz-Forcada, J., Favata, F. i in. (2007), *Habitat of Early Life. Solar X-ray and uv Radiation at Earth's Surface 4–3.5 Billion Years Ago*, „*Journal of Geophysical Research. Planets*”, 112 (E2), s. 1–10: [doi.org/10.1029/2006JE002784](https://doi.org/10.1029/2006JE002784).

- Cohen, A.S., Coe, A.L., Kemp, D.B. (2007), *The Late Palaeocene–Early Eocene and Toarcian (Early Jurassic) Carbon Isotope Excursions. A Comparison of Their Time Scales, Associated Environmental Changes, Causes and Consequences*, „Journal of the Geological Society”, 164 (6), s. 1093–1108:  
[doi.org/10.1144/0016-76492006-123](https://doi.org/10.1144/0016-76492006-123).
- Crutzen, P.J. (2002), *Geology of Mankind*, „Nature”, 415 (6867), s. 23: [doi.org/10.1038/415023a](https://doi.org/10.1038/415023a).
- EPICA Community Members (2006), *One-to-one Coupling of Glacial Climate Variability in Greenland and Antarctica*, „Nature”, 444 (7116), s. 195–198:  
[doi.org/10.1038/nature05301](https://doi.org/10.1038/nature05301).
- Ganopolski, A., Winkelmann, R., Schellnhuber, H.J. (2016), *Critical Insolation – CO<sub>2</sub> Relation for Diagnosing Past and Future Glacial Inception*, „Nature”, 529 (7585), s. 200–203: [doi.org/10.1038/nature16494](https://doi.org/10.1038/nature16494).
- Godefroit, P., Golovneva, L., Shchepetov, S. i in. (2009), *The Last Polar Dinosaurs. High Diversity of Latest Cretaceous Arctic Dinosaurs in Russia*, „Naturwissenschaften”, 96 (4), s. 495–501: [doi.org/10.1007/s00114-008-0499-0](https://doi.org/10.1007/s00114-008-0499-0).
- Gutjahr, M., Ridgwell, A., Sexton, P.F. i in. (2017), *Very Large Release of Mostly Volcanic Carbon during the Palaeocene-Eocene Thermal Maximum*, „Nature”, 548 (7669), s. 573–577: [doi.org/10.1038/nature23646](https://doi.org/10.1038/nature23646).
- Haug, G.H., Ganopolski, A., Sigman, D.M. i in. (2005), *North Pacific Seasonality and the Glaciation of North America 2.7 Million Years Ago*, „Nature”, 433 (7028), s. 821–825: [doi.org/10.1038/nature03332](https://doi.org/10.1038/nature03332).
- Hays, J.D., Imbrie, J., Shackleton, N.J. (1976), *Variations in the Earth's Orbit. Pacesetter of the Ice Ages*, „Science”, 194 (4270), s. 1121–1132: [doi.org/10.1126/science.194.4270.1121](https://doi.org/10.1126/science.194.4270.1121).
- Haywood, A.M., Valdes, P.J., Aze, T. i in. (2019), *What Can Palaeoclimate Modelling Do for You?*, „Earth Systems and Environment”, 3 (1), s. 1–18:  
[doi.org/10.1007/s41748-019-00093-1](https://doi.org/10.1007/s41748-019-00093-1).
- Hoffman, P.F., Abbot, D.S., Ashkenazy, Y. i in. (2017), *Snowball Earth Climate Dynamics and Cryogenian Geology-geobiology*, „Science Advances”, 3 (11), s. 1–43: [doi.org/10.1126/sciadv.1600983](https://doi.org/10.1126/sciadv.1600983).
- Koch, P.L., Barnosky, A.D. (2006), *Late Quaternary Extinctions. State of the Debate*, „Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics”, 37, s. 215–250:  
[doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132415](https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132415).
- Kopp, R.E., Kirschvink, J.L., Hilburn, I.A., Nash, C.Z. (2005), *The Paleoproterozoic Snowball Earth. A Climate Disaster Triggered by the Evolution of Oxygenic Photosynthesis*, „PNAS”, 102 (32), s. 11131–11136: [doi.org/10.1073/pnas.0504878102](https://doi.org/10.1073/pnas.0504878102).
- Lambeck, K., Rouby, H., Purcell, A. i in. (2014), *Sea Level and Global Ice Volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene*, „PNAS”, 111 (43), s. 15296–15303: [doi.org/10.1073/pnas.1411762111](https://doi.org/10.1073/pnas.1411762111).

- Lear, C.H., Bailey, T.R., Pearson, P.N. i in. (2008), *Cooling and Ice Growth across the Eocene–Oligocene Transition*, „Geology”, 36 (3), s. 251–254: [doi.org/10.1130/G24584A.1](https://doi.org/10.1130/G24584A.1).
- Lisiecki, L.E., Raymo, M.E. (2005), *A Pliocene–Pleistocene Stack of 57 Globally Distributed Benthic  $\delta^{18}\text{O}$  Records*, „Paleoceanography”, 20 (1), s. 1–17: [doi.org/10.1029/2004PA001071](https://doi.org/10.1029/2004PA001071).
- Mukherjee, I., Large, R.R., Corkrey, R., Danyushevsky, L.V. (2018), *The Boring Billion, a Slingshot for Complex Life on Earth*, „Scientific Reports”, 8 (4432), s. 1–7: [doi.org/10.1038/s41598-018-22695-x](https://doi.org/10.1038/s41598-018-22695-x).
- Pearson, P.N., Foster, G.L., Wade, B.S. (2009), *Atmospheric Carbon Dioxide through the Eocene–Oligocene Climate Transition*, „Nature”, 461 (7267), s. 1110–1113: [doi.org/10.1038/nature08447](https://doi.org/10.1038/nature08447).
- Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D. i in. (1999), *Climate and Atmospheric History of the Past 420,000 Years from the Vostok Ice Core, Antarctica*, „Nature”, 399 (6735), s. 429–436: [doi.org/10.1038/20859](https://doi.org/10.1038/20859).
- Rignot, E., Mouginot, J., Scheuchl, B. i in. (2019), *Four Decades of Antarctic Ice Sheet Mass Balance from 1979–2017*, „PNAS”, 116 (4), s. 1095–1103: [doi.org/10.1073/pnas.1812883116](https://doi.org/10.1073/pnas.1812883116).
- Ruddiman, W.F. (2003), *The Anthropogenic Greenhouse Era Began Thousands of Years Ago*, „Climate Change”, 61 (3), s. 261–293: [doi.org/10.1023/B:CLIM.0000004577.17928.fa](https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000004577.17928.fa).
- Skinner, L.C., Fallon, S., Waelbroeck, C. i in. (2010), *Ventilation of the Deep Southern Ocean and Deglacial  $\text{CO}_2$  Rise*, „Science”, 328 (5982), s. 1147–1151: [doi.org/10.1126/science.1183627](https://doi.org/10.1126/science.1183627).
- Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L. i in. (2015), *The Trajectory of the Anthropocene. The Great Acceleration*, „The Anthropocene Review”, 2 (1), s. 81–98: [doi.org/10.1177%2F2053019614564785](https://doi.org/10.1177%2F2053019614564785).
- Syvitski, J., Waters, C.N., Day, J. i in. (2020), *Extraordinary Human Energy Consumption and Resultant Geological Impacts Beginning around 1950 CE Initiated the Proposed Anthropocene Epoch*, „Communications Earth & Environment”, 1 (1), s. 1–13: [doi.org/10.1038/s43247-020-00029-y](https://doi.org/10.1038/s43247-020-00029-y).
- Tang, H., Chen, Y. (2013), *Global Glaciations and Atmospheric Change at ca. 2.3 Ga*, „Geoscience Frontiers”, 4 (5), s. 583–596: [doi.org/10.1016/j.gsf.2013.02.003](https://doi.org/10.1016/j.gsf.2013.02.003).
- The IMBIE team (2018), *Mass Balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017*, „Nature”, 558 (7709), s. 219–222: [doi.org/10.1038/s41586-018-0179-y](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0179-y).
- Thomas, J.A. (2020), *The Anthropocene Earth System and Three Human Stories*, „RCC Perspectives. Transformations in environment and society – «Strata and Three Stories»”, 3, s. 41–68: [jstor.org/stable/10.2307/26985546](https://jstor.org/stable/10.2307/26985546).
- Thomas, J.A., Williams, M., Zalasiewicz, J. (2020), *The Anthropocene. A Multidisciplinary Approach*. Cambridge: Polity.



- Tierney, J.E., Haywood, A.M., Feng, R. i in. (2019), *Pliocene Warmth Consistent with Greenhouse Gas Forcing*, „Geophysical Research Letters”, 46 (15), s. 9136–9144: [doi.org/10.1029/2019GL083802](https://doi.org/10.1029/2019GL083802).
- Waters, C.N., Zalasiewicz, J., Summerhayes, C. i in. (2016), *The Anthropocene Is Functionally and Stratigraphically Distinct from the Holocene*, „Science”, 351 (6269), s. aad2622: [doi.org/10.1126/science.aad2622](https://doi.org/10.1126/science.aad2622).
- Waters, C.N., Zalasiewicz, J., Summerhayes, C. i in. (2018), *Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) for the Anthropocene Series. Where and How to Look for Potential Candidates*, „Earth-Science Reviews”, 178, s. 379–429: [doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.12.016](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.12.016).
- Willeit, M., Ganopolski, A., Calov, R., Brovkin, V. (2019), *Mid-Pleistocene Transition in Glacial Cycles Explained by Declining CO<sub>2</sub> and Regolith Removal*, „Science Advances”, 5 (4), s. 1–8: [doi.org/10.1126/sciadv.aav7337](https://doi.org/10.1126/sciadv.aav7337).
- Wolff, E.W. (2008), *The Past 800 ka Viewed through Antarctic Ice Cores*, „Episodes”, 31 (2), s. 219–221: [doi.org/10.18814/epiiugs/2008/v31i2/005](https://doi.org/10.18814/epiiugs/2008/v31i2/005).
- Zalasiewicz, J., Waters, C.N., Head, M.J. i in. (2019), *A Formal Anthropocene Is Compatible with but Distinct from Its Diachronous Anthropogenic Counterparts. A Response to W.F. Ruddiman's „Three Flaws in Defining a Formal Anthropocene”*, „Progress in Physical Geography. Earth and environment”, 43 (3), s. 319–333: [doi.org/10.1177%2F0309133319832607](https://doi.org/10.1177%2F0309133319832607).
- Zalasiewicz, J., Waters, C.N., Ellis, E.C. i in. (2021), *The Anthropocene. Comparing Its Meaning in Geology (Chronostratigraphy) with Conceptual Approaches Arising in Other Disciplines*, „Earth's Future”, 9 (3), s. 1–25: [doi.org/10.1029/2020EF001896](https://doi.org/10.1029/2020EF001896).
- Zalasiewicz, J., Williams, M. (2021), *Climate Change through Earth's History*, w: Letcher, T. (red.), *Climate Change. Observed Impacts on Planet Earth*. Amsterdam: Elsevier, s. 49–65: [doi.org/10.1016/B978-0-12-821575-3.00003-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821575-3.00003-7).
- Zanna, L., Khatiwala, S., Gregory, J.M. i in. (2019), *Global Reconstruction of Historical Ocean Heat Storage and Transport*, „PNAS”, 116 (4), s. 1126–1131: [doi.org/10.1073/pnas.1808838115](https://doi.org/10.1073/pnas.1808838115).
- Zeebe, R.E., Ridgwell, A., Zachos, J.C. (2016), *Anthropogenic Carbon Release Rate Unprecedented during the Past 66 Million Years*, „Nature Geoscience”, 9 (4), s. 325–329: [doi.org/10.1038/ngeo2681](https://doi.org/10.1038/ngeo2681).

### Źródła internetowe

- ESRL's GML of NOAA – Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory of the National Oceanic and Atmospheric Administration [b.r.], *Basics of the Carbon Cycle and the Greenhouse Effect*, „GML – ESRL – NOAA”: [esrl.noaa.gov/gmd/education/carbon\\_toolkit/basics.html](https://esrl.noaa.gov/gmd/education/carbon_toolkit/basics.html).
- NOAA Climate.gov [b.r.], *Climate Models*, „NOAA Climate.gov”: [climate.gov/maps-data/primer/climate-models](https://climate.gov/maps-data/primer/climate-models).