



**prof. dr hab.
Marek Lewandowski**

Zajmuje się historią ziemskiego pola magnetycznego, utrwaloną w skałach skorupy ziemskiej, a także historią całego geosystemu, starając się zrozumieć mechanizmy przyrodnicze, które wpływały na historię naturalnego środowiska planety. Uczestnik wypraw polarnych do Arktyki i na Antarktydę.
lemar@igf.edu.pl

HISTORIA ZŁODOWACEN GLOBALNYCH

*Najbardziej niezwykła rzecz we Wszechświecie
kryje się w twojej głowie.*

Bill Bryson

Marek Lewandowski

Instytut Geofizyki PAN w Warszawie

Według nieformalnej definicji zlodowacenie globalne występuje wtedy, gdy oba bieguny Ziemi są pokryte lodem. W historii geologicznej zlodowacenia globalne były epizodami buntu Ziemi przeciwko Słońcu, które przez kilka miliardów lat zapewniało naszej planecie, przy wsparciu szklarniowej atmosfery i oceanicznego bufora ciepła, temperaturę powyżej 0 st. C. Mimo to trzykrotnie bieguny Ziemi przełamywały temperaturę zamarzania wody: 2,2 mld lat temu (zlodowacenie hurońskie), następnie 0,6 mld lat temu (zlodowacenie kriogeńskie) i w neogenie (zlodowacenie neogeńskie)

– 23 mln lat temu do dziś. Co prawda w karbonie (około 360–300 mln lat temu) pokrywy lodowe obejmowały polarną, południową część superkontynentu Gondwany, brak jednak dowodów na istnienie w tym czasie pokrywy lodowej w strefie północnej. Z wyjątkiem wymienionych powyżej paroksyzmów zimna, temperatura na Ziemi była dość stabilna, w miarę jak rosło Słońce i spadała koncentracja gazów cieplarnianych.

Każde zlodowacenie globalne to niebotyczny stres środowiskowy i zarazem impuls ewolucyjny. Po pierwszym takim zlodowaceniu na Ziemi pojawiły się organizmy korzystające z tlenu do przemiany materii w energię (metabolizm tlenowy), po drugim biosfera zapelniła się organizmami wielokomórkowymi. Trzecie globalne zlodowacenie przyniosło Ziemi *Homo sapiens*, którego mózg ma efektywność superkomputera z praktycznie nieskończoną pamięcią operacyjną. Dzięki niemu człowiek jako jedyny spośród istot ży-



MAREK LEWANDOWSKI

wych posiadał wiedzę o tajemnicy prokreacji, a także poleciał na Księżyc. Ewolucja przeszła samą siebie, kreując system biocybernetyczny, zdolny do zrozumienia jej samej. Jak to się stało, że coś tak osobliwego powstało w przyrodzie?

Narodziny Ziemi

Dzisiejsze środowisko naturalne jest wynikiem długiej historii wzajemnego oddziaływania lito-, hydro-, atmo- i biosfery. Trzy pierwsze powstały bezpośrednio po kolizji dwóch planet (pra-Ziemi i Thei), która zrodziła Ziemię i Księżyc około 4,5 mld lat temu. Wkrótce potem Ziemia miała już strukturę podobną do dzisiejszej. W środku znajdowało się płynne, żelazne jądro wielkości Marsa, generujące pole geomagnetyczne. Jądro było otoczone płaszczem umiarkowanie ciężkich skał, a najlżejsze skały, w tym skały skorupy kontynentalnej, tworzyły zewnętrzną litosferę. Po ochłodzeniu planety pierwotny ocean magmy został zastąpiony oceanem wody, w całości pokrywającym Ziemię. Wczesna Ziemia była więc planetą wodną, wyprzedzającą o ponad 4 mld lat Waterworld w rozumieniu Hollywood.

Biosfera rodziła się w pierwotnym oceanie. Kiedy dokładnie, tego nie wiemy, jednak najwcześniejsze znane dziś mikroskamieniałości są wieku archaicznego (3,5 mld lat temu), a znajduwane w cyrkonach inkluzje „lekkiego” grafitu (znamiennego dla materii organicznej) są datowane na mniej więcej 3,8 mld lat, a nawet (w pojedynczych kryształach) na 4,1 mld lat. Pierwsze organizmy zdolne do samopowielania mogły więc powstawać już w późnym hadeiku (4,55–4 mld lat temu). Powstanie kolejnych gatunków to historia ewolucyjnych przypadków, których sukces zależał od zdolności przetrwania w otaczającym środowisku.

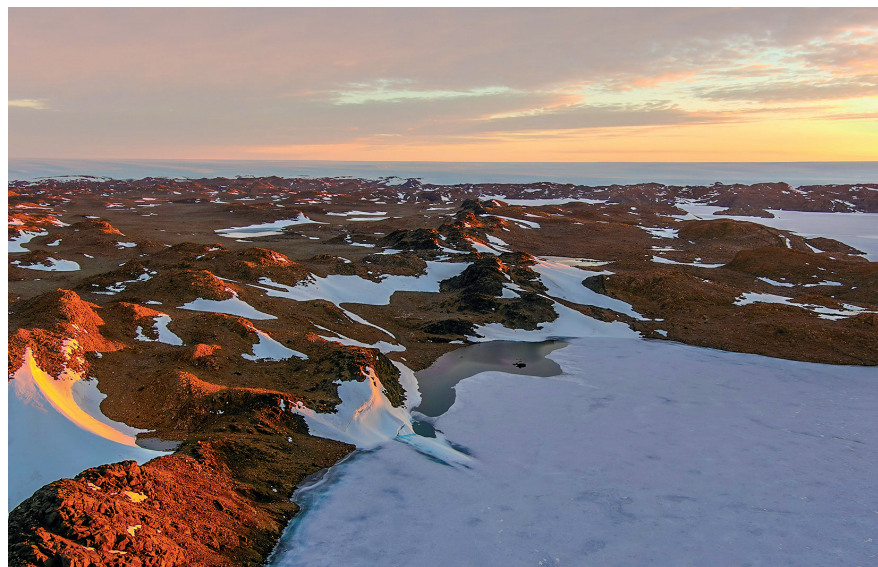
Atmosfera Ziemi w hadeiku była gęsta i składała się głównie z pary wodnej, amoniaku, dwutlenku węgla, tlenków siarki, metanu oraz niewielkiej ilości gazów szlachetnych. Wolnego tlenu nie było. Planeta była okryta chmurami, ciśnienie na powierzchni wynosiło około 60 barów. Dzisiejsze ciśnienie to mniej więcej 1 bar.

W paleoarchaiku (3,6–3,2 mld lat temu) organizmy jednokomórkowe (prokarioty) były chemotrofami. Przetwarzały (metabolizowały) związki chemiczne ze swojego bezpośredniego otoczenia na energię, potrzebną do podziału na komórki potomne. W mezoarchaiku (3,2–2,8 mld lat temu) pojawiły się jednak bakterie z efektywniejszym metabolizmem. Mogły przetwarzać atmosferyczny CO₂, przy okazji wydalając CH₄ (metan) jako produkt uboczny (metanogeneza). Te prymitywne bakterie przekształciły atmosferę ziemską na swoją modłę, zmieniając jej skład z bogatej w CO₂ w bogatą w CH₄. Przy młodym jeszcze Słońcu metanowa atmosfera zapewniała temperaturę powyżej zera na powierzchni Ziemi.

Jednak w tym samym czasie pojawiają się organizmy uzbrojone w związek organiczny, który zmienił świat – chlorofil. Dzięki niemu sinice zaczynają fotosyntetyzować CO₂, wydzielając przy tym tlen jako produkt uboczny. Płytkowodne maty sinicowe (stromatolity) zwiastują wynurzenie się skorupy ponad poziom oceanu. To było ważne wydarzenie. Od tego czasu litosfera weszła w kontakt z atmosferą nie bez skutków dla globalnego klimatu.

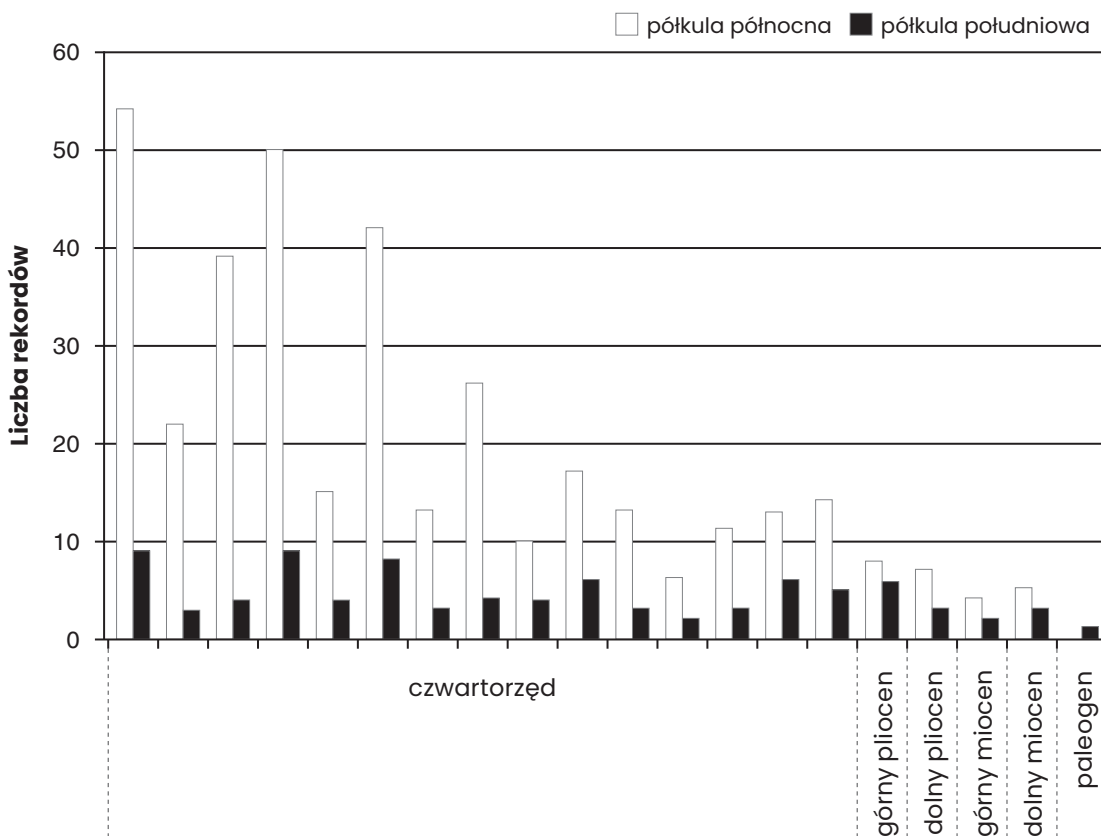
Zachód słońca u wybrzeży Gondwany w karbonie (ok. 300 mln lat temu). Analog z Zatoki Thala, Antarktyda Wschodnia

Oaza Bungere (ang. *Bunger Hills*, Antarktyda Wschodnia) jako analog Ziemi z czasów zlodowacenia hurońskiego (2,2–2,1 mld lat temu)



ADAM NAWROT

Frekwencja glaciałów antarktycznych (czarne słupki) i arktycznych (białe słupki) od miocenu (ok. 23 mln lat temu, prawa strona osi poziomej) do dziś. Widać narastające ochłodzenie globalne, wyrażone zwiększoną liczbą glaciałów zamarzającej Arktyki (za: Ehlers & Gibbard 2007)



Początkowo tlen pozostawał w toni wodnej, wiążąc głównie jony żelaza. Dopiero kiedy ich zabrakło, tlen zaczął się przedostawać do metanowej atmosfery. Efekt był piorunujący. Około 2,2 mld lat temu atmosferyczny metan szybko utlenił się do dwutlenku węgla, który jest znacznie słabszym gazem cieplarnianym. Słońce w tym czasie dostarczało kilku procent energii mniej niż dziś, więc spadek koncentracji metanu na rzecz CO₂ wywołał wielki mróz. Ziemia zamrzęła aż do głębokiej litosfery, doświadczając pierwszego globalnego zlodowacenia, zwanego zlodowaceniem hurońskim. Dziś analogiem ówczesnej powierzchni Ziemi jest Antarktyda Wschodnia.

Około 2,1 mld lat temu lody puściły (zapewne wskutek gromadzonego w litosferze ciepła z wnętrza Ziemi oraz rozwijającej się aktywności tektonicznej i wulkanicznej). Przez kolejny miliard lat trwał okres „wielkiej geologicznej nudy”. Organizmy fotosyntetyzujące jednak nie próżnowały, systematycznie ściągając CO₂ z atmosfery i wzbogacając ją w tlen, jednocześnie tworząc coraz bardziej złożone struktury wielokomórkowe.

Chlorofil miał swój ogromny wkład w ściąganiu (sekwestracji) CO₂ z atmosfery. Jednak wraz z dynamizującą się tektoniką globalną, kolizjami kontynentów i wypiętrzaniem gór (orogenezą), coraz więcej skał wchodziło w reakcje chemiczne z atmosferą. W wyniku erozji i procesu zwanego karbonatyzacją (uwęglanowaniem) duża część atmosferycznego

CO₂ była nieodwracalnie wiązana w nieorganiczne węglany, prowadząc do dalszego spadku koncentracji CO₂. W późnym proterozoiku (1–0,541 mld lat temu), po rozpadzie superkontynentu Rodinii i następczych zderzeniach kontynentów, doszło do orogenezy kadmowskiej (0,7–0,55 mld lat temu) i wypiętrzania kolejnych pasm górskich, których erozja wzmacniała sekwestracyjne efekty karbonatyzacji.

Fotosynteza i karbonatyzacja zmniejszały efekt cieplarniany. Jednak sama atmosfera z biegiem geologicznego czasu stawała się coraz rzadsza z winy wiatru słonecznego, który przez miliardy lat wybijał cząstki atmosferycznych gazów w przestrzeń kosmiczną. Proces ten musiał być szczególnie silny w późnym proterozoiku, kiedy przez 200 mln lat natężenie ziemskiego pola magnetycznego przejściowo spadło (zapewne z powodu krystalizacji jądra wewnętrznego) i wynosiło zaledwie 10 proc. dzisiejszego. Szalejący wiatr słoneczny mógł rozrzedzić atmosferę, zmniejszając znacząco jej efekt cieplarniany (bez atmosfery temperatura na Ziemi wynosiłaby dziś około –15 st. C). W sumie zbieg tych trzech czynników spowodował drugie globalne zlodowacenie (w istocie serię następujących po sobie zlodowaceń), zwane zlodowaceniem kriogeńskim (0,85–0,635 mld lat). Nie było ono jednak tak rozległe jak hurońskie, gdyż rosnące Słońce dostarczało już więcej energii (choć jeszcze nie tak dużo jak dziś). Dobrym analogiem ówczesnej Ziemi mogą być skaliste oazy Antarktydy.



Gdy lody puściły

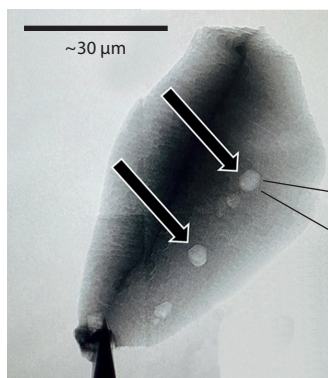
Koniec zlodowacenia kriogeńskiego wyznacza ważną granicę w ewolucji materii ożywionej. Zimny, a przez to dobrze natleniony ocean (kłania się prawo Henry'ego, mówiące o odwrotnie proporcjonalnej rozpuszczalności gazów w cieczach w funkcji temperatury) był matczynikiem powstawania złożonych organizmów wielokomórkowych, a z początkiem kambru także organizmów szkieletowych. Wśród nich pojawiły się formy cudzożywne, które metabolizowały pokarm, wykorzystując tlen. Tak powstał świat zwierząt, które najpierw pożerały glony, a potem siebie nawzajem. Dziś zwierzęta stanowią niewielki (niecałe 0,5 proc.) odsetek biomasy. Dominują rośliny (80 proc. biomasy), pozostałą część tworzą bakterie, grzyby, archeony i protisty. Udział człowieka w globalnej biomase ocenia się na mniej więcej 0,01 proc.

W sylurze (około 443–419 mln lat temu) na lądzie pojawiają się pierwsze rośliny, przez co potencjał sekwestracji atmosferycznego CO_2 znacząco rośnie, osiągając apogeum w karbonie (359–299 mln lat temu). W tym czasie koncentracja CO_2 spada do najniższego poziomu od początku istnienia atmosfery, za to tlenu było dwa razy więcej niż dziś. Jednocześnie dochodzi do wypiętrzania orogénów waryscyjskich i nasilenia karbonatyzacji. Dwutlenek węgla prawie znika z atmosfery, co doprowadziło do rozwoju pokryw lodowych na ogromnych obszarach paleokonty-

ntentu Gondwany. Przechwycony przez karbońskie rośliny węgiel Ziemia odłożyła w depozycie na 300 mln lat. Dziś przejął go człowiek.

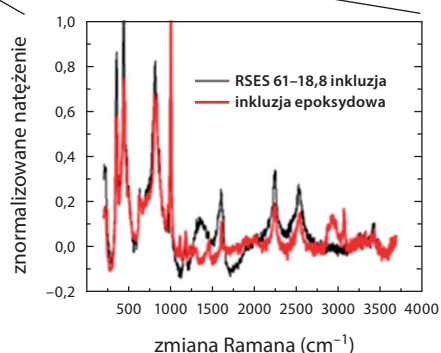
Okres permo-triasowy (299–201 mln lat temu) był czasem wielkich wymierań, również roślin. Atmosfera mogła więc odnowić zasoby CO_2 , głównie dzięki aktywności wulkanicznej. Rośliny lądowe powoli wracają do gry jako konsumenci CO_2 . Rozwinęły się

Antarktyczny analog strefy równikowej z czasów zlodowacenia kriogeńskiego (0,85–0,635 mld lat temu)

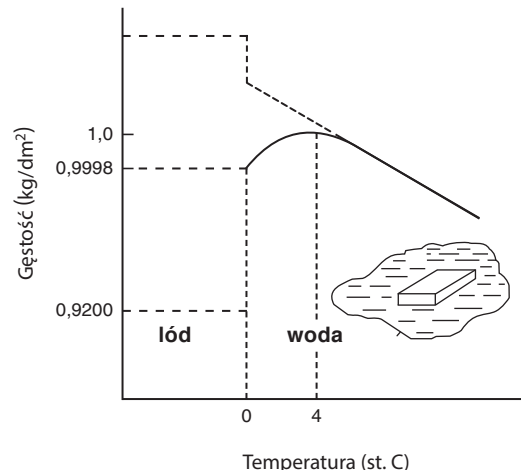
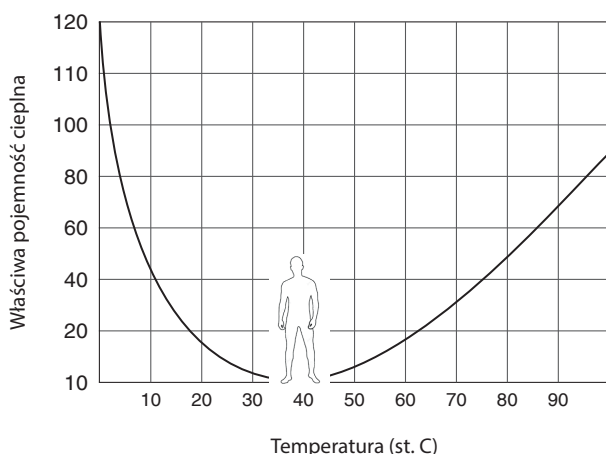


Transmisyjny obraz rentgenowski próbki cyrkonu (ok. 4,1 mld lat, odsłonięcie Jack Hills, Australia) z zaznaczonym grafitem.

Wstawka: widma Ramana dla górnej inkluzji i „inkluzji” epoksydowej z innego kryształu cyrkonu, wskazujące na odmienny charakter widm dla grafitu i żywicy epoksydowej (za: Bell et al. 2015)



Diagramy ilustrujące wybrane właściwości wody: zmienność właściwej pojemności cieplnej (P_c , z lewej) oraz gęstości (z prawej). Sylwetka człowieka wskazuje na wartość optymalną z punktu widzenia kinetyki reakcji enzymatycznych (za: Filin 2017)



trawy i lasy, a w eocenie (około 50 mln lat temu) zarodniki paproci *Azolla* pokrywały Ocean Arktyczny. Na początku miocenu (23 mln lat temu) dęby i sekwoje porastały jeszcze Spitsbergen. Ziemia była ciepła i zielona, grzejąc się w promieniach coraz większego Słońca. Co się więc stało, że w ciągu kilku ostatnich milionów lat bieguny Ziemi znów pokryły się lodem, a temperatura na nich spadła o blisko 60 st. C?

Jeżeli w grę nie wchodzi nieznane czynniki astronomiczne (*notabene* cykle Milankovicia nie miały znaczenia dla neogeńskiego spadku temperatury, na co wskazują wyniki badań rdzeni lodowych z Antarktydy i Grenlandii), to winą za najniższą w historii koncentrację CO₂ należy obarczyć zarówno fotosyntezę, jak i karbonatyzację, a także cienką już atmosferę. W sumie wymuszenie radiacyjne stało się krytycznie niskie i nic dziwnego, że każda zmiana ilości CO₂ w atmosferze ma dziś znaczenie dla klimatu naszej planety.

Homo sapiens – dziecko chłodu

Apogeum spadku temperatury na Ziemi przypada na ostatnie pięć milionów lat. W tym samym czasie następuje ewolucyjny rozkwit naczelnych. Badania DNA wskazują na możliwość pojawienia się u *Homo erectus* zmutowanego genu o nazwie ARHGAP11B, który około 300 tys. lat temu miałby zmienić bieg ewolucji hominidalnego mózgu przez znaczący wzrost jego objętości.

Liczba mutacji zachodzących codziennie w naszym organizmie jest ogromna, jednak zmutowane komórki są z reguły niszczone przez ciała odpornościowe. Jeżeli sugestie biochemików co do roli genu ARHGAP11B są poprawne, to pierwszy osobnik ze zmutowanym genem przetrwał najpierw inspekcję własnego systemu odpornościowego, a następnie zdołał przeżyć na afrykańskiej sawannie (co w tamtym czasie nie było takie pewne...) do czasu uzyskania dojrzałości płciowej. Kolejne pokolenia naszego mutantu mogły rozwijać się w optymalnym dla rosnącego mózgu środowisku naturalnym, które zapewniało mu dostęp do tlenu,

wody i źródła energii (pożywienia). Fundamentalne znaczenie w mojej opinii miała jednak temperatura otoczenia, pozwalającą na efektywną pracę całego organizmu. Pracuje on najlepiej, gdy ma temperaturę 36,6 st. C. Jest to temperatura zdrowego człowieka, bliska jego komfortu termicznego w wersji bez ubrania.

Dlaczego akurat tyle? Odpowiedź znajdujemy w kinetyce reakcji biochemicznych. Enzymy, katalizatory tych reakcji, są najefektywniejsze w zakresie temperatur 35–42 st. C. Praktycznym przykładem są enzymatyczne proszki do prania, których stosowanie w temperaturach powyżej 42 st. C nie miało sensu, bo enzymy ulegały wtedy denaturacji. Z kolei w temperaturach poniżej 35 st. C enzymy mają zbyt niską energię kinetyczną, by efektywnie brać udział w reakcjach chemicznych.

Optymalne warunki dla reakcji enzymatycznych są pochodną właściwości wody, która cechuje się nieliniową zmiennością właściwej pojemności cieplnej i posiada minimum przy temperaturze około 37 st. C. Właśnie w tej temperaturze reakcje enzymatyczne przebiegają z największą intensywnością, a organizm jest najbardziej wydajny.

Nie zmienimy ani właściwości wody, która stanowi 60 proc. naszego ciała, ani białek, które nas budują. Ze względu na cechy fizykochemiczne ludzkiego organizmu jesteśmy w temperaturowej pułapce. Nasz superkomputer działa sprawnie tylko w wąskim zakresie temperatur. Nastąpił on dopiero z nadejściem trzeciego zlodowacenia globalnego.

Jesteśmy więc dziećmi chłodu. Jeśli ktoś ma wątpliwości, proszę po przeczytaniu tego eseju wyłączyć lodówkę i wyobrazić sobie, że świat dookoła ma stałe temperaturę powyżej 0 st. C. Tak jak z reguły bywało na Ziemi przez miliony lat. ■

Artykuł powstał na podstawie wykładów autora z ostatnich 10 lat, prowadzonych na Wydziale „Artes Liberales” UW, interdyscyplinarnych studiach doktoranckich PAN oraz uniwersytetach III wieku.

Chcesz wiedzieć więcej?

Bell E.A., Boehnke P., Harrison T.M., Mao W.L., *Potentially biogenic carbon preserved in a 4.1 billion-year-old zircon*, „Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America” 2015.

Ehlers J., Gibbard P.L., *The extent and chronology of Cenozoic Global Glaciation*, „Quaternary International” 2007.

Filin S., *Niezwykłe właściwości zwykłej wody*, „Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna” 2017.

Bryson B., *Gało*, 2022.

Gee H., *(Bardzo) krótka historia życia na Ziemi*, 2023.

Kump L.R., Kasting J.J.F., Crane R.G., *The Earth System*, 2009.