

magazyn

# Drzewo Franciszka

2023

wydanie specjalne



O POCHODZENIU  
RÓŻNORODNOŚCI  
BIOLOGICZNEJ

ISSN 2719-6046

CZŁOWIEK - EKOLOGIA - ROZWÓJ



## Spis treści:

O zmieniającej się Ziemi – Witold Szczuciński .....	1
Bez zmian nie byłoby bioróżnorodności – Ewa Chudzińska .....	4
O ziemskiej litosferze – Wojciech Stawikowski .....	6
Bioróżnorodność w świecie ekstremofili – od początków życia na Ziemi po czasy współczesne – Ewa Borowska .....	11
Atmosfera w rozwoju złożoności życia na Ziemi – od początków życia na Ziemi po czasy współczesne – Mirosław Makohonienko .....	13
Notatki z życia – biosfera – Andrzej M. Jagodziński .....	21
autorzy .....	25

---

### Magazyn Drzewo Franciszka

Wydawca: Fundacja Zakłady Kórnickie, al. Flensa 2 B, 62-035 Kórnik

Redaktor naczelny: dr Dariusz Grzybek

Kontakt: [magazyn@drzewofranciszka.pl](mailto:magazyn@drzewofranciszka.pl)

tel.: 61 898 02 91

Okładka z przodu:

Czmoniec koło Kórnika, ścieżka edukacyjno-przyrodnicza Bobrowy Szlak. Fot. Joanna Wolińska

*Treść każdego dostarczonego materiału wyraża poglądy i opinie jego autora.*

*Treści zawarte w każdym z materiałów nie muszą odzwierciedlać poglądów i opinii redakcji.*

---

**WFOŚiGW**  
POZNAŃ

WOJEWÓDZKI FUNDUSZ  
OCHRONY ŚRODOWISKA  
I GOSPODARKI WODNEJ  
W POZNANIU

Dofinansowano ze środków  
Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska  
i Gospodarki Wodnej w Poznaniu

# O zmieniającej się Ziemi

Witold Szczuciński

Żyjemy na zmieniającej się planecie. Obserwujemy przekształcanie się społeczeństw, kultur, środowiska. Śledzimy dyskusje o przyczynach i skutkach tych przemian, które prowadzą nierzadko do przeciwstawnych wniosków. Zwykle wynika to ze wzajemnego niezrozumienia sposobu widzenia świata, mówienia o różnych skalach czasu, niedostrzegania możliwości wpływania nawet niewielkich zmian na coś, co wydaje się niezmiennie – a tak postrzegana jest często nasza planeta. W tym krótkim eseju chciałbym podzielić się kilkoma obserwacjami – poczynionymi z punktu widzenia geologa – o tym, jak współczesna zmiana klimatu i środowiska oraz idące za tym przeobrażenia w biosferze, w tym bioróżnorodność, prezentują się na skali zmian zachodzących w historii Ziemi.

## Czas i złożoność procesów

Skale czasu bardzo się od siebie różnią i zależą od perspektywy przyjętej przez obserwatora. Dla pojedynczego człowieka życie skupia się na krótkich miarach czasu, takich jak minuty, dni czy miesiące. W tym kontekście wydarzenia, które dzieją się na przestrzeni wieków, wydają się odległe i mało istotne. Jednak kiedy spojrzymy na skalę czasu przez pryzmat rozwoju kultur i cywilizacji, to historię opowiadamy już w tysiącletniach. Skala czasu mierzona długością trwania gatunku jest jeszcze trudniejsza do wyobrażenia. Sięga bowiem milionów lat, a to nadal bardzo niewiele w porównaniu do geologicznej skali czasu, której niejednokrotnie podstawową jednostką są setki milionów czy nawet miliardy lat.

Analizując zmiany środowiska i ich skutki, porównując zdarzenia z przeszłości z tymi zachodzącymi obecnie, musimy zatem pamiętać o skali czasu. Na przykład, współczesna zmiana klimatu niektórym może wydawać się powolna i ledwo zauważalna, ale z perspektywy geologicznej jest niezwykle szybka. W ciągu ostatnich stu lat średnia globalna temperatura powietrza wzrosła o około  $1^{\circ}\text{C}$  – dla porównania: średnia globalna temperatura powietrza podczas maksimum ostatniego zlodowacenia, kiedy to północna Polska była pokryta lądolodem, była zaledwie o około  $4\text{-}5^{\circ}\text{C}$  niższa, zaś późniejszy wzrost temperatury do wartości podobnej jak ta na początku XX wieku zachodził z prędkością mniejszą niż  $1^{\circ}\text{C}$  na tysiąc lat.

Rozważając zmiany na Ziemi, kluczowym aspektem jest również zrozumienie, że nie można ograniczać się jedynie do uproszczonej analizy pojedynczych procesów. Nasza planeta jest złożonym systemem, w którym zachodzą liczne sprzężenia zwrotne. Oznacza to, że zmiany w jednym obszarze, na przykład klimatyczne czy degradacja ekosystemów, mają wpływ na wiele innych elementów systemu Ziemi. Mogą doprowadzać do wzmocnienia pierwotnego procesu zaburzonego równowagę (mówimy wtedy o sprzężeniu zwrotnym dodatnim) lub do jego osłabienia (sprzężenia zwrotnego

ujemnego). Zatem wiedza o układzie sprzężeń zwrotnych i ich globalnych oddziaływaniach jest niezbędna do rozwiązywania problemów dotyczących przekształcania się środowiska naturalnego.

## Atmosfera, biosfera i litosfera a klimat

Ewolucja klimatu na Ziemi to fascynujący proces, który jest ściśle powiązany z dynamicznymi zmianami na naszej planecie, składem atmosfery oraz życiem w biosferze. Ten złożony system zależności trwał przez miliardy lat i trwa nadal, wpływając na większość procesów kształtujących Ziemię. Początkowo jej atmosfera była zupełnie inna niż obecnie. Składała się zapewne głównie z dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ), metanu ( $\text{CH}_4$ ) oraz amoniaku ( $\text{NH}_3$ ). Dopiero powstanie i rozwój życia wpłynęły na jej radykalną zmianę. To właśnie mikroorganizmy, takie jak sinice i bakterie, dokonały rewolucyjnej transformacji – w procesie fotosyntezy zaczęły przekształcać dwutlenek węgla i wodę w tlen i glukozę, pozostawiając po sobie ślady w postaci osadów organicznych i atmosferę wzbogaconą o bardzo reaktywny pierwiastek, czyli tlen.

Zmiany w składzie atmosfery, zwłaszcza wzrost zawartości tlenu, były zwrotnym momentem dla historii klimatu. Tlen umożliwił ewolucję bardziej skomplikowanych organizmów, które mogły efektywniej wykorzystywać energię związaną z glukozą. W miarę jak poziom tlenu w atmosferze wzrastał, biosfera ewoluowała, a różnorodność gatunków na Ziemi znacząco się zwiększyła. To z kolei wpływało na warunki życia i klimat. Na przykład powstanie pokrywy roślinnej na lądach zmieniło albedo powierzchni Ziemi (czyli jej zdolność do odbijania promieni słonecznych), a organizmy morskie zaczęły wykorzystywać węglan wapnia do budowy swoich skorupki, kontrolując ilość dwutlenku węgla w atmosferze.

Jednakże nie tylko biosfera oddziałuje na klimat. Ruch płyt tektonicznych, tworzenie się gór i oceanów, zmiany cyrkulacji oceanicznej, przekształcanie się składu atmosfery (gazów cieplarnianych) oraz cykliczne zmiany orbity Ziemi istotnie wpływają na długoterminową ewolucję klimatu. Przykładowo, trwający miliony lat proces tworzenia się gór w wyniku kolizji kontynentów ma ogromne znaczenie jeśli chodzi o cyrkulację atmosferyczną, rozkład temperatur i opadów na naszej planecie.

Kolejnym ważnym aspektem klimatotwórczym jest wpływ krótkotrwałych zdarzeń, takich jak erupcje wulkaniczne czy uderzenia asteroidów, które mogą powodować nagłe, choć zwykle tymczasowe zmiany klimatu. Erupcje wulkaniczne wyrzucają do atmosfery ogromne ilości pyłów i gazów, które absorbują światło słoneczne, czego efektem mogą być okresy globalnego ochłodzenia. Podobnie, uderzenie asteroidy może wywołać krótkotrwałe, ale gwałtowne zmiany klimatyczne.

Ostatnie stulecie to okres, w którym oddziaływanie człowieka na klimat staje się coraz bardziej istotne. Emisja dwutlenku węgla związana z działalnością przemysłową i spalaniem paliw kopalnych powoduje szybki wzrost jego stężenia w atmosferze. To z kolei prowadzi do globalnego ocieplenia i przeobrażeń, które mogą mieć poważne konsekwencje dla naszej planety i życia w biosferze, a przede wszystkim dla nas – ludzi. Zmiany w natężeniu efektu cieplarnianego w historii Ziemi bywały o wiele większe, o czym piszę poniżej, stąd jest to wyzwanie przede wszystkim dla współczesnego społeczeństwa – czy jesteśmy w stanie dostosować się do wywołanej przez nas zmiany i kontrolować jej przebieg?

## Młode Słońce

---

Dowody geologiczne wskazują, że przez niemalże całą historię Ziemi jej temperatura na powierzchni utrzymywała się w zakresie umożliwiającym obecność wody w stanie ciekłym. Współcześnie wydaje nam się to oczywiste, ale z perspektywy geologicznej jest to tak zaskakujące, że nazwano to paradoksem młodego Słońca. Była to bowiem zagadka, która przez wiele lat intrygowała naukowców i zmuszała ich do szukania odpowiedzi na pytanie, dlaczego młode Słońce – które świeciło nawet 30% słabiej niż dzisiaj – nie spowodowało całkowitego zlodowacenia Ziemi. Wyjaśnieniem jest znacznie silniejszy niż obecnie efekt cieplarniany. Polega on na tym, że niektóre gazy w atmosferze, zwane gazami cieplarnianymi, pochłaniają promieniowanie długofalowe emitowane przez Ziemię i reemitują je częściowo z powrotem ku powierzchni planety. W przeszłości atmosfera zawierała większe ilości gazów cieplarnianych, takich jak dwutlenek węgla ( $\text{CO}_2$ ) i metan ( $\text{CH}_4$ ), które były głównie pochodzenia wulkanicznego.

Ponadto, w okresie tzw. młodego Słońca (pierwsze miliardy lat historii Ziemi) cyrkulacja oceaniczna była intensywniejsza niż dzisiaj. To pomagało w rozprowadzaniu ciepła na całej planecie, zapobiegając gromadzeniu się lodu na dużą skalę. Inne było również albedo. Wszystkie te czynniki razem wzięte pomogły w utrzymaniu względnie stabilnego klimatu na Ziemi, pomimo słabszego promieniowania słonecznego. Paradoks młodego Słońca pokazuje, jak skomplikowanym i złożonym procesem jest kształtowanie się klimatu na naszej planecie i jak wiele czynników wpływa na jego stabilność. Niemniej warto zaznaczyć, że stabilność w perspektywie skali geologicznej polega na samoregulujących się zmianach, czasem o dużej intensywności, nie oznacza zaś stanu niezmienności.

## Od zamrażarki do upałów

---

Pomimo względnej stabilności, Ziemia doświadczyła również dramatycznych, w geologicznej skali czasu, zmian. Przykładem jest okres tzw. Ziemi Śnieżki (Snowball Earth), kiedy to ogromne obszary Ziemi, również te okołorównikowe, pokryte były lodem. Takie sytuacje mogły się wydarzyć kilkakrotnie, szczególnie ok. 640 do 780 mln lat temu. Powstanie i zakończenie okresu Ziemi Śnieżki to temat wielu badań naukowych, a jego przyczyny i przebieg pozostają przedmiotem intensywnych dyskusji.

Przyczyn powstania warunków Ziemi Śnieżki, kiedy średnia temperatura mogła wynosić nawet  $-50^\circ\text{C}$  (obecnie wynosi ok.  $+14^\circ\text{C}$ ), upatruje się zwykle w szeregu czynników. Pierwszym

jest sprzężenie zwrotne między pokrywą lodową a albedo, czyli ilością odbitego promieniowania słonecznego. Im większa pokrywa lodowa tym więcej promieniowania jest odbite, powodując dalsze ochłodzenie (współcześnie obserwujemy podobny efekt, ale działający w przeciwnym kierunku). Samo zaistnienie warunków typowych dla zlodowaceń wiąże się zwykle z niskim poziomem  $\text{CO}_2$  w atmosferze – według niektórych badaczy odpowiedzialne za to miały być intensywne rozwijające się w tamtym okresie bakterie, które zaczęły efektywnie wiązać dwutlenek węgla z atmosfery, byłyby to zatem paradoksalnie zmiana inicjowana przez rozwój biosfery. Paradoksalnie, bo powstanie warunków Ziemi Śnieżki mogło doprowadzić do całkowitej zagłady życia na Ziemi. Zaburzony został również mechanizm dystrybucji ciepła na Ziemi – pokrywa lodowa była tak rozległa, że ograniczyła dostęp światła słonecznego do oceanów. To z kolei spowodowało zahamowanie cyrkulacji oceanicznej.

Równie intrygujące jak powstanie Ziemi Śnieżki, jest jej zakończenie. Czymś, co mogło spowodować roztopienie globalnej pokrywy lodowej, był efekt cieplarniany. Jednak aby zrównoważyć efekt albedo pokrywy lodowej, koncentracja dwutlenku węgla w atmosferze musiałaby być 350 razy wyższa niż obecnie. Źródłem tego dwutlenku węgla były wulkany, których aktywność istnieje nawet w przypadku pokrycia planety przez lód. W warunkach normalnych dwutlenek węgla dostarczany przez wulkany częściowo rozpuszcza się w oceanach, częściowo jest pochłaniany w czasie reakcji wietrzenia skał, a docelowo odkładany jest w postaci skał węglanowych. Jednak w warunkach globalnego zlodowienia, dwutlenek węgla nie miał dostępu do powierzchni skał ani do oceanów i stopniowo kumulował się w atmosferze. Gdy w końcu doszło do stopienia części pokrywy lodowej, dalsze topnienie przebiegło błyskawicznie. Powierzchnia oceanu ma bowiem znacznie niższe albedo niż lód i o wiele więcej promieniowania słonecznego zostało zaabsorbowane, co przy istniejącym bardzo silnym efekcie cieplarnianym spowodowało, że być może zaledwie w ciągu tysiąca lat (!) cała planeta została uwolniona spod lodu. W zapisie geologicznym procesy te widać w leżących bezpośrednio na sobie skałach powstałych w wyniku działalności lodowców (tillity) i skałach węglanowych wytraconych z ciepłych wód morskich (wapienie i dolomity). Ponieważ  $\text{CO}_2$  jest powoli usuwany z atmosfery w wyniku wspomnianych wyżej procesów, to wkrótce po ustąpieniu lodu Ziemia doświadczyła warunków, które opisuje się jako ekstremalnie ciepłe i minęły kolejne setki tysięcy lat, zanim poziom dwutlenku węgla znacząco spadł.

Okres Ziemi Śnieżki miał ogromne znaczenie dla rozwoju życia na Ziemi. Jak wspomniałem, zapewne to właśnie życie przyczyniło się do jego zaistnienia, a zarazem powstanie warunków globalnego zlodowienia mogło zniszczyć życie na Ziemi. Po zakończeniu tego okresu nastąpił czas nagłego rozkwitu organizmów, związany między innymi z tzw. eksplozją kambryjską, która doprowadziła do powstania wielu nowych form życia. Sporo aspektów związanych z historią Ziemi Śnieżki nadal jest przedmiotem dyskusji, niemniej przykład ten pokazuje, jak wrażliwym systemem jest nasza planeta.

## Antropocen

---

W kontekście odporności środowiska Ziemi na zmiany, szczególnie interesuje nas okres współczesny, przez wielu nazy-

wany antropoceniem. Termin ten coraz częściej funkcjonuje jako określenie nowej epoki geologicznej, w której wpływ ludzkiej działalności na naszą planetę zdaje się być dominujący. W ciągu ostatnich kilku dziesięcioleci obserwujemy znaczne zmiany antropogeniczne rzutujące na klimat, erozję, obieg wody i osadów, bioróżnorodność, biomasę itd.

Jednym z najbardziej palących wyzwań antropocenu jest zmiana klimatu. Wzrost emisji gazów cieplarnianych – takich jak dwutlenek węgla ( $\text{CO}_2$ ) i metan ( $\text{CH}_4$ ) – związany głównie z działalnością przemysłową, energetyczną i transportową, jest główną przyczyną obserwowanego globalnego ocieplenia. Skutki tego procesu są coraz bardziej widoczne – to m.in. ekstremalne zjawiska pogodowe, topnienie lodowców, podnoszenie się poziomu morza i zmiany w ekosystemach. To wszystko wpływa bezpośrednio na nasze społeczeństwo i gospodarkę.

Ludzka działalność w antropocenie prowadzi również do znacznych zmian w cyklu tworzenia osadów na powierzchni Ziemi. Rzeki wraz z lodowcami i wiatrem prowadzą do erozji skał i dalszego transportu powstałych osadów (mułu, piasku, żwiru). Okazuje się jednak, że w skali globalnej, biorąc pod uwagę ten sam przedział czasu, masy skał podlegające naturalnej erozji są czterokrotnie mniejsze niż masa przemieszczonego urobku skalnego powstałego w wyniku działalności górniczej! Rozwinięcie rolnictwa oraz urbanizacja przyczyniają się do jeszcze intensywniejszej erozji gleby i nadmiernego splukiwania osadów do rzek czy oceanów. To prowadzi m.in. do degradacji gleby, utraty ich żyzności, a także zwiększa ryzyko powodzi.

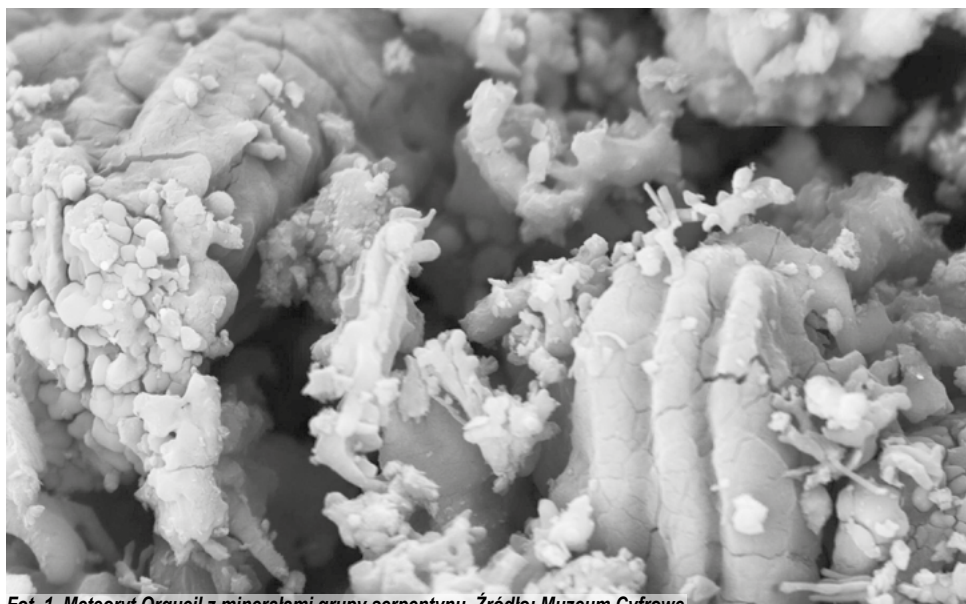
Cykl wodny na Ziemi również jest zakłócany przez działalność ludzką. Na przykład, zasadniczo zmieniony jest system odpływu wód rzecznych – w wyniku budowania tam i zbiorników retencyjnych tylko 1/4 dużych rzek płynie nieprzerwanie od źródeł do ujścia. Urbanizacja, odwadnianie terenów, deforestacja i zmiany klimatyczne wpływają na ilość i jakość wód powierzchniowych oraz gruntowych. Pestycydy i zanieczyszczenia pochodzące z działalności przemysłowej dostają

się do zbiorników wodnych, co negatywnie przekłada się na zdrowie ekosystemów i ludzi. Dodatkowo, eksploatacja zasobów wodnych, np. wydobywanie wód gruntowych do celów rolniczych i przemysłowych, wpływa na bilans wodny. Może to prowadzić do obniżenia poziomu wód gruntowych i zanikania mokradeł, które są istotne dla różnorodności biologicznej.

Antropocen to okres, w którym ludzka działalność jest głównym czynnikiem wpływającym na zaburzenie dynamicznej równowagi procesów kształtujących warunki życia na naszej planecie. Zrozumienie tych zmian i podjęcie działań na rzecz zrównoważonego rozwoju staje się coraz pilniejszym zadaniem, aby chronić naszą planetę i jej ekosystemy przed dalszymi negatywnymi (przynajmniej z naszego punktu widzenia) konsekwencjami. Przyszłość zależy również od nas.

Jaka jednak będzie ta przyszłość? W geologii istnieją dwie koncepcje, które można podsumować zdaniami: „teraźniejszość jest kluczem do przeszłości” oraz „przeszłość jest kluczem do przyszłości”. By odczytać historię zapisaną w skałach, bazujemy na wiedzy o tym, jak tworzą się one obecnie, jakie procesy prowadzą do ich powstawania. Ograniczeniem współczesnych badań jest jednak krótka skala czasu, zatem aby poznać dłuższe trendy zmian i ciągi przyczynowo-skutkowe, czyli informacje niezbędne do prognozowania przyszłych zdarzeń, musimy sięgnąć do przeszłości. Badając przeszłość, wiemy coraz lepiej, jak przewidywać potencjalnie zagrażające nam zdarzenia, gdzie ich się spodziewać, jak się na nie przygotować, wreszcie jakie skutki mogą one nieść dla życia na naszej planecie.

Podsumowując, warto uczyć się historii Ziemi. Pokazuje ona, że życie jako całość ewoluuje i dostraja się do nieustannie zmieniających warunków. Warunki te nigdy nie były niezmiennie, lecz są efektem szeroko rozumianej równowagi, a zachwiać nią potrafią nawet niewielkie fluktuacje, które mogą być wzmocnione szeregiem sprzężeń zwrotnych. To są niezwykle ważne lekcje dla ludzi, którzy jako gatunek mogą nie być zdolni do dostosowania się do zmian, jakie sami wywołują. ■



Fot. 1. Meteoryt Orgueil z minerałami grupy serpentynu. Źródło: Muzeum Cyfrowe



# Bez zmian nie byłoby bioróżnorodności

Ewa Chudzińska

**Jesteś – a więc musisz minąć  
Miniesz – a więc to jest piękne**

**W. Szymborska, *Nic dwa razy***

Z punktu widzenia biologa różnorodność to wielość form życia we wszystkich jego postaciach. Miarą bioróżnorodności może być na przykład bogactwo gatunkowe – szacuje się, że obecnie na Ziemi żyje ponad 8,7 mln gatunków roślin i zwierząt, a to zaledwie ułamek rzeczywistej różnorodności. Na bioróżnorodność można także spojrzeć z poziomu zmienności osobniczej. Niemal wszystkie istoty żywe są inne, ponieważ ich istnienie warunkuje różnorodność genetyczna wyrażająca się w odmiennej sekwencji DNA każdego z osobników tworzących dany gatunek. Najbardziej zdumiewające jest to, że prawie całe życie na naszej planecie – od bakterii poprzez rośliny, do zwierząt włącznie – zdefiniowane jest przez kod genetyczny tworzący genom dokładnie w ten sam sposób.

Pojęcie genom wywodzi się z połączenia słów: gen oraz chromosom i oznacza kompletną informację genetyczną osobnika. W przypadku organizmów eukariotycznych (posiadających jądro komórkowe) termin ten odnosi się zwykle do materiału genetycznego zamkniętego w podstawowym, pojedynczym (haploidalnym) zestawie chromosomów. W kontekście organizmów prokariotycznych mówiąc genom, mamy na myśli zawartość DNA w genoforze bakterii, natomiast u wirusów – cząsteczki materiału genetycznego w postaci DNA lub RNA. Istotą genomu jest przenoszenie informacji genetycznej z pokolenia na pokolenie – stanowi on instrukcję, według której komórka wytwarza białka.

U większości organizmów instrukcja zapisana jest w DNA przy pomocy czterech znaków-zasad: adeniny, cytozyny, guaniny i tyminy. Całkowita ilość sekwencji, czyli powiązanych par zasad w DNA, na Ziemi szacowana jest na  $5,0 \times 10^{37}$ . Szyfr umożliwiający zapis informacji w DNA jest trójkowym kodem, obejmującym trzy znaki. Kod DNA zawiera  $4 \times 4 \times 4 = 64$  kombinacje zwane kodonami – trzy z kodonów sygnalizują zatrzymanie syntezy białek, funkcjonując podobnie jak kropka w zdaniu. Pozostałe 61 trójek koduje 20 aminokwasów, które komórka następnie łączy, tworząc białka. Ponieważ kodonów jest więcej niż to konieczne, kilka bliskoznacznych kodonów koduje ten sam aminokwas. To ważne, bo w przypadku mutacji może zapewnić wytworzenie właściwego białka mimo błędu w pierwotnym zapisie DNA. Ten typ mutacji to tzw. mutacja cicha, inaczej synonimiczna. Zmiana pojedynczej zasady

nukleotydu nie powoduje tu zmiany w sekwencji białka i jest uważana za neutralną. Inne mutacje mogą mieć poważniejsze skutki, przy czym różnią się zakresem oddziaływania na genom. Najmniejsze z nich, tj. mutacje punktowe, dotyczą pojedynczych zasad; mutacje chromosomowe zmieniają strukturę lub liczbę chromosomów; mutacje genomowe zmieniają całe genomy. W efekcie tych zmian – określanym wspólnym pojęciem mutagenyzy – gatunki różnią się między sobą nie tylko składem, ale i wielkością genomów.

W koncepcji wywodzącej współczesne życie na Ziemi od jednego wspólnego przodka, tzw. LUCA (ang. *last universal common ancestor*), zakłada się, że ok. 3,6 mld lat temu istniał genom, który kodował około 350 genów niezbędnych do życia komórkowego (genom minimalny) i to z niego wywodzą się wszystkie inne genomy. Obecnie najmniejszy genom znany wśród organizmów eukariotycznych należy do *Mycoplasma genitalium*, ma wielkość 580 tysięcy par zasad i koduje informacje o 482 białkach. Ludzki genom to 3,2 mld par zasad, jednak ta wielkość nie jest zbyt imponująca. Największy z zsekwencjonowanych dotąd genomów zwierząt ma 43 mld par zasad, jest 14 razy większy od genomu ludzkiego i należy do ryby dwudysznej rogozęba australijskiego (*Neoceratodus forsteri*), przewyższając genom aksolotla, poprzedniego rekordzisty w królestwie zwierząt, o 30%. Genom prapłetwca abisyńskiego (*Protopterus aethiopicus*) czeka jeszcze na zsekwencjonowanie, ale wiemy, że składa się z około 133 mld par zasad. Ale to i tak nie najwięcej, bo niepozorna roślina o nazwie *Paris japonica* ma w genomie zdumiewającą liczbę 149 mld par zasad, co czyni go 50 razy większym od ludzkiego genomu, stanowiąc największy genom, jaki kiedykolwiek opisano. Duży genom to zwykle wynik nagromadzenia licznych sekwencji powtarzalnych i niekodujących, o których funkcji trudno jest powiedzieć coś więcej poza tym, że nie mają one wpływu na stopień złożoności organizmu. W nauce jest to określane jako paradoks C-DNA oznaczający brak korelacji między złożonością organizmu a wielkością genomu.

Genomy są mierzone nie tylko długością sekwencji kwasów nukleinowych, ale także liczbą chromosomów. Integralność genomu jest bowiem utrzymywana przez cały cykl komórkowy dzięki „spakowaniu go” w postaci chromosomów. Ich liczbę w obrębie gatunków eukariotycznych zapisuje się w formie kariotypów. Kariotyp to nic innego jak liczba chromosomów somatycznej (diploidalnej) komórki organizmu. Ta liczba jest cechą stałą dla osobników tego samego gatunku, tej samej płci oraz dotkniętych tymi samymi aberracjami chromosomowymi; przykładowo, w prawidłowym kariotypie człowieka występują

23 pary chromosomów. Blisko spokrewnione osobniki – w obrębie populacji lub gatunku mają prawie identyczne kariotypy. I znów, jak w przypadku sekwencji DNA, liczba chromosomów o niczym istotnym nie świadczy. Dokładnie tyle samo – 46 chromosomów, poza człowiekiem, ma np. oliwka (*Olea europaea*) czy sympatyczny ssak mundżak chiński (*Muntiacus reevesi*). Najmniej chromosomów ma mrówka (z rodzaju *Myrmecia*), bo jej komórki somatyczne zawierają jedynie 2 chromosomy. Największej jak dotąd liczby chromosomów wśród roślin – równej 1520 – doliczono się u paproci zwanej czasem językiem teściowej (*Ophioglossum reticulatum*). Zwierzęcym rekordzistą jest orzęsek (*Sterkiella histriomuscorum*), na którego kariotyp składa się aż 16 tys. chromosomów!

Chromosomowe określenie genomu jest ujęciem statycznym. Obecnie badacze coraz częściej kwestionują je ze względu na duże różnice w zawartości genomowego DNA w trakcie cykli życiowych organizmu i wśród przedstawicieli jednego gatunku. Trzeba pamiętać, że struktura i aktywność chromosomów są niezbędne do życia, ponieważ sposób w jaki genomy zorganizowane są przestrzennie w komórkach, ma znaczenie nie tylko dla przenoszenia genomu do komórek potomnych, ale także dla ekspresji genów czy różnicowania komórek. Bez względu na to, jak zdefiniujemy wielkość genomu, faktem pozostanie, że dane z różnych linii organizmów eukariotycznych ujawniają rozległe wewnątrz- i międzygatunkowe zróżnicowanie w zawartości genomów i rzucają światło na coraz bardziej dynamiczny obraz genomu eukariotycznego, będący emanacją bioróżnorodności.

Wiadomo, że różnorodność genetyczna jest kluczowa dla przetrwania gatunków, gdyż pomaga utrzymać zdolność populacji do reagowania na zmieniające się warunki środowiskowe. Ale czy potrafimy dziś jednoznacznie odpowiedzieć na pytanie, skąd się te różnice biorą? Na pewno rozmiar i struktura genomu zależą od dwóch głównych procesów: mutagenazy oraz określenia losów mutacji w populacjach (poprzez takie mechanizmy, jak dryf genetyczny i dobór naturalny, czyli selekcja). Właściwości chemiczne i biologiczne mutagenazy określają częstotliwość występowania różnych typów mutacji, to z kolei wpływa na spektrum mutacji dostępnych do selekcji i określa szybkość ich ewolucji. Darwin uważał, że motorem ewolucji jest dobór naturalny. Warto podkreślić, że jest to proces, a nie czynnik narzucający kierunek zmian i nie ma on w sobie nic z proroctwa; innymi słowy, nie jesteśmy w stanie wybiec w przyszłość, by określić, jakie przekształcenia będą konieczne do przetrwania. Dobór naturalny oznacza jedynie tyle, że osobniki, które w wyniku mutacji okazują się lepiej przystosowane do środowiska, pozostawiają po sobie więcej potomstwa niż te przystosowane gorzej – określa się to jako zróżnicowany sukces reprodukcyjny. Często organizmy większe, silniejsze, szybsze i bezpardonowo rywalizujące z innymi odniosą sukces reprodukcyjny, ale równie prawdopodobne jest to, że stanie się on udziałem osobników mniejszych, słabszych i wolniejszych, jak miało to miejsce w przypadku ewolucji ssaków, które zastąpiły dinozaury. Nastąpiła wówczas radiacja przystosowawcza – gwałtowny proces ewolucyjny polegający na rozprzestrzenieniu się jednolitej grupy organizmów o wspólnym pochodzeniu do różnych nisz ekologicznych przy jednoczesnym zróżnicowaniu form potomnych. W efekcie kolejne pokolenia wyewoluowały unikalne cechy, które z wyjściowego gatunku utworzyły wiele innych, przystosowanych do życia w różnych środowiskach.

Istnieje sporo teorii opisujących historię zmian ewolucyjnych form życia na Ziemi. Jest wśród nich arystotelesowska drabina jestestw, teoria Lamarcka i jego żyrafy, czy też proponowana przez wielu przyrodników w różnej postaci teoria drzewa życia (inaczej drzewa filogenetycznego), którą warto tu przybliżyć. W dużym uproszczeniu drzewo życia to metafora, model i narzędzie badawcze używane do badania ewolucji życia i opisywania relacji między organizmami, zarówno żywymi, jak i wymarłymi. Darwin zakładał, że gatunki ewoluują, przez co rozumiał, że wszystkie obecnie żyjące rośliny i zwierzęta pochodzą od wcześniejszych, bardziej prymitywnych form, a więc przebyły drogę rozwoju od jednego przodka. W ten obraz wpisuje się teoria zakładająca istnienie LUCA. We współczesnym rozumieniu drzewo życia odzwierciedla złożone filogenetyczne drogi rozwoju gatunków, zakorzenionych w ostatnim uniwersalnym i wspólnym przodku życia na Ziemi. To unikatowe zestawienie ewolucyjnych powiązań pomiędzy gatunkami pokazuje rzeczywiste ewolucyjne relacje między grupami organizmów, wpisując je w pojedynczy, rozgałęziający się wzorec. Według tej koncepcji drzewo przyjmuje formę zagnieźdzonych hierarchii, które są konsekwencją dziedziczenia i specjacji, a wszystkie żyjące w przeszłości lub obecnie formy mają swoje indywidualne miejsce na tym drzewie. Również wszystkie przyszłe organizmy znajdą tam swoją przestrzeń, jako że drzewo to nieustannie się rozgałęzia. W 2002 roku Carl Woese zasugerował, że biologia powinna wyjść poza darwinowską doktrynę wspólnoty pochodzenia – według niego „korzeń uniwersalnego drzewa to artefakt powstały w wyniku wciskania przebiegu ewolucji w formę drzewa, kiedy ta reprezentacja jest niewłaściwa”. Ford Doolittle zaproponował zastąpienie uniwersalnego drzewa filogenetycznego podobną bardziej do sieci – syntezą życia. Maria Rivera i James Lake zasugerowali, że „na najgłębszym poziomie [...] drzewo filogenetyczne jest w istocie pierścieniem”.

Bez względu na to, która z teorii okaże się w przyszłości tą właściwą, pewne jest, że poziom bioróżnorodności w poszczególnych okresach życia na Ziemi zmienia się, czyli ewoluuje. Nowoczesne techniki badawcze umożliwiają dzisiejszym naukowcom dokładne poznanie poziomu bioróżnorodności i określenie stopnia jej zróżnicowania wewnątrz- i międzypopulacyjnego. Dane molekularne w połączeniu z informacjami o budowie i występowaniu gatunków pozwalają odtwarzać drogi filogenazy i przewidywać wymieranie niektórych gałęzi – linii genealogicznych. I choć ten proces wydaje się w ostatnim czasie przyspieszać, różnorodność życia na Ziemi – we wszystkich jego postaciach – wielokrotnie była już wystawiana na próbę. Szacuje się, że ponad 99,9% wszystkich gatunków, jakie kiedykolwiek żyły na Ziemi, czyli ponad 5 mld, wyginęło w pięciu masowych wymieraniach, a jednak życie wciąż się odradzało. Jedne gatunki znikły, miejsce po nich zajmowały kolejne. Można się zastanawiać, czy gałąź *Homo sapiens* przetrwa kolejne masowe wymieranie, niemniej o trwanie drzewa życia możemy być raczej spokojni. ■

# O ziemskiej litosferze

Wojciech Stawikowski

*Pochwalony bądź, Panie mój, przez siostrę naszą matkę Ziemię,  
która nas żywi i chowa*

św. Franciszek z Asyżu, *Pieśń słoneczna* tłum. Leopold Staff

Pojęcie litosfery z lingwistycznego punktu widzenia harmonijnie konweniuje z hydrosferą, atmosferą czy niekiedy wyróżnianymi też kriosferą i pedosferą<sup>1</sup>, a także biosferą, w związku z czym zdaje się znakomicie pasować do spójnego opisu wierzchniej części naszej planety. Traktowany jako element listy wymienionych stref (warstw, powłok), termin litosfera nadaje się do rozważań na temat wzajemnych powiązań pomiędzy poszczególnymi elementami złożonego systemu, za jaki należy uznać Ziemię. Dotyczy to zwłaszcza przypowierzchniowej strefy globu, zamieszkałej przez formy życia w całym ich bogactwie i zróżnicowaniu (ujmowanym pojęciem bioróżnorodności), a od tysięcy lat zagospodarowywanej i przekształcanej przez ludzkość. To językowe pokrewieństwo terminów nie jest przypadkiem i wiąże się z jednoczesnym wprowadzeniem do nauki pojęć: litosfera, hydrosfera i biosfera<sup>2</sup>. Dokonał tego przed bez mała 150 laty wybitny austriacki geolog Eduard Suess<sup>3</sup>. W swoich rozważaniach wszystkie główne ziemskie powłoki, a więc lito-, hydro- i atmosferę, wymieniał w kontekście istnienia przestrzeni dogodnej dla rozwoju życia (czyli w odniesieniu do obecności biosfery). W dziele, w którym pierwszy raz zastosował wzmiankowane pojęcia, napisał on m.in.: „rozwój i rozprzestrzenianie się życia organicznego było w dużym stopniu zależne od rozwoju struktury powierzchni litosfery” [Suess, 1875, s. 160]. Czas przeszły w tej wypowiedzi należy odnieść do dziejów Ziemi.

Dosłowne znaczenie słowa **litosfera**, wywodzącego się od greckich wyrazów *lithos*, czyli kamień oraz *sphaira* tłumaczonego jako glob, obiekt o kulistym kształcie (również taki, który jest pusty w środku), celnie oddaje charakter najbardziej zewnętrznej, budowanej przez skały<sup>4</sup> powłoki naszej planety. Jednocześnie, termin litosfera jest dziś powszechnie stosowany w odniesieniu do głównej aktualnie teorii naukowej wyjaśniającej mechanizmy wielkoskalowych zjawisk toczących się zarówno obecnie, jak i od miliardów lat na Ziemi. Procesy te – odpowiedzialne za formowanie się pasm górskich, łańcuchów wulkanicznych, den oceanicznych, za udokumentowaną na przestrzeni milionów lat zmienność warunków klimatycznych na poszczególnych kontynentach, czy za nieustannie modyfikowaną wzajemną konfigurację przestrzenną i zmiany położenia kontynentów i oceanów na planecie – wyjaśniane są aktualnie

w świetle **teorii tektoniki płyt**, która w ścisłym sensie odnosi się właśnie do płyt litosferycznych (albo inaczej płyt litosfery).

Należy w tym miejscu podkreślić, że wyróżnianie litosfery jako najbardziej zewnętrznej warstwy w obrębie Ziemi jest niezależne i odrębne w stosunku do podstawowego, powszechnie stosowanego schematu budowy planety, w ramach którego wyróżnia się pięć podstawowych powłok (warstw, *de facto* także sfer, gdyby rozpatrywać ich geometrię). W jego myśl, idąc od powierzchni globu **wnętrze Ziemi zbudowane jest ze skorupy, górnego i dolnego płaszcza, a także jądra zewnętrznego i wewnętrznego**. Litosfera nie mieści się w tym podziale, a jej wyodrębnianie opiera się na innych założeniach, o czym piszę poniżej. Podział ziemskiego interioru na skorupę, płaszcz oraz jądro bazuje przede wszystkim na odmiennym budulcu każdej z wymienionych powłok. Skorupa zbudowana jest ze skał (złożonych głównie z krzemianów i glinokrzemianów) o względnie niskich gęstościach, wzbogaconych w stosunku do pozostałych warstw Ziemi o lżejsze pierwiastki. Obok krzemu i tlenu materiał skorupowy zawiera znaczące ilości glinu, a także sodu, potasu i wapnia. Z kolei w występującym poniżej wyraźnie zaznaczającej się w pomiarach geofizycznych nieciągłości MOHO ziemskim płaszczu dominują skały budowane przez minerały krzemianowe o wyższej gęstości i o składzie bogatym w magnez, a także żelazo. Wzrost gęstości w głąb planety warunkowany jest siłą grawitacji, odpowiadającą za stopniowy przyrost ciśnienia w miarę rosnącej głębokości (w przypadku skał mówi się o ciśnieniu litostatycznym, a zbiorczo dla wszystkich substancji budujących wnętrza Ziemi – o ciśnieniu geostatycznym). Materia tworząca jądro Ziemi – jego zewnętrzną powłokę występującą w formie płynnej oraz jądro wewnętrzne o stałym składzie skupienia – ma najwyższe wartości gęstości, tylko nieco obniżone w przypadku budowanego przez ciekły stop jądra zewnętrznego. Z punktu widzenia składu chemicznego jądro w jego obu częściach buduje przede wszystkim żelazo z kilkuprocentową domieszką niklu. Cała przedstawiona zmienność w obrębie naszej planety udokumentowana jest przede wszystkim poprzez dane dotyczące rozchodzenia się fal sejsmicznych we wnętrzu Ziemi, a dokładniej rozkładu prędkości tych fal, silnie uzależnionego od gęstości ośrodka ich propagacji, a także stanu skupienia materii.

1. Kriosfera to wyróżniana dodatkowo powłoka Ziemi zbudowana z lodu, obejmująca głównie lądolody i lodowce; stanowi ona element hydrosfery. Pierwszy człon tego terminu pochodzi od greckiego kryos – lodowate zimno, mróz. Do światowej nauki termin ten wprowadził Polak, wybitny geofizyk i meteorolog, słynny polarnik Antoni Bolesław Dobrowolski (1872-1954). Z kolei termin pedosfera oznacza najcięższą powłokę Ziemi, reprezentowaną przez gleby. Pochodzi od greckiego wyrazu pedon oznaczającego grunt.

2. Słowo atmosfera, wywodzące się ze słowa atmos [gr. para wodna], ukuł i jako pierwszy w nauce zastosował holenderski przyrodnik, autor prawa załamania światła, Willebord Snellius (1580-1626).

3. Eduard Suess (1831-1914) był jednym z prekursorów nowoczesnej geologii, zwłaszcza w zakresie tektoniki oraz geologii regionalnej. Wprowadził wiele pojęć i koncepcji, które do dziś funkcjonują w nauce – m.in. zasugerował istnienie w przeszłości paleokontynentu Gondwana oraz paleooceanu Tetyda. Stworzył termin waryscydy dla późnopalaeozoicznego pasma orogenicznego w Europie środkowej i zachodniej (nazywanego też hercynidami). Był wybitnym badaczem Alp oraz Masywu Czeskiego. Autor cenionego, w swoim czasie czołowego podręcznika do geologii *Das Antlitz der Erde* (Oblicze Ziemi).

4. Wyraz kamień ma charakter potoczny i w nomenklaturze naukowej z zakresu geologii oraz dyscyplin jej pokrewnych używany jest rzadko i niechętnie. Stosuje się go w pojęciach pobocznych, np. kamienie ozdobne, kamienie szlachetne.

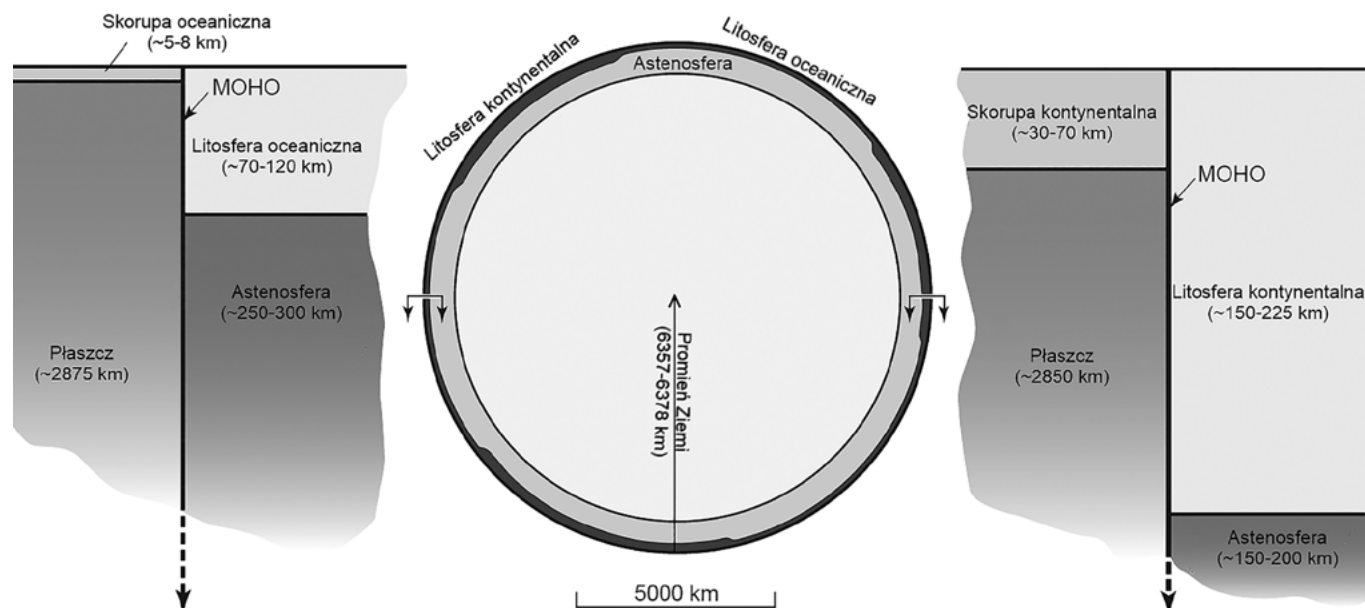


Skąd zatem bierze się pojęcie litosfery i jak je poprawnie – wobec powyższego, spójnego schematu – zastosować? Wyszczególnianie tej powłoki nie stoi w sprzeczności z zarysowanym podziałem budowy Ziemi. Nie powinno się jej jednak w ten podział włączać. Wyróżnianie litosfery wynika bowiem z innego kryterium – opiera się ono nie na zmienności składu chemicznego czy mineralnego ani na różnicach gęstościowych, a na zróżnicowanych własnościach mechanicznych skał na dystansie pierwszych kilkuset kilometrów w głąb Ziemi. Okazuje się, że wierzchnie 100-200 km (Ryc. 1) reprezentowane jest przez powłokę zachowującą się sztywno, a przy tym deformującą się w sposób kruchy (w ujęciu wielkoskalowym i w pewnym uproszczeniu, ponieważ skały tworzące litosferę w przeważającej części, zwłaszcza na większych głębokościach podlegają deformacjom podatnym, a więc zachodzącym bez przerwania ciągłości ośrodka). Powłoka ta na Ziemi jest podzielona współcześnie na co najmniej kilkanaście olbrzymich, oddzielonych od siebie segmentów. Segmenty te to **płyty litosfery**, zbudowane ze skorupy, ale ponadto – w przeważającej mierze – z podścielającej ją najwyższej partii górnego płaszczu. Znaczące zróżnicowanie grubości (używając geologicznej terminologii: miąższości) litosfery wynika z faktu, iż ma ona różny charakter w przypadku obszarów oceanicznych i kontynentalnych, w czym koresponduje z podziałem skorupy na dwa typy reprezentujące te środowiska. Mówimy o **litosferze oceanicznej oraz kontynentalnej**. Pierwsza jest cieńsza (Ryc. 1), w swej najpłytszej części zbudowana ze skał o wyższych niż na kontynentach gęstościach (tworzą skorupę oceaniczną o, w uogólnieniu, bazaltowym składzie). Litosfera kontynentalna ma w swej górnej partii skorupę o przeciętnie pięciokrotnie większej miąższości (30-35 km) niż typowa litosfera oceaniczna (w przypadku której skorupa ma 6-7 km), a przy tym zbudowaną z lżejszych skał i mającą po uśrednieniu skład granitoidowy. Taka odmienność cech w obrębie ziemskiej litosfery tłumaczy je-

den z podstawowych procesów tektoniki płyt, czyli subdukcję cięższej litosfery oceanicznej pod kontynentalną zachodzącą w wyniku ich konwergencji.

Ponieważ litosfera stanowi czytelnie wyodrębniającą się, udokumentowaną pomiarami geofizycznymi warstwę, znajdująca się pod nią musi strefa o wyraźnie odmiennych własnościach, stojąca wobec niej w kontraście. Jest nią **astenosfera**, której nazwa wywodzi się nie od substancji ją budującej, jak jest to w przypadku lito- czy hydrosfery, a od jej właściwości. Słowo *asthenes* oznacza po grecku słaby. Oddaje to adekwatnie własności mechaniczne charakteryzujące 150-300 km wewnątrz Ziemi znajdujące się bezpośrednio pod litosferą (Ryc. 1). Skały budujące astenosferę, w odróżnieniu od sztywnej litosfery, zachowują się bowiem plastycznie i taką cechą nadają całej tej warstwie. W bardzo powolnym tempie płyną one poprzez procesy pełzania w stanie stałym (materia w formie ciekłej występuje w astenosferze w wyraźnej mniejszości), stanowiąc swego rodzaju pasy transmisyjne dla znajdujących się ponad astenosferą sztywnych segmentów – płyt litosferycznych, które dryfując, zderzają się ze sobą, pogrążają pod siebie, wzajemnie rozsuwają lub przemieszczają wzdłuż swych wspólnych granic. Ruch astenosfery jest efektem funkcjonowania w ziemskim płaszczu **prądów konwencyjnych** wynikających z różnic termicznych pomiędzy dolnym a górnym płaszczem. Materia płaszczu (należy przypomnieć, że głównie w postaci skał, a więc w stałym stanie skupienia) powoli cyrkuluje w formie tzw. komórek konwekcyjnych<sup>5</sup> lub wznosi się w postaci gigantycznych słupów znanych jako pióropusze płaszczu. Ciepłsza substancja występująca w spągowej części płaszczu, w kontakcie z jeszcze gorętszym jądrem wznosi się, zaś chłodniejsza ulega pogrążaniu. W sąsiedztwie litosfery przemieszcza się natomiast wzdłuż tej granicy, w przybliżeniu poziomo. Pojęcie astenosfery jest znacznie starsze niż powstała w latach 60. XX wieku teoria

Rycina 1. Schemat zestawiający niezależne od siebie podziały przypowierzchniowej części Ziemi na skorupę i płaszcz oraz litosferę i astenosferę (według Davisa i in., 2011, zmodyfikowane)



5. Analogiczny proces konwekcji materii zachodzi także w ciekłym jądrze zewnętrznym. Jego efektem jest występowanie wokół tzw. błękitnej planety pola magnetycznego, odpowiedzialnego za istnienie magnetosfery. Jest to zjawisko zbawienne dla występowania życia na Ziemi, ponieważ odpycha strumienie zabójczego promieniowania oraz cząstek elementarnych emitowanych przez Słońce, znane pod nazwą wiatru słonecznego.

tektoniki płyt. Funkcjonowanie tej słabej, łatwo podlegającej deformacjom warstwy wewnątrz Ziemi zasugerowano pięćdziesiąt lat wcześniej [Barrell, 1914] w ramach rozwoju koncepcji izostazji. Tłumaczy ona zróżnicowanie rzeźby powierzchni planety pogrążaniem się oraz dźwiganie sztywnych bloków litosferycznych o różnej masie, zachodzącym dzięki uginaniu się słabej astenosfery. Wymienione ruchy pionowe, obserwowane wskutek zmian ciężaru litosfery (np. w wyniku pojawienia się lub zaniku łądolodu) lub zaistnienia różnic w jej miąższości (np. wskutek ruchów górotwórczych), ukierunkowane są na osiągnięcie stanu określanego pojęciem równowagi izostatycznej.

Procesy tektoniki płyt, dyktujące permanentną przebudowę litosfery na Ziemi, są niewyobrażalnie powolne. Jak wskazują pomiary satelitarne, a także obliczenia oparte na danych pośrednich zapisanych w skałach pochodzących z dawnych epok czasu geologicznego, obszary wyznaczone powierzchniami rzędu dziesiątek milionów kilometrów kwadratowych przemieszczają się z prędkością kilku, maksimum kilkunastu centymetrów na rok, a więc w tempie absolutnie niedostrzegalnym przez ludzką percepcję. Gdy jednak weźmie się pod uwagę geologiczną skalę czasu (Ziemia ma ponad 4,5 mld lat<sup>6</sup>), liczoną w milionach lat, przebieg tych zjawisk pociąga za sobą wędrówkę płyt litosfery na dystansach rozpatrywanych w skali całej planety: mierzonych w tysiącach i dziesiątkach tysięcy kilometrów. Dla przykładu, fragmenty kontynentalne stanowiące dziś obszar Polski przed ok. 500 mln lat (w kambrze) znajdowały się na półkuli południowej i to poniżej zwrotnika Koziorożca. Z tymi pozornie ślamazarnymi procesami wiążą się też gigantyczne oddziaływania siłowe w obrębie litosfery, skutkujące m.in. trzęsieniami ziemi, wulkanizmem oraz innymi powiązanimi z nimi kataklizmami (np. falami tsunami i katastrofalnymi osuwiskami).

Różnicowanie (inaczej dyferencjacja) naszej planety – zachodzące po uformowaniu się jej z zagęszczonego skupiska gazu, pyłu i drobnych okruchów materii krążących wokół rodzącego się Słońca i docelowo skutkujące koncentryczną, warstwową budową Ziemi – nie trwało długo. Najstarszy dotąd kryształ cyrkonu – minerału typowego dla skał pochodzących z ziemskiej skorupy – wydatowany został na 4,4 mld lat<sup>7</sup>, czyli ma zaledwie ok. 150 mln lat mniej niż szacowany wiek całego globu. Można wnioskować, że było to już po okresie zdominowania powierzchni Ziemi przez tzw. oceany magmy, kiedy to przeważająca część planety nie była jeszcze pokryta zastygłą powłoką w formie skał. Przynajmniej od ok. 4 mld lat – a co sugerują wymienione dane geochronologiczne, prawdopodobnie od jeszcze dłuższego czasu – można w przypadku Ziemi mówić o skorupie, która funkcjonuje powyżej bardziej gęstego płaszczu. Można też zakładać, że już wówczas funkcjonowały także litosfera oraz astenosfera, jednak przez pierwsze dwa miliardy lat te dwie warstwy (sfery)

mechaniczne miały inne cechy niż obecnie. Wiązało się to z faktem, iż wewnątrz Ziemi było wówczas znacząco cieplejsze niż aktualnie.

Założenie o istnieniu skorupy (i litosfery) ziemskiej od ponad 4 mld lat nie oznacza, że skały obserwowane dziś na powierzchni naszej planety mają taki wiek. Procesy tektoniki płyt powoli, ale bezustannie przerabiają materię budującą skorupę i całą litosferę. Podlega ona intensywnemu, by tak rzec, recyklingowi. W przypadku litosfery kontynentalnej – przede wszystkim jej skorupowej części – recykling ten wiąże się z procesami orogenicznymi (górotwórczymi), magmatyzmem i metamorfizmem, a wreszcie z zachodzącymi na powierzchni: wietrzeniem, erozją i sedymentacją. Z kolei litosfera oceaniczna niemalże w całości ulega destrukcji w wyniku procesów subdukcji. Jest bowiem pogrążana w niższej położonym ziemskim płaszczu i to, jak wykazują badania metodą tomografii sejsmicznej, na głębokości znacznie większe niż astenosfera. Najstarsza skorupa oceaniczna funkcjonująca w obrębie oceanicznych części płyty tektonicznej ma dziś zaledwie ok. 200 mln lat<sup>8</sup>. Gdy pojawia się pytanie, dlaczego – w efekcie tego sukcesywnego i skutecznego niszczenia litosfery oceanicznej – nie występuje jej deficyt, należy wyjaśnić, że jest ona jednocześnie produkowana na grzbietach śródoceanicznych, gdzie w ten sposób dokonuje się rozrost dna morskiego. Procesy destrukcji litosfery wynikające ze zderzania się i subdukcji płyt oraz zjawiska jej produkcji (tzw. akrecji) w strefach spreadingu są zbilansowane, co wiąże się m.in. ze stałym promieniem Ziemi w trakcie niemal całej jej historii, poza najbardziej początkowymi fazami formowania się planety. Jak wykazały dokładne pomiary i modele komputerowe, współcześnie sumaryczne długości granic konwergentnych oraz dywergentnych między płytami litosfery na naszym globie są zbliżone. Jedne i drugie wynoszą łącznie ponad 60 tysięcy kilometrów.

Istnieje wiele zjawisk potwierdzających poprawność założeń teorii tektoniki płyt litosfery. Poza danymi paleomagnetycznymi, a także pomiarami dostarczanymi przez geodezję satelitarną czy głębokie badania geofizyczne, interesującymi dla nich świadectwami są wybrane typy skał. Należą do nich m.in. pochodzące z dawnych stref subdukcji płyt, a znajduwane dziś na powierzchni – **eklogity** (Ryc. 2). Są one zbudowane głównie z granatów i omfacytów (rzadkiej odmiany piroksenów), a więc z minerałów o podwyższonej gęstości i stanowią – zmetamorfizowane na znaczących, przekraczających 40-50 km, a czasami nawet 100 km głębokościach – skały o składzie bazaltowym. Zwykle eklogity to pozostałości po dawnej skorupie oceanicznej pogrążonej wskutek subdukcji. Powstawanie tych skał wiąże się z bardzo wysokimi ciśnieniami (ponad 12-15 kbar, często >25 kbar), które występują wyłącznie na głębokościach odpowiadających górnemu płaszczowi Ziemi. Bazalty – jeden z najpow-

6. Dokładny wiek Ziemi to, jak się dziś uważa, 4,567 mld lat (zob. postanowienia Międzynarodowej Komisji ds. Stratigrafii przy Międzynarodowej Unii Nauk Geologicznych: <https://stratigraphy.org/chart#latest-version>). Został on ustalony na podstawie datowań radiometrycznych meteorytów (z grupy chondrytów) oraz dzięki porównaniom danych izotopowych dotyczących meteorytów oraz minerałów ołowiu występujących na Ziemi. Podany wyżej wiek określa powstanie najstarszych składników chondrytów, tzw. inkluzji wapniowo-glinowych (CAI), a więc koresponduje z najbardziej wstępnymi fazami formowania się planety. Inny padający niekiedy w publikacjach naukowych wiek Ziemi to 4,54 mld lat. Okres ok. 30 mln lat stanowiący różnicę w stosunku do starszej daty był najprawdopodobniej niezbędny dla uformowania się Ziemi jako obiektu planetarnego, w tym wykształcenia się jądra.

7. Datowania radiometryczne metodą uran-olów przeprowadzone na ziarnach cyrkonów występujących w prekambryjskich (archaicznych) zlepieńcach z Jack Hills w zachodniej Australii, wykazały wiek najstarszego znalezionego dotąd kryształu powstałego na Ziemi. Jest on równy 4,404 mld lat.

8. W obrębie kontynentów miejscami można też natrafić na różnych rozmiarów fragmenty górnych partii kopalnej litosfery oceanicznej – tzw. ofiolity. Najślawniejsze z nich znajdują się na Cyprze (ofiolit Troodos) oraz w Omanie (ofiolit Semail). Tego rodzaju fragmenty dawnej, liczącej ok. 400 mln lat litosfery oceanicznej znajdują się również w Polsce, na Dolnym Śląsku. Jest to tzw. ofiolit śródkoswudecki, którego największą część stanowi Masyw Ślęży.



**Rycina 2. Eklogit – skała metamorficzna powstająca na głębokościach przekraczających 50 km (a więc poniżej typowego poziomu powierzchni MOHO w przypadku skorupy kontynentalnej). Dokumentuje procesy subdukcji i kolizji płyt litosferycznych. Laminy różowo-jasnobrażowe zbudowane są z granatów, a jasnozielone z omfacytów. Próbkę pochodzi z metamorfiku Łądko-Snieżnika w Sudetach.**

szechniejszych rodzajów skał wulkanicznych – oraz skały im pokrewne chemicznie są typowe dla przypowierzchniowych partii litosfery i na płaszczowe głębokości trafić mogą w zasadzie wyłącznie w wyniku ich pograżenia w strefie konwergencji płyt tektonicznych. Wraz z tworzącymi podstawowy budulec dna oceanicznego bazaltami, a także zdeponowanymi na nich osadami, w obrębie subdukowanego płata litosferycznego na znaczące głębokości pograżane są duże ilości wody, co sprzyja procesom topienia skał zachodzącym w nadległej płycie. To z kolei prowadzi do rozwoju magmatyzmu, objawiającego się m.in. zjawiskami wulkanicznymi, typowymi dla stref subdukcji (np. Andy, Indonezja, Karaiby). Skały eklogitowe – istotne jako swoisty przyrodniczy dokument globalnych procesów tektonicznych – spotykane są w wychodniach na powierzchni Ziemi względnie rzadko i najczęściej w niewielkich ilościach. Wynika to z faktu, że ich występowanie wymaga wcześniejszego przemieszczenia ich (tzw. ekshumacji) z głębokości przekraczających przeciętną miąższość kontynentalnej skorupy ziemskiej, wynoszącą ok. 30-35 km<sup>9</sup>. Na terytorium Polski można jednak natknąć się na niewielkie wystąpienia skał eklogitowych. Szereg ich niewielkich odstonień znajduje się na Dolnym Śląsku, przede wszystkim w Sudetach, a dokładniej w Masywie Śnieżnika, stanowiącym element regionalnej jednostki geologicznej o nazwie metamorfik Łądko-Snieżnika<sup>10</sup>.

Do dziś nie ustalono dokładnie i ponad wszelką wątpliwość, kiedy rozpoczęły się na Ziemi<sup>11</sup> procesy typowe dla tektoniki płyt litosfery. Według części badaczy było to jeszcze w hadeiku – pierwszym eonie w historii planety, czyli wcześniej niż 4 mld lat temu, podczas gdy są naukowcy, którzy określają ich początek na ok. 700 mln lat temu. Najczęściej przyjmuje się jednak, że procesy tektoniki płyt jako dominujące dla kształtowania oblicza naszej planety funkcjonują od schyłku archaiku (eonu następującego po hadeiku), czyli od ok. 2,5 mld lat temu [Hawkesworth i in., 2020]. Zakłada się przy tym, że w różnych częściach globu nabierały one znaczenia w róż-

nym czasie, na przestrzeni przynajmniej kilkuset milionów lat. To właśnie z rozpoczęciem procesów tektoniki płyt wiązać należy ukształtowanie się litosfery w jej formie analogicznej do tej obserwowanej współcześnie.

Pierwotna i młoda Ziemia miała natomiast wyraźnie inną charakterystykę niż współczesna. Była wówczas cieplejsza (do dziś podlega przebiegającemu wciąż stygnięciu), a nasilenie procesów endogenicznych, zwłaszcza zjawisk wulkanicznych, było większe. Z punktu widzenia ewolucji życia na Ziemi, a przede wszystkim intensyfikacji występowania jego przejawów – czyli wzrostu bioróżnorodności, kluczową różnicę między dawnym (występującym w hadeiku oraz archaiku) i dzisiejszym środowiskiem wierzchniej części planety stanowiła odmienność atmosfery znajdującej się wokół niej (w tym przede wszystkim jej inny skład). Do ok. 2,5 mld lat temu była ona całkowicie lub w przeważającej mierze beztlenowa (anoksyczna), podobnie zresztą jak wody oceaniczne, co w istotny sposób ograniczało rozwój świata przyrody ożywionej. Wspomniany okres przełomu koresponduje z momentem wyznaczającym, według wielu naukowców, zafunkcjonowanie na dobre procesów tektoniki płyt litosfery. Należy jednak podkreślić, że wytworzenie się atmosfery tlenowej jest przede wszystkim zasługą procesów zachodzących w świecie przyrody ożywionej, głównie tlenotwórczą aktywnością fotosyntetyzujących sinic (cyjanobakterii).

Nie ulega wątpliwości, że litosfera stanowi niezbędne podłoże, swoiste szkiełko podstawkowe dla zjawiska życia. Jest dla jego przejawów materialnym fundamentem, przy uwzględnieniu faktu, że życie na Ziemi funkcjonuje przede wszystkim dzięki obecności – posiadających korzystne dlań cechy – hydro- i atmosfery<sup>12</sup>. Należy też pamiętać, że litosfera nie jest powłoką występującą wyłącznie w obrębie naszej planety. Wyróżnia się ją także w przypadku innych planet typu ziemskiego oraz księżyców, w tym na satelicie naszej planety. Na Marsie ma ona mierzyć 500 km miąższości, jak wykazały wyniki pomiarów geofizycznych przeprowadzonych w ostatnich latach przez lądownik InSight. Z kolei litosfera Księżyca sięga niemalże jego środka i liczy ponad 1000 km. Obecność litosfery nie jest więc czynnikiem determinującym występowanie życia. Zaznaczyć jednak warto, że na wszystkich obiektach Układu Słonecznego posiadających litosferę, oprócz Ziemi, powłoka ta ma charakter zwarty i nieruchomy. Taki typ jej budowy oddawany jest obrazowym angielskim pojęciem *stagnant lid* (stagnującego, nieruchomego wieka). Wyłącznie na naszej planecie bezustannie trwają intensywne, dynamiczne procesy przebudowujące litosferę.

Gdy rozważa się kwestię obecności życia na Ziemi, jego bogatej różnorodności, warunków sprzyjających jego pojawieniu się oraz rozkwitowi, uwzględnianie litosfery jako podstawowego elementu systemu warunkującego istnienie życia nie

9. Skorupa kontynentalna osiąga miąższość ok. 70 km w strefach kolizji kontynentów. Współczesnym przykładem obszaru o tak znacząco pogrubionej skorupie jest pasmo Himalajów, gdzie miejscami sięga ona 80 km. Większe miąższości skorupy obserwuje się również w częściach kontynentów o najstarszym czasie konsolidacji – w tzw. kratonach. Dla przykładu, kraton wschodnioeuropejski, którego fragment znajduje się w północnowschodniej Polsce, osiąga na obszarze naszego kraju miąższość do ok. 50 km, a w południowej Finlandii 60-65 km.

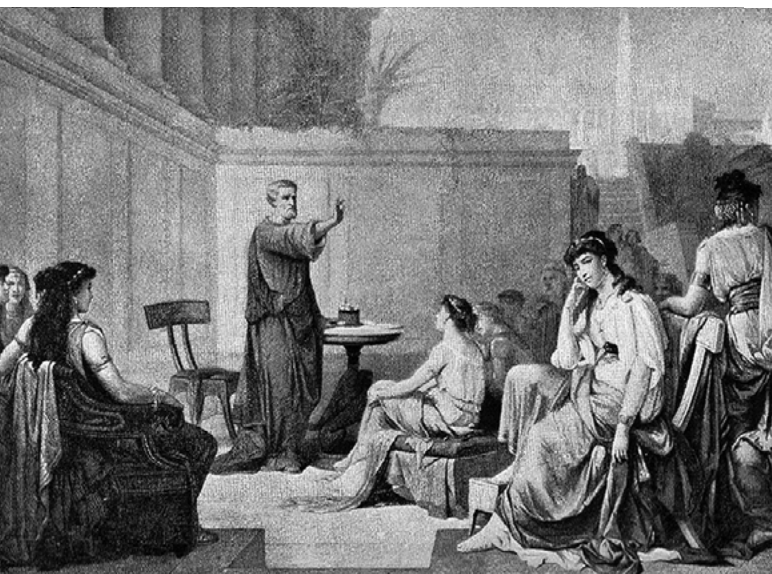
10. Metamorfik to w terminologii geologicznej jednostka regionalna zbudowana przede wszystkim ze skał metamorficznych (przeobrażonych), a więc ukształtowanych przez rekrytalizację w stałym stanie skupienia, pod wpływem zmian ciśnienia, temperatury oraz obecności naprężeń o genezie tektonicznej.

11. Należy tu zaznaczyć, że Ziemia – według obecnego stanu wiedzy – jest jedyną planetą w Układzie Słonecznym, na której stwierdzono procesy tektoniki płyt. Pozostałe planety skaliste (Merkury, Wenus, Mars) oraz księżyce nie ujawniają przekonujących przesłanek na ich występowanie: ani obecnie, ani w przeszłości.

12. Istnieje także ekosystem tzw. głębokiej biosfery. Organizmy żywe, których metabolizm nie jest oparty na tlenie, zostały udokumentowane w litosferze na głębokościach setek metrów lub wręcz kilometrów. W głębokiej biosferze egzystują proste organizmy jednokomórkowe: archeony oraz bakterie.



Rycina 3. Callot, Jacques (1592-1635) - *Mundum tradidit disputationi eorum*.  
Źródło: domena publiczna.



Rycina 4. Szkoła pitagorejska. Źródło: domena publiczna.

powinno być pomijane. Specyficzne cechy litosfery, zwłaszcza jej górnej, przypowierzchniowej części (w tym zróżnicowanie składu, objawiające się różnorodnymi typami skał i budujących je minerałów, wynikającymi m.in. ze zmienności ich chemizmu), istotnie wpływają na świat przyrody ożywionej, np. poprzez specyficzne typy gleby, różne zdolności skał do magazynowania wód podziemnych i inne cechy zależne od skalnego podłoża. Także wielkoskalowe procesy, którym podlega litosfera na naszej dynamicznej planecie – ujmowane zbiorczo jako tektonika płyt – istotnie wpływają na przyrodę ożywioną. Dryf płyt kontynentalnych i ich zderzanie się prowadzące do powstawania pasm górskich, a także otwieranie się i zamykanie oceanów od miliardów lat kształtują oblicze Ziemi jako miejsca egzystencji żywych organizmów. Funkcjonowanie obszarów o nasilonych procesach wulkanicznych – skoncentrowanych na lądach w strefach subdukcji, głęboko pod wodą wzdłuż grzbietów śródoceanicznych, czy nad tzw. plamami gorąca – także decyduje o warunkach funkcjonowania życia. Prawdopodobnie nasilony wulkanizm wynikający ze specyficznego rozkładu stref aktywności tektonicznej w skali globalnej był odpowiedzialny za przynajmniej część wielkich wymierań w historii Ziemi, np. to na przełomie permu i triasu. Z kolei bezustanne przemieszczanie się płyt litosfery – odbywające się wprawdzie bardzo powoli, jednak trwale przebudowujące układy i modyfikujące położenie lądów, mórz i lądolodów – przyczynia się do mierzonej w tysiącach i milionach lat zmienności klimatu, rejestrowanej na poszczególnych obszarach naszej planety. Konkluzja jest zatem jednoznaczna. Procesy zachodzące w litosferze, a także sama jej specyfika wywierały i wciąż mają ogromny wpływ na obecność oraz ewolucję życia na Ziemi, jak również na obraz całej jego aktualnej i przyszłej bioróżnorodności.

W starożytności, w szkole filozoficznej funkcjonującej wokół Pitagorasa, stworzona została piękna koncepcja harmonii sfer. Dotyczyła ona ciał niebieskich, a więc astronomii, uwzględniała prawidłowości rządzące muzyką, a opierała na zależnościach matematycznych. Nie odnosząc się do meritum tej teorii, można pokusić się o posłużenie się pojęciem harmonii, by w sensie metaforycznym dostrzec ją także w kontekście sfer wyróżnionych na naszej planecie. Szczególne, harmonijne współzależności pomiędzy atmosferą, hydrosferą i litosferą, a także istnienie w przypadku Ziemi kolejnych sfer (np. realnie kulistego w obrysie jądra generującego magnetyczną, pozwalającą na funkcjonowanie wyjątkowego fenomenu, jakim jest życie. Zależności te wymagają dalszego poznawania, także przez nauki geologiczne, by pozwolić na jak najpełniejsze poznanie tego jedyne w swoim rodzaju zjawiska. ■

#### Bibliografia:

Barrell Joseph, 1914, *The Strength of the Earth's Crust*, Journal of Geology, 22:5.

Davis George H., Reynolds Stephen J., Kluth Charles F., 2011, *Structural Geology of Rocks and Regions*, wyd. Wiley & Sons.

Hawkesworth Chris J., Cawood Peter A., Dhuime Bruno, 2020. *The Evolution of the Continental Crust and the Onset of Plate Tectonics*, Frontiers in Earth Science, 8:326.

Suess Eduard, 1875, *Die Entstehung der Alpen*, wyd. Braumüller, Wiedeń.

# Bioróżnorodność w świecie ekstremofili

- od początków życia na Ziemi po czasy współczesne

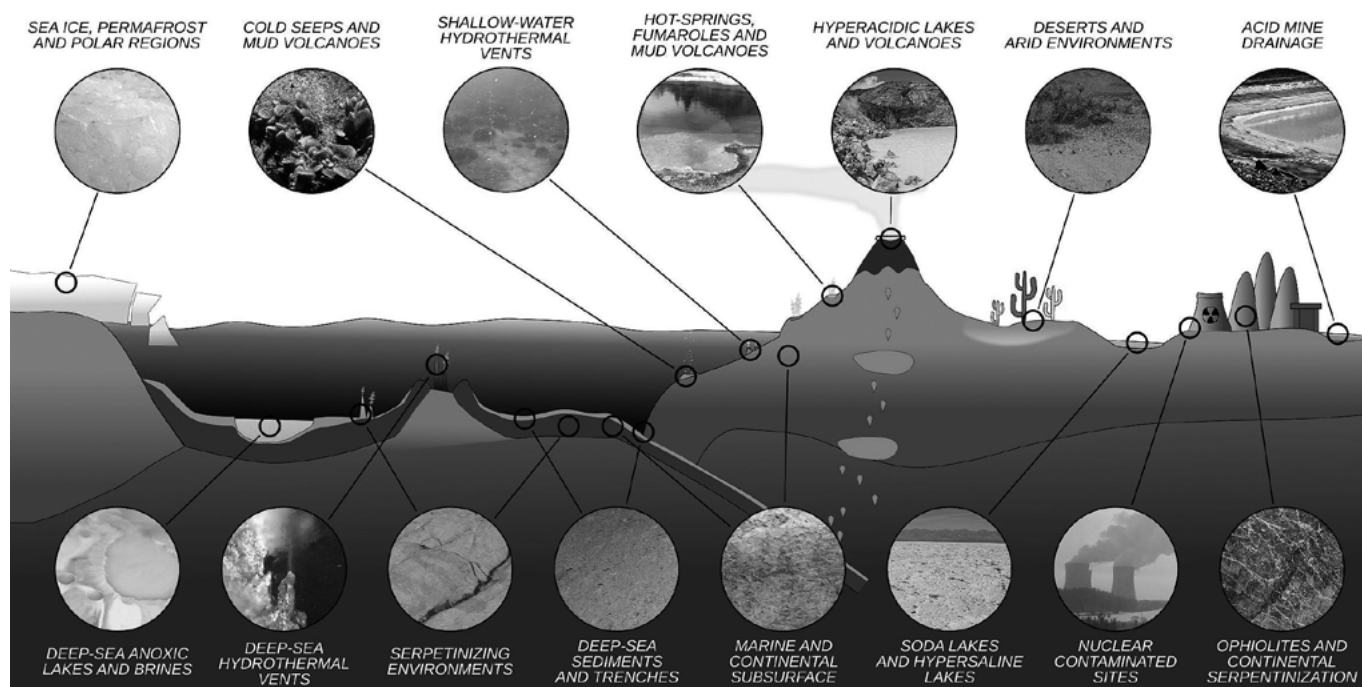
Ewa Borowska

Organizmy ekstremofilne, czyli organizmy zdolne do przetrwania w najbardziej ekstremalnych warunkach, odnajdziemy we wszystkich trzech domenach, tj. wśród: archeonów (łac. *Archaea*), bakterii (łac. *Eubacteria*) i eukariontów (łac. *Eucarya*). Na dwie pierwsze domeny składają się organizmy prokariotyczne – pozbawione jądra komórkowego, a na ostatnią – organizmy jądrowe. Każda z domen charakteryzuje się innymi cechami biologicznymi, jednakże wszystkie domeny występują w całej biosferze ziemskiej, tj. w litosferze, hydrosferze i atmosferze (Ryc. 1). Należy zaznaczyć, iż często używa się nazwy poliekstremofil – odnosi się ona do organizmów ekstremofilnych narażonych na więcej niż jeden czynnik ekstremalny.

Cofnijmy się do początków formowania się naszej planety, zaczynając od czasów hadeiku – eonu w dziejach Ziemi, kiedy dopiero tworzyła się skorupa ziemska, powstawały najstarsze skały i ocean oraz Księżyc. Kolejny eon, datowany na 4 mld lat temu, odegrał znaczącą rolę w formowaniu się załazków życia jednokomórkowego i bezjądrowego. Około 3,8 mld lat temu pojawiły się prymitywne formy „przeszłego” życia jednokomórkowego, a następnie pierwsze bakterie fotosyntetyzujące ukryte w matach stromatolitowych – były to cyjanobakterie, czyli sinice, które szybko rozprzestrzeniły się wówczas w wo-

dach. Najstarsze znane nam maty sinicowe zostały zidentyfikowane u wybrzeży zachodniej Australii, w Zatoce Rekina. Następnym ważnym okresem w dziejach Ziemi, dotyczącym rozwoju mikroorganizmów, była tzw. katastrofa tlenowa (2,4 – 2 mld lat temu), kiedy to nastąpiły ogromne zmiany środowiskowe, w wyniku których zamiast atmosfery beztlenowej pojawiła się tlenowa. Wpłynęło to na wymieranie pierwszych mikroorganizmów beztlenowych oraz dostosowanie się mikroorganizmów do czynników redukujących. W atmosferze archaiku mieliśmy do czynienia z wysokim stężeniem cyjanowodoru, siarkowodoru, dwutlenku węgla czy tlenku węgla, panowało także ogromne ciśnienie. Dynamicznie zmieniające się warunki oraz czynniki oddziałujące na skały wulkaniczne powodowały powstawanie różnych minerałów. Dzięki temu były one łatwiej dostępne dla pierwszych mikroorganizmów. W czasie wspomnianej katastrofy tlenowej organizmy fotosyntetyzujące wytwarzały także metan, a promieniowanie UV wpływało na tlen, który następnie reagował z metanem, co doprowadziło do stabilizacji pierwotnej tlenowej atmosfery. Kolejne procesy na Ziemi powodowały dalsze zmiany w jej lito-hydro-atmosferze. 1,5 mld lat temu pojawiły się organizmy eukariotyczne (posiadające jądro komórkowe), których powstanie wyjaśniają teorie endosymbiozy i wtórnej endosymbiozy.

Rycina 1. Przykłady środowisk ekstremalnych na Ziemi [na podstawie Merino i in., 2019]



Pierwsze organelle komórkowe zaistniały w wyniku interakcji mikroorganizmów – według teorii endosymbiozy mitochondria powstały z proteobakterii, natomiast chloroplasty z sinic. Wtórna endosymbioza stawia tezę, iż bakterie zostały pochłonięte przez organizm wolnożyjący, stając się niejako jego symbiontem. Ciągłe zmieniające się w początkowych eonach Ziemi środowisko wymuszało adaptacje i interakcje z kolejnymi nowymi gatunkami mikrobów w różnych niszach ekologicznych. Zarówno czynniki fizyczne, chemiczne, jak i biologiczne wpływały na ukształtowanie się habitatów i bioróżnorodność organizmów ekstremofilnych, zamieszkujących przeróżne środowiska – od głęboko położonych kominów hydrotermalnych (uznawanych odpowiedzialnymi za kształtowanie pierwszych związków organicznych), przez skały, czyli litosferę, po atmosferę.

Najbardziej zróżnicowane środowiska na Ziemi wskazują ściśle symbiozy z organizmami ekstremofilnymi – symbioza to kluczowe zjawisko dotyczące przetrwania istot wyższych, w tym ludzi. Przykładami najzasobniejszych w gatunki i bioróżnorodność miejsc są: Wielka Rafa Koralowa u wybrzeży północno-wschodniej Australii oraz lasy deszczowe Ameryki Południowej. Dodatkowo, wiele nie tylko ziemskich czynników wpływa na bioróżnorodność i reakcje oraz zależności między organizmami – mowa m.in. o zmianach klimatycznych, ale także o kosmicznym wpływie Księżyca. Od niego właśnie zależy sporo procesów związanych z rozmnażaniem i synchronizacją zapłodnienia. Jest to jedno z najciekawszych zjawisk na naszej planecie, do tej pory nie do końca wytłumaczone.

Pustynia Atakama reprezentuje pierwotne i jedno z najstarszych środowisk na świecie, co stanowi idealny model do badania pochodzenia życia. Wiedzę zdobytą podczas poznawania polieksstremofilii (mikroorganizmów odpornych na więcej niż jeden ekstremalny czynnik środowiskowy) można przełożyć na poszukiwanie życia na Marsie, Księżycu czy innych ciałach niebieskich Układu Słonecznego oraz poza nim. Procesy geochemiczne i geomikrobiologiczne na tej pustyni utworzyły złoża „słonej skały” składającej się głównie z halitu (minerału krystalicznego zbudowanego z NaCl i innych soli powstałych w wyniku odparowania słonej wody). Niektóre procesy – takie jak tworzenie się ciekłych wtrąceń (uwieczonych pęcherzyków cieczy i pary w kryształach) w starożytnych złożach soli – pozwalają zachować dane dotyczące składu, temperatury i ciśnienia paleośrodowiska. W ostatnich latach wzbudziły one zainteresowanie naukowców jako możliwy habitat ważnych biomarkerów (grup związków organicznych) znajdujących się w skałach.

W badaniach na organizmach ekstremofilnych duże znaczenie ma zastosowanie innowacyjnych metod w połączeniu ze znanymi już narzędziami do oceny ich potencjału w biotechnologii. Wyraźne interakcje między mikroorganizmami i minerałami ujawniają różnorodne naturalnie występujące mechanizmy wpływające na wewnętrzną symbiozę mikroorganizmów, które powstają w niekorzystnym, ekstremalnym środowisku, napędzanym procesami metabolicznymi. Wspomniana pustynia Atakama, ale także inne miejsca ze specyficznym składem mineralnym są szczególnie bogate w unikatowe mikroorganizmy. Począwszy od architektury skał i składu mineralogicznego konsorcjów mikroorganizmów endolitycznych, po badanie procesów geomikrobiologicznych zachodzących w skałach, można wykazać, jakie są strategie przetrwania w takich warunkach, co sprzyja rozprzestrzenianiu się drobnoustrojów w tego typu skałach, jak oddziałują one na konsorcja mikrobiologiczne,

takie jak matryca biofilmu i/lub podpowierzchniowe litoautotroficzne ekosystemy drobnoustrojów (SLME). Ponadto ważnym pytaniem jest konserwacja (z ang. xeropreservation – konserwacja poprzez suszenie) struktury komórki i aktywności metabolicznej. Biofilmy tworzone są głównie przez konsorcja mikroorganizmów zarówno w wyniku trudnych/stresujących warunków środowiskowych, jak i w celu stworzenia i utrzymania równowagi mikrośrodowiska. Badania prowadzone na biofilmach ujawniły różnorodne substancje tworzące matrycę – w tym pęcherzyki błony zewnątrzkomórkowej (EMV) zawierające składniki peryplazmatyczne lub peryplazmatyczne i cytoplazmatyczne, zewnątrzkomórkowe substancje polimerowe (EPS), takie jak polisacharydy, białka, kwasy nukleinowe i lipidy – które stabilizują strukturę oraz budowę biofilmu. Pomimo dostępnych badań, biologia i chemia macierzy biofilmu utworzonej przez organizmy endolityczne pozostaje zagadką.

Do najbardziej niepoznanych środowisk ekstremalnych należą głębokie oceaniczne, kominowe hydrotermalne i wyższa partia atmosfery. To tam do tej pory zidentyfikowano najmniej gatunków ekstremofilnych, jednakże najbardziej ciekawych. Przykładem może być bakteria *Deinococcus radiodurans* – odporna na najwyższe dawki promieniowania jonizującego, wyizolowana z atmosfery i terenów po katastrofie w Czarnobylu (Ukraina). Fascynujące są także wieloszczety *Alvinella pompejana* – to jedyny znany bezkręgowiec odporny na tak wysokie temperatury (80°C) panujące przy kominach hydrotermalnych, żyje on w ścisłej symbiozie z bakteriami, które ułatwiają mu przetwarzanie substancji chemicznych i chronią przed wysokimi temperaturami. Nie możemy także zapominać, że organizmy ekstremofilne towarzyszą nam na co dzień, bytując w naszym ciele i tworząc mikrobiom (ogół mikroorganizmów bytujących w danym siedlisku), unikatowy dla każdego człowieka. Znajdują się one w jamie ustnej, żołądku czy jelitach, poprzez przetwarzanie różnych substancji, pomagają nam trawić pokarmy, dzięki czemu do organizmu dostarczane są np. niezbędne witaminy.

Naukowcy z całego świata prześcigają się w wynajdowaniu leków na śmiertelne choroby, w tworzeniu substancji, które wspomogą ochronę środowiska, czy w poszukiwaniu nowych metod odzysku krytycznych surowców z odpadów. W takich wyzwaniach mogą nam pomóc właśnie organizmy ekstremofilne, które wytwarzają specyficzne substancje – metabolity wtórne, pozwalające im przetrwać w trudnych warunkach. Ponadto organizmy te są testowane w warunkach kosmicznych; wysyłając je na Międzynarodową Stację Kosmiczną lub badając jak zmienia się mikrobiom astronautów i habitatu na ISS, możemy odkryć zupełnie nowe związki lub potencjał tych organizmów, co pomoże nam w walce z różnymi zagrożeniami na Ziemi. ■

## Bibliografia:

Merino, Nancy, Heidi S. Aronson, Diana P. Bojanova, Jayme Feyhl-Buska, Michael L. Wong, Shu Zhang, Donato Giovannelli, „Living at the Extremes: Extremophiles and the Limits of Life in a Planetary Context”. *Frontiers in Microbiology*, 10 (2019). <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2019.00780>.

Wierzechos, Jacek, Asunción de los Ríos, Carmen Ascaso. „Microorganisms in Desert Rocks: The Edge of Life on Earth”. *International Microbiology*, 15 (2012). <https://doi.org/10.2436/20.1501.01.170>.

# Atmosfera w rozwoju złożoności życia na Ziemi

## - od początków życia na Ziemi po czasy współczesne

Mirosław Makohonienko

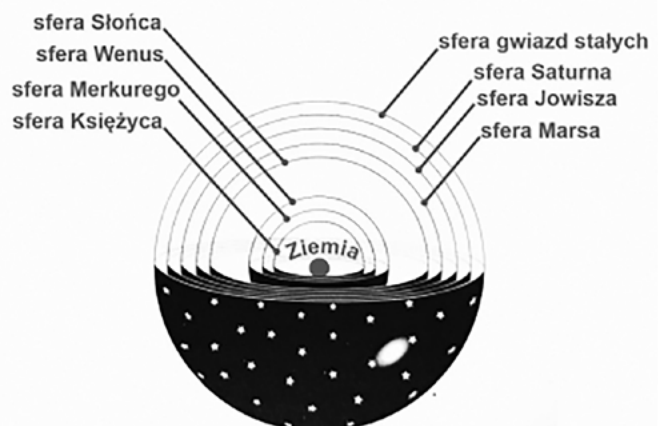
### Niebo ponad głowami – światła bliskich i odległych światów

Unosząc nieco głowę, sięgamy wzrokiem do nieba. Dostrzegamy płynące chmury, przelatujące ptaki, przemieszczające się w dobowym rytmie złociste Słońce. Na dziennym, jak i nocnym firmamencie podąża w cyklicznej wędrówce srebrzysty towarzysz Słońca, narodzony w części z ziemskiej materii. I choć niedotykalny, jego grawitacyjne oddziaływanie wywiera wpływ na nasze ziemskie życie. Po zmroku, z dala od światła miast, naszym oczom ukazuje się ok. 3000 gwiazd najbliższej galaktycznej okolicy. Widzimy tylko te większe z kręgu mniej więcej 300 świetlnych lat, małą cząstkę galaktycznej rodziny. Jeden spośród nich daleki świat, pobłyskujący z odległości 2,5 mln lat świetlnych, to kosmiczna wyspa – galaktyka Andromedy, zmierzająca z prędkością około 400 tys. km na godzinę, by spotkać się z Mleczną Drogą, zmieniając wygląd naszego nieba. Na tle rozgwieżdżonej kopuły kilka szczególnych, błędzących punkcików, z greckiego zwanych *planetes*. Niebiańscy wędrowcy, od których odbite światło Słońca mknie już nie lata, lecz ledwie kilka, kilkadziesiąt minut. Blask Saturna dobiegający w czasie 71 minut, jak latarnia znakujący niebo Jowisz w odległości 33 minut, czerwonawa poświata Marsa trafiająca do oka w krótkie 3,1 minuty, czy zapowiadająca jutrznię Wenus, od której dzielą nas ledwie 2,3 minuty świetlnej drogi – mniej więcej tyle, ile powolne czytanie tej strony. Ich drobne światełka, zanim dotrą do oczu, przenikają przez otulający Ziemię powietrzny płaszcz. Ruchy atmosfery nadają migotanie odległym światełkom. Jakże w tym układzie blisko do Księżyca, z którego fotony biegną tyle, co wypowiedzenie „dzień dobry” – zaledwie 1,3 sekundy. Pośród codziennych światła zdarzają się na niebie w oka mgnieniu trawersujące przestrzeń meteory, rozbłyskujące wyraźniej z wysokości 80 km, wzbudzone tarcie gęstniejącej atmosfery; podobnie jak gwałtowne świetlne błyskawice w akompaniamencie grzmotów. Na co dzień widać powietrzne statki sunące z wolna od punktu A do punktu B, jak i sztuczne satelity okrążające po wielokroć glob, od niedawna ciągnące formacjami kluczy, niby wędrujące ptaki, zrzeszone w systemie *Starlink*. Wśród ponad 5000 aktywnych dziś satelitów, liczne są wyposażone w przyrządy monitorujące lądy, wody i stan atmosfery – to oczy i uszy dzisiejszej ziemskiej cywilizacji, skierowane zwykle na planetę. W nieodległych czasach czterech, pięciu pokoleń wstecz, ok. 100 lat temu, żaden z tych ludzkich wytworów nie rozświetlał jeszcze ziemskiego nieba, nie przemierzał powietrznych przestworzy – ani oświetlone aeroplany, ani tym bardziej sztuczne satelity.

### Oczy i myśli człowieka

Patrząc w górę na odległe światła, myśli wrażliwego człowieka wkraczają w tajemnice kosmosu. Tym, którym bliska jest religijna wiara, przywołują one obraz niebiańskiego raju, lepszego świata. Niebo z gwiazdami i słońcem, kometami i błyskawicami przyciągało człowieka od prehistorycznych czasów, próbującego na swój użytek wytłumaczyć to, co wzrokiem ogarniał,

*Rycina 1. Średniowieczne graficzne wyobrażenie sfery ziemskiej i jej relacji z nieboskłonem (na górze). Sfery ciał niebieskich wędrujących po nieboskłonnie, otaczające Ziemię umiejscawianą w centrum znanego ówczesnie świata doby przedkopernikańskiej w cywilizacji zachodniej (na dole).*



a czego dotknąć nie potrafił. Myśli sięgające metafizycznej głębi nasuwają się same, zwłaszcza nocną porą przy ognisku, gdy w ciszy i zadumie wpatrujemy się w rozgwieżdżone niebo. Raz skonstruowane opowieści, znajdujące posłuch ciekawych, wolne od formalnych ograniczeń, po wielokroć powtarzane, wędrowały w czasie i przestrzeni. Nazywamy je mitami, które przenoszone były przez korowody pokoleń wszystkich kultur rozwijających się pod ziemskim niebem. Mity składały się na systemy wierzeń religii pierwotnych, zwanych szamanistycznymi, z nich przenikały do późniejszych religii doktrynalnych. Na nieboskłonie lokowano bogów, herosów, niekiedy wybrańców rodzaju ludzkiego. Tam mieszkali ci, którzy władali piorunami, sprowadzali deszcze bądź susze, jak i obdarzali ludzi życiodajnym światłem i ciepłem. W dobie cywilizacji antycznej i już w tradycji chrześcijańskiej epoki przedkopernikańskiej, na nieboskłonie wyobrażano sobie koncentryczne sfery, zajmowane przez przemieszczające się ciała niebieskie (Ryc. 1). Ziemia z ludźmi – wybrańcami świata – znajdowała się w ich centrum.

Zjawiska na niebie, takie jak komety czy zaćmienia, spływające z nieba katastrofalne powodzie czy też wyniszczające susze przynoszące głód, łączono z wyższą wolą i tłumaczono gniewem bogów, będącym odpowiedzią na ludzkie niegodziwe uczynki. Jeden z przekazów o niszczycielskim potopie przetrwał z drugiego tysiąclecia przed narodzinami Chrystusa, odcisnięty trzcinowym stempelkiem, układającym się w kliny na tabliczkach z rzeczno-muł. Przywołany w eposie o bohaterskim Gilgameszu, stał się z czasem naszym własnym mitem cywilizacji chrześcijańskiej, znanym jako biblijny potop. Zgodny z głęboką wiarą nurt o charakterze naukowym w świecie cywilizacji zachodniej, sformułowany w czasach nowożytnych, a wyjaśniający ziemskie zjawiska gwałtownymi zdarzeniami łączonymi z działaniem chrześcijańskiego Boga, określono mianem katastrofizmu. Zgodnie z nim, świat miał swoje czasy przedpotopowe i po potopie. Pojmowanie świata kreowanego osobową siłą wyższą z czasem ustąpiło obserwacjom i rozumowaniu Charlesa Darwina, Charlesa Lyella i Jamesa Huttona. Katastrofizm zastąpiono ideami samoistnego ewolucjonizmu świata ożywionego i geologicznego uniformitarianizmu, zwanego aktualizmem geologicznym.

W ciągu ostatnich stuleci, tj. od czasów pionierów nowożytnej nauki zachodniej półkuli, nasza wiedza o otaczającym świecie przeogromnie wzrosła. Głębiej domysłów i wyobrażeń wypełniły fakty opisywane liczbami, wyrażane miarą odległości, masy, prędkości, ilością cząstek, gęstością czy składem atomów, wyjaśniane ciągiem przyczyn i skutków. Poznaliśmy zjawiska, które obserwować i mierzyć można dziś bezpośrednio, jak i zjawiska z czasów dawno minionych, rekonstruowane przez nauki określane słowotwórczym *archo* lub *paleo*. Nieograniczona wyobraźnia i mistyka zeszyły na plan dalszy, ustępując miejsca racjonalnym wnioskowaniom opartym na obserwacji, pomiarze i eksperymencie, formułowanym czasami w tzw. prawa przyrody. Bywa, że zdobywana na naukowej drodze wiedza budowała i buduje u swych odkrywców dumę oraz poczucie wielkości; bywa, że wzbudza głęboki szacunek do otaczającego świata, obdarowując doznawaniem cudów natury, dokonujących się tu na Ziemi w sferze jej grawitacji, jak i tam daleko w kosmicznej przestrzeni. W naszej drodze poznawania w dużym stopniu rozwikłaliśmy już dziś naturę ciał niebieskich, jak i szczegóły ziemskiej atmosfery otulającej planetę.

Od słów języka greckiego: atmosfery oznaczającego parę i sfera opisującego wyodrębnioną część przestrzeni, utworzono określenie atmosfera. W sanskrycie, spokrewnionym z językiem greckim przynależnością do indoeuropejskiej wspólnoty językowej, istnieje dla atmosfery blisko brzmiący wyraz *atman*, oznaczający oddech. W hinduizmie *atman* to dusza stanowiąca indywidualną jaźń, obecną w każdej żywej istocie. Powietrze-para, oddech, duch, dusza i życie – to określenia powiązane ludzkim umysłem. Skąd te związki? Jako organizmy stąpające po ziemi dwoma nogami, znajdujemy się w istocie na dnie życiodajnego powietrznego oceanu. W masach powietrza zanurzeni jak ryby w wodzie. Bez powietrza nie ma dla nas życia. Żyje ten, kto oddycha, a umiera ten, który dech stracił. Bolesne odczucie braku powietrza na kolejny oddech dotyczy nie tylko nas, lecz każdego stworzenia z królestwa *Animalia*. Oddychając powietrzem w każdej chwili swojego życia, bywa, że o nim zapominamy, a jego wartość z całą mocą docenia ten, kto je traci.

### Ziemska atmosfera i życie w czasie

Atmosfera jaką oddychamy dziś, nie zawsze taka była. Powietrzny ocean to twór dynamiczny i podlegający przemianom. Powietrze w samych początkach formowania się Ziemi powstała z gazów obłoku solarne, z którego utworzyło się Słońce i wszystkie krążące wokół niego planety. Była najprawdopodobniej zbudowana z wodoru, tlenu i dwutlenku węgla oraz azotu. W drugim etapie do atmosfery poczęły przedostawać się gazy z rozgrzanych skał wnętrza Ziemi, z przepięknych erupcji wulkanicznych, jak i bombardowań materii z przestrzeni okołoziemskiej. Zdarzenia te działy się w burzliwym, najstarszym eonie ziemskiej historii nazwanym hadeikiem, sytuowanym między 4,5 a 4,0 mld lat temu. Tamta pierwotna atmosfera, modyfikowana ziemskimi gazami, nie nadawałaby się dla naszego życia. Nie byłaby nam przyjazna, jak przyjazne nie są dziś jakiegokolwiek inne niż ziemskie atmosfery Układu Słonecznego. Choć jej głównym składnikiem stał się azot ( $N_2$ ), pozostawały w niej bardzo wysokie ilości dwutlenku węgla ( $CO_2$ ), spore ilości metanu ( $CH_4$ ), a w domieszce tlenek węgla ( $CO$ ), wodór ( $H_2$ ) i amoniak ( $NH_3$ ). Zasobna była w parę wodną ( $H_2O$ ) i niemal pozbawiona tlenu, obecnego w ilościach śladowych – na tyle małych, że przyjęto ją określać jako atmosferę beztlenową. Atmosferę ziemską bogatą w dwucząsteczkowy tlen ( $O_2$ ) stworzyło dopiero ziemskie życie, rozwijające się od ok. 3,8 mld lat w kolejnym eonie zwanym archaikiem. Atmosfera jako gazowa powłoka była i jest przeogromnym zbiornikiem. Zasiłkiem pokarmu dla ziemskiego życia. Rezerwuarem azotu, jednego z głównych składników białek, stymulującego reakcje biochemiczne, jak i węgla – pierwiastka życia w przyswajalnej gazowej postaci. Dwutlenkiem węgla posiłkują się nieustannie autotrofy, z każdym wydechem oddają go heterotrofy. Wreszcie, atmosfera jest przeogromnym zbiornikiem tlenu – silnego utleniacza, paliwa do metabolizmu tlenowych organizmów.

Życie narodziło się i poczęło różnicować w wodzie, nieprzypadkowo. W oceanicznych głębinach pozbawionych słonecznego światła, w otoczeniu kominów hydrotermalnych, najwcześniej pojawiły się warunki pozwalające na zaistnienie i rozwój samoreplikujących się struktur opartych na węglu. Życie powstało w środowisku dysponującym niezbędnymi dla jego zaistnienia składnikami materii, środowisku ciepłym i jednocześnie otulonym wodną powłoką, powstrzymującą ultrafioletowe promie-



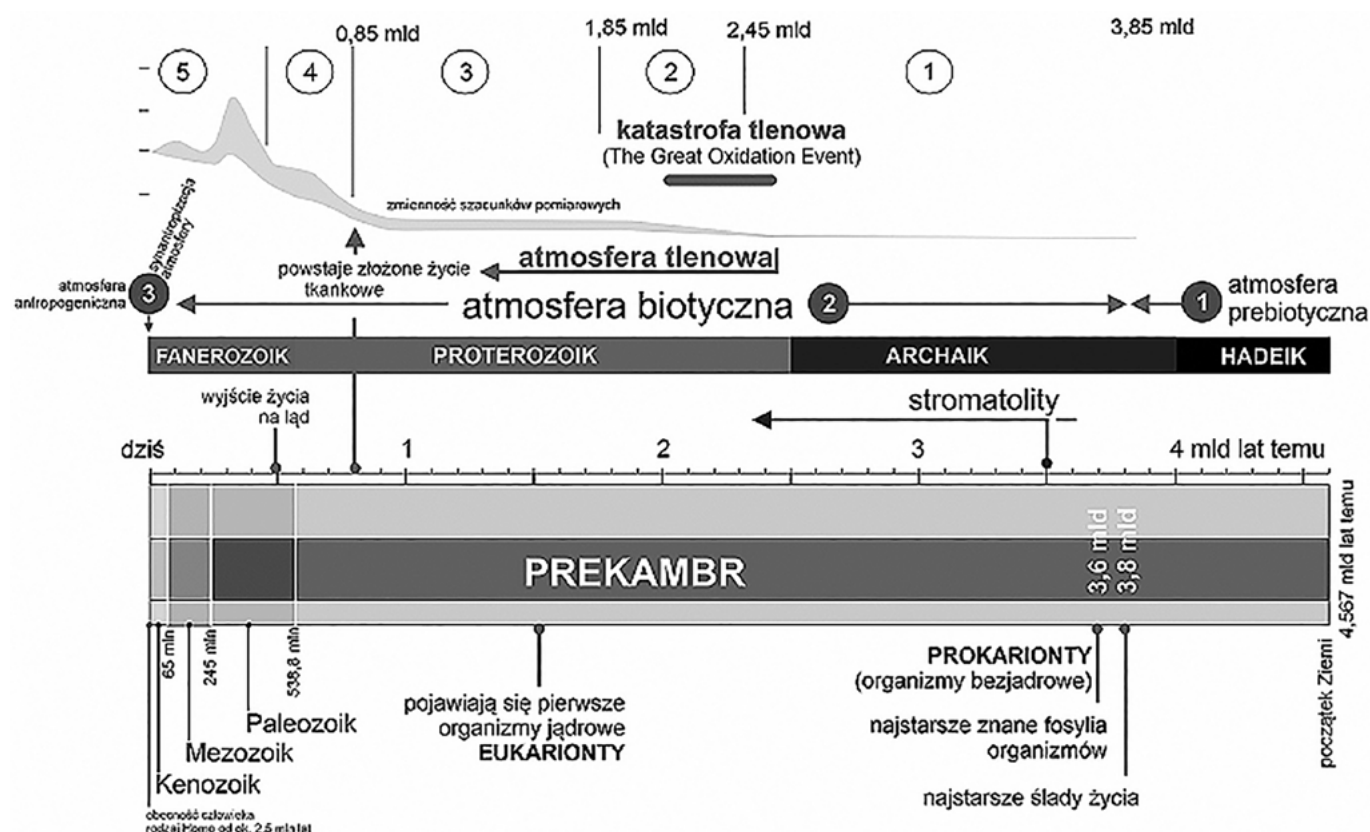
niowanie (UV) płynące ze Słońca, które naruszyłyby delikatne struktury RNA i DNA, leżące u podstaw ciągłości ziemskiego życia. Skład ówczesnej atmosfery nie zapewniał takiej ochrony. Dał ją dopiero trójcząsteczkowy tlen ( $O_3$ ) zwany ozonem, powstający z tlenu dwucząsteczkowego ( $O_2$ ) wynoszonego w powietrze ponad wodne oceany, poddany bombardowaniom kosmicznego promieniowania. Ozon wykształcił zdolność ziemskiej atmosfery do powstrzymywania ultrafioletu. Za sprawą ozonu rozwijające się w wodzie delikatne struktury kodujące życie zyskały zewnętrzną tarczę uformowaną na niebie. Wzrost ilości tlenu w atmosferze stworzył nowe siedliska sprzyjające życiu. Sądzi się, iż udział  $O_2$  w wysokości już około 1% składu atmosfery pozwalał organizmom przemieścić się z głębin bliżej pod powierzchnię wody, z czasem umożliwiając życiu wyjście z wody na ląd. Nie był to w żadnym przypadku zabieg celowy, jakkolwiek plan czy dążenie, jedynie niezamierzony efekt uboczny życiowych procesów mikroskopowych, a z czasem większych stworzeń. Całkiem niedawno, w latach XX wieku, ta sama ozonowa tarcza, dotąd nas chroniąca, poczęła kruszeć pod wpływem wytwarzanych przez człowieka freonów oraz innych fluoropochodnych metanu i etanu, poważnie zagrażając ziemskiemu życiu. Poznanie zjawisk zachodzących w ziemskiej atmosferze oraz międzynarodowe porozumienia zdołały powstrzymać jej niszczenie i wejść na drogę powolnej odbudowy.

Początek wpływu organizmów na atmosferę sięga niemal samych narodzin życia, ok. 3800 mln lat temu, niecały miliard po tym jak zaistniała Ziemia. Na bardzo młodym globie, powstałym na ruinach innego, dawnego świata, z prochów i gazów wcześniejszych generacji gwiazd – zrodzone z martwej materii organizmy stały się nowym źródłem atmosferycznego metanu, dwutlenku węgla i tlenu. Gazy te powstawały tym razem w ko-

mórkach żywych istot, jako produkty metabolicznej przemiany. Usuwane poza komórkowe błony, były niczym innym jak odpadem – powstającym co do zasady tak, jak gazy wydalone z silników parowych zasilanych węglem, silników spalinowych zasilanych ropą czy benzyną, silników odrzutowych na paliwo ciekłe bądź napędzanych reakcjami termojądrowymi. Tlen pochodzenia organicznego uwalniany do środowiska z czasem okazał się niezwykle przydatny – dla nas ostatecznie niezbędny. To ludzka myśl i język nadają bytom oraz zjawiskom znaczenie wartościujące. Decydują, czy dana rzecz stanie się „odpadem”, „zanieczyszczeniem” czy może „pierwiastkiem życia”, niezastąpionym „życiodajnym tlenem”. Nazwy noszą znaczenie tworzone w zależności od punktu widzenia i naszego nastawienia, zaś tlen jako tlen, w przyrodzie jedynie i po prostu jest, albo go nie ma.

Pierwszymi organizmami modyfikującymi środowisko wodne, a następnie atmosferę były już najprostsze drobnoustroje z domen bakterii (*Bacteria*) i archeonów (*Archaea*). Wykształciły bogaty świat jednokomórkowych istot o szerokiej gamie przystosowań do życia i replikacji, często w warunkach, które z naszej perspektywy nazywamy ekstremalnymi. Choć organizmy te jednostkowo są bardzo małe, to same tylko archeony mogą dziś stanowić od 10 do 20% żywej biomasy planety. Są wszędzie. Zasadniają wody, gleby, powietrze, jak i całą bogatą biosferę – ciała wszystkich wielokomórkowych żywych i martwych istot. Zamieszkują również nasze organizmy, masowo uczując w jelitach – budując jelitowy mikrobiom, od którego w dużym stopniu zależy dobrostan ludzkiego ciała i duszy. Nie do każdego dociera, że jeszcze za życia, regularnie i sumiennie karmi miliardy żywych istnień, wydając na ten cel sporą część miesięcznych dochodów. Wraz z mikroorganizmami stanowimy koegzystencjalny wytwór natury – świadectwo

Rycina 2. Atmosfera ziemska w czasie oraz niektóre zjawiska z historii życia Błękitnej Planety



współpracy różnych form życia, od strukturalnie i funkcjonalnie najprostszych po wysoko zaawansowane. Niekiedy przyjmujemy antybiotyki (*anti bios*, czyli przeciw życiu), szkodząc tym istotom, równocześnie jednak staramy się im to wynagrodzić probiotykami (*pro bios*, czyli dla życia). W koegzystencji tej przenika się jednostkowość i złożoność życia. Dzielimy się własnymi komórkami i korzystamy z efektów istnienia innych. To wielki cud natury, cud ewolucji życia.

Pierwsze znaczące przyrosty tlenu w atmosferze Ziemi nastąpiły za sprawą sinic, zwanych też cyjanobakteriami – organizmów wywodzących się z bakterii, które rozwinęły zdolność do fotosyntezy. To prymarni masowi producenci tlenu, ówczesne fabryki O<sub>2</sub>. Geologiczne odkrycia na stanowiskach w Afryce i Grenlandii ujawniły kopalne struktury sinicowe zwane stromatolitami, datowane na czasy tuż po zaistnieniu życia na Ziemi, na długo przed 3 mld lat. Szeroko rozpowszechniły się na Ziemi między 1,5 mld a 800 mln lat temu. Powstawały w płytkich wodach, w strefach morskich płytwów. Tam jednokomórkowe organizmy łączyły się w nitkowate zgrupowania, zasiedlając mineralne podłoże w postaci rozległych mat. Ich kleista powierzchnia zatrzymywała węglanowy osad unoszony w wodzie. Układał się on warstewkami na przemian z kolejnymi pokoleniami sinic. Sinice przyswajały z powietrza węgiel, wydzielając tlen. Na nierównościach morskiego dna mikrobialne maty tworzyły uwypuklenia – wznoszące się ku górze organiczno-mineralne struktury. Jako twory organizmów i mineralnego substratu, poetycko nazwano je „żywymi skałami”. Drobnie sinice stały się budowniczymi morskich konstrukcji, wpływając na rzeźbę strefy brzegowej, zagospodarowały morskie krajobrazy. Dziś stromatolitowe ekosytemy – relikty odległej przeszłości – można zobaczyć w stanie naturalnym jeszcze w kilku miejscach świata, u wybrzeży zachodniej Australii w hiperstłonych wodach Zatoki Rekinów, czy na Bahamach, w strefach morskich wypłyceń Wielkiej Ławicy Bahamskiej, między Kubą a Florydą. Jakkolwiek przyrastają powoli, ok. 0,5 mm na rok, kopalne formy odkryte w Kanadzie pod współczesnym dnem Jeziora Niewolniczego, ujawniły kilkudziesięciu metrowej miąższości złoża, pośrednio dając świadectwo ilości wytworzonego przez nie tlenu. Zanikanie stromatolitowych struktur, łącznie jest z narodzinami świata zwierząt, dla których sinicowe łąki stały się najprawdopodobniej zasobnymi w pokarm morskimi pastwiskami.

### **Atmosferyczny tlen – zabójca i sprzymierzeniec na drodze do złożonego życia**

Na wczesnym etapie rozwoju życia wytwarzany przez organizmy tlen wchodził w reakcje utleniania z minerałami, tworząc pokłady rud żelaza, które po miliardach lat, zaczęliśmy eksploatować na potrzeby gospodarcze. Z czasem nadwyżki tlenu na trwałe wzbogaciły wody i powietrze. W ten sposób żywe organizmy przemieniły *oikos* – dom swego zamieszkania. Dzisiejsza atmosfera jest wynikiem oddziaływania środowiska nieożywionego i ożywionego. W tamtych prapradawnych czasach tlen pozostawał gazem zabójczym dla form życia beztlenowego. Pierwszy okres wzrostu jego stężenia w wodach i atmosferze, między ok. 2,4 a 2 mld lat temu, nazwano „katastrofą tlenową” (w języku angielskim *The Great Oxidation Event*) lub „rewolucją tlenową”, a nawet „tlenowym holokaustem”. Część organizmów z wczesnych etapów ewolucji zmiany tej zaakceptować nie potrafiła, część na niej skorzystała, znajdując dla siebie dogodne miejsca rozwoju. Relikty pradawnego beztlenowego świata przetrwały

do dziś w środowiskowych ostojach. Refugiami dla organizmów beztlenowych, do których tlen nie ma łatwego dostępu, są m.in. zwierzęce wnętrzności – zwłaszcza kopytnych, roślinożernych przeżuwaczy, mających żołądki o wielokomorowej budowie. Należą do nich, od ok. 11 tys. lat chętnie utrzymywane przez człowieka – dla mleka, mięsa i skóry czy siły pociągowej – zwierzęta. W beztlenowych warunkach wnętrza ich ciał działają symbiotyczne mikroorganizmy trawiące błonnik i wydalające metan. Dogodnych siedlisk dla beztlenowców dostarcza dziś również człowiek, wytwarzając ścieki i góry wysypisk śmieci. Żyją w nich *archeony Methanosarcina* uwalniające metan, który wnika do atmosfery i podnosi efekt cieplarniany.

Przejście do oddychania tlenowego miało jeszcze inny, niezwykle istotny dla przyszłości życia, aspekt – wiodący do rozwoju form złożonych, czyli dużych organizmów tkankowych. Większa ilość komórek wymaga zwiększonej ilości energii, toteż dla złożonych form organizmów tkankowych tlen okazał się rozwiązaniem energetycznie sprzyjającym, bo wprowadzającym wydajniejszy metabolizm. Zdaniem paleontologów, rozwój w natlenionych wodach najstarszych śladów zwierzęcego życia – przynależnych do *Parazoa* organizmów o ciałach jeszcze asymetrycznych, z podziałem na dwie warstwy komórek, ale bez wykształconych właściwych tkanek – przypada na czas wzrostu stężenia tlenu w atmosferze, ok. 800-850 mln lat temu. Życie upowszechniło dwucząsteczkowy tlen, jednym szkodząc, innym otwierając drzwi do nowego świata – do coraz bardziej złożonego życia tkankowego, aktywnie poruszających się istot cudzożywnych, ostatecznie do panowania niewyspecjalizowanego polifaga obdarzonego kulturą, jakim jest człowiek.

### **Atmosferyczny termostat i idea megaorganizmu Gai**

Biologiczna przemiana atmosfery wprowadza nas w wytwór ziemskiego termostatu, funkcjonującego na bazie gazów, których dostawa regulowana była żywymi organizmami. Gdyby nie obecność gazowej atmosfery oraz nieprzebranego korowodu istnień regulujących jej skład – od najprostszych mikroform po złożone struktury makro – Ziemia mogłaby być zimnym światem. Regulacja ilości gazów wbudowywanych w ciała organizmów i oddawana do atmosfery pozostawała przez miliardy lat w stanie utrzymującej się stosunkowej równowagi, czasem zakłócaanej, jednak odzyskiwanej, w dość wąskim przedziale odchyłań.

Wszystkie złożoności oraz powiązania atmosfery i ziemskiego życia wzbudziły u brytyjskiego biologa Jamesa Lovelocka refleksje wiodące do spojrzenia na Ziemię jak na megaorganizm, powstały z bytów jednostkowych działających na rzecz większej całości. Lovelock uważał, że żywe organizmy działają wspólnie w celu zachowania warunków korzystnych dla swego istnienia, dlatego tworzyły atmosferę, która przypominała kokon owada chroniący jego wnętrze czy pióra ptaka osłaniające go przed chłodem. W roku 1979 badacz zaproponował nowe spojrzenie na życie na Ziemi. System – który nazwał Gają od imienia greckiej bogini Ziemi – miał być efektem współdziałania ziemskich istot budujących organizm nadrzędny w postaci megaorganizmu. Czy Gaja to megaorganizm? Zapewne nie dosłownie. Ale czy my bez miliardów istnień w naszych ciałach bylibyśmy tym, czym jesteśmy? Masz na imię Piotr, czyli skała, bądź Beata, czyli błogosławiona, lecz w swej istocie, w swym jestestwie nie jesteś sam. Każda eukariotyczna komórka

naszego ciała to twór różnych współdziałających organizmów. W każdej chwili każdy z nas współżyje z miliardami istnień pod własną skórą. Nieświadomie i bez porozumienia, na drodze losowości, okazji, pasażera, zwykle jednak zgodnie z zasadą: coś za coś. Jedność życia. W dużej skali, w pewnym sensie, planeta wytworzyła współistnienie życia i otoczyła się powietrzną okrywą przez siebie szytą.

### Bioróżnorodność powietrznego oceanu

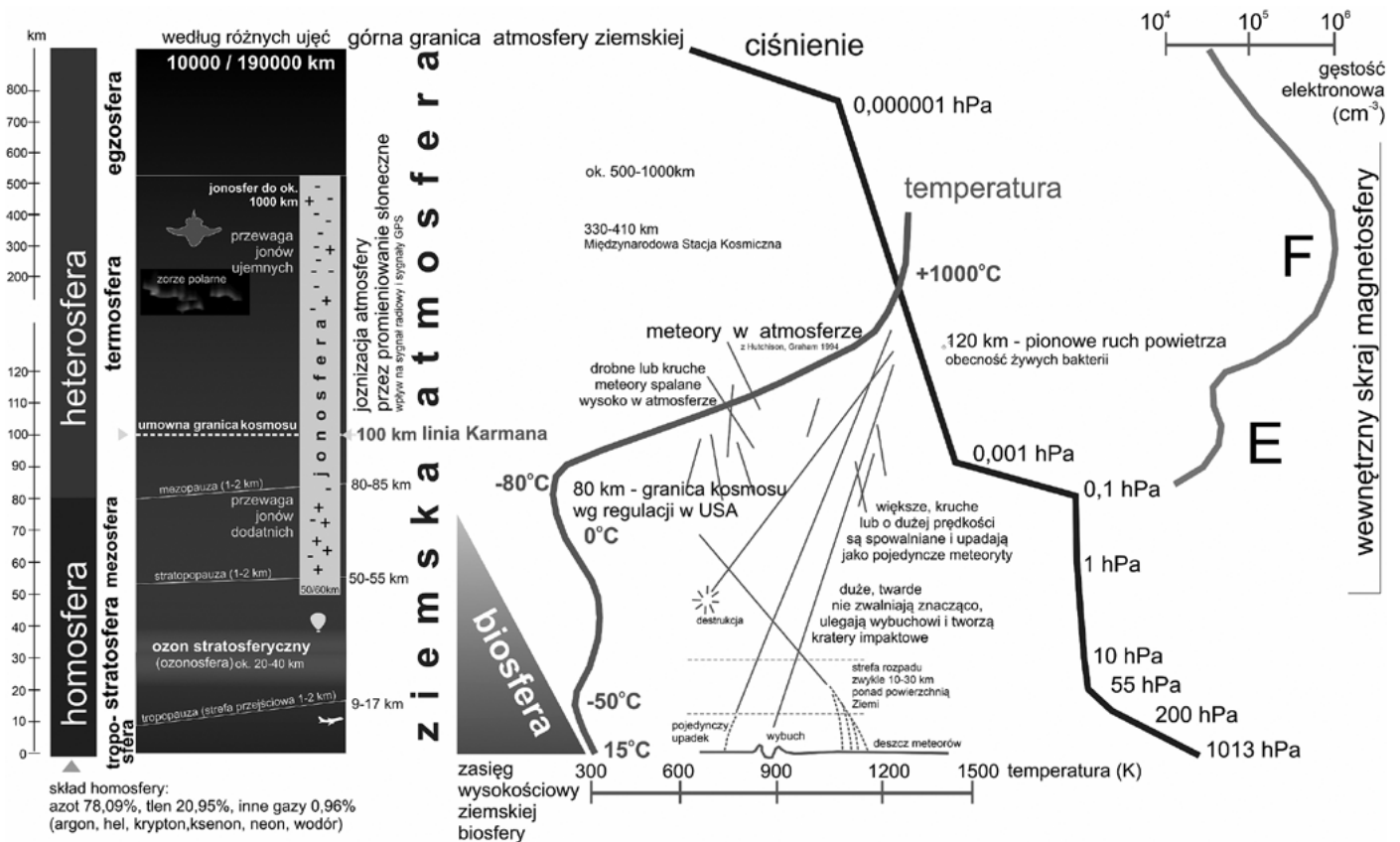
Tlenowa atmosfera stworzyła warunki do rozwoju przebogatego świata wielokomórkowych, tkankowych istot, u których z czasem powstały szlaki przewodzące ładunki elektryczne, sygnały czuciowe i myślowe. Atmosfera od wytworu martwej przyrody przeistoczyła się w twór po części i pośrednio biologiczny, nadający jej nową strukturę i właściwości. Przetworzona przez życie atmosfera, poczęła życie ochraniać, stając się niszą dla bytów wcześniej nieistniejących, wychodzących ponad powierzchnię wód i łądów w powietrzny ocean.

Ziemska atmosfera, choć przezroczysta, nie jest pustym przestrzemem. Tętni życiem. Zasiedla ją ogromna różnorodność istot lekkich, bezkręgowych – dziesiątek, a być może setek tysięcy gatunków owadów, jak i cięższych kręgowców, zwłaszcza tak nam bliskich, kolorowych i śpiewających potomków dinozaurów. Należy do ziemskiej biosfery. Gościnnie bywa nawet ssakom – nietoperzom, mistrzom powietrznej nawigacji, szybującym wieiórkom, a nawet próbującym swych sił w locie rybom i węzom. Pozwala na przeloty incydentalne, niezamierzone, goszcząc unoszone wicherami i powietrznymi trąbami ryby, żaby, niekiedy i większe zwierzęta. Największe stworzenia wszechczasów, które objęły w posiadanie powietrzne przestworza nie były ptakami. To bezpośredni pobratymcy krokodyli, żółwi, węży i jaszczurek

– latające gady, „uskrzydłone jaszczury” o naukowo brzmiącej nazwie: pterozauury. Rozpiętość skrzydeł tych powietrznych gadów sięgała 10 metrów, czyli więcej niż pięć wysokich osób stojących jedna nad drugą. Tyle co rozpiętość skrzydeł dwumiejscowego samolotu w typie popularnej, szkoleniowo-turystycznej Cessny 152. Uskrzydłone jaszczury zamieszkiwały planetę dłużej niż my sami jako rodzaj ludzki, liczący krótkie 2,5 mln lat, zaś jako rodzina wyprostowanych człowiekowatych ponad 6 mln lat, a jako rząd naczelnych ok. 70 mln lat. Uskrzydłone jaszczury rozgościły się w powietrznych przestworzach na ponad 150 mln lat, do czasu kiedy prosto z nieba runęła zagłada, w postaci dziesięciokilometrowej skały.

Oprócz dużych owadzi czy kręgowych jestestw, każdy zakątek powietrznego oceanu wypełniają miliony niewidzialnych bytów, obejmowanych wspólną nazwą aero- czy anemoplanktonu. Organizmy unoszone swobodnie ruchami powietrza bada aerobiologia, znana być może tym, którym bliskie są alergologiczne kalendarze informujące o powietrznych alergenach, przynoszących uciążliwy katar sienny – następstwo postępu cywilizacyjnego. Unoszone swobodnie na wietrze bywają pajęczaki i drobne owady, choć same fruwać nie zamierzały. Swobodnie i biernie przenoszone ruchami powietrza są maleńkie jednokomórkowe drobnoustroje, jak bakterie i archeony. Powietrzną przestrzeń wypełniają też wirusy, które – choć posiadają zdolności replikacyjne – nie mogą się doczekać uznania za twory żywe. Bogato reprezentowane są tu ponadto formy życia – w swym rozwoju przechodzące fazę napowietrzną – w postaci przetrwalników-zarodników dziesiątek tysięcy gatunków grzybów, setek gatunków protistów, glonów, mchów i wątrobowców. Nie zapominajmy także o unoszących się w powietrzu ziarnach pyłku roślin kwiatowych, oddzielonych od swych roślin macierzystych. Atmosfera bierze w ten sposób

Rycina 3. Budowa dzisiejszej atmosfery ziemskiej oraz niektóre zjawiska w niej zachodzące



przeogromny udział w krążeniu życia po Błękitnej Planecie. Rozpyła i rozsiewa, niezwykle efektywnie rozprzestrzeniając żywe byty ponad naziemnymi granicami. W każdej chwili wypełniona jest tysiącami miliardów wędrujących ziarenek życia, które powietrzną drogą przenoszone są na najbardziej odległe wyspy i fragmenty lądów, niczym dłońmi troskliwego ogrodnika.

Zjawiska rozprzestrzeniania drogą powietrzną nasion nazywano anemochorią, a powietrzne zapylenie – anemogamią; obie nazwy powstały od członu słowotwórczego anemo-, wskazującego na związek z wiatrem (gr. anemos – wiatr). Czasami aeroplankton – w postaci żółtej chmury ziaren pyłku żyta masowo uwalnianego do atmosfery – można dostrzec w słoneczny ciepły dzień nad polem. Aeroplankton przenoszony jest przez wiatr, silne tropikalne burze czy burze piaskowe. Przez wiatr porywana bywa także wodna zawiesina z toni mórz i wód lądowych wraz z tym, co w niej się znajduje. Żywe organizmy przenoszone są przez wysoko i szybko wiejące prądy strumieniowe. Koncentracja aeroplanktonu sięga 10 mln organicznych komórek w 1 m<sup>3</sup> powietrza, zatem w zaledwie 4 m<sup>3</sup> powietrza, czyli w przestrzeni wydzielonej ogrodową altanką, mieszka więcej żywych istot niż ludzi w Polsce na powierzchni 322 tys. km<sup>2</sup>.

### Napowietrzne granice biosfery

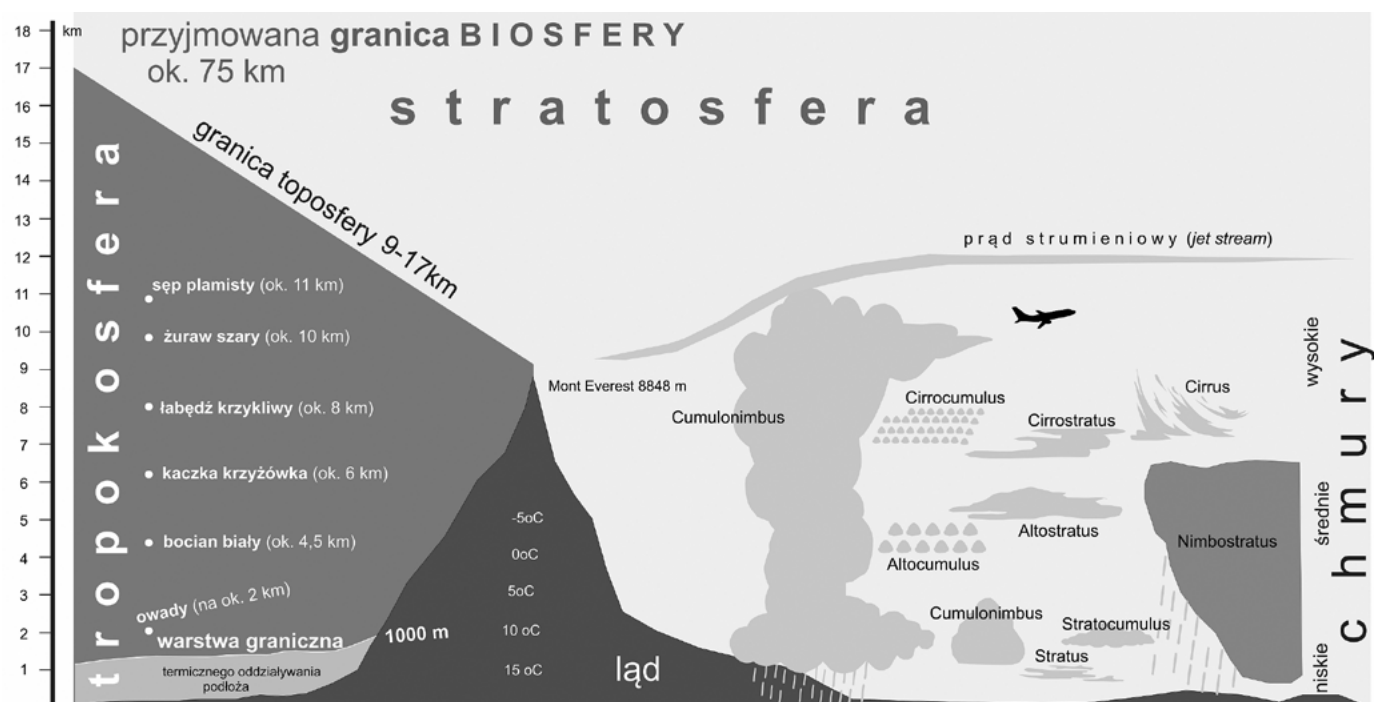
Jak daleko ponad głowy sięga ziemskie życie? Fruwające owady potrafią unieść się na wysokość 2 km ponad grunt. Bocian biały dolatuje na ponad 4,5 km, a kaczka krzyżówka powyżej 6 km, gdzie człowiek ma już poważny problem z oddychaniem. Dla mieszkańca nizin kłopoty z niedoborem tlenu objawić się mogą już na wysokości 3,5 km. Jakkolwiek są i tacy, którzy bez wspomagania butli tlenowych stanęli na najwyższym skrawku Ziemi (8848 m). Na podobne wysokości dolatuje łabędź krzykliwy – ponad 8 km. Niektóre ptaki latają tam, gdzie regularnie krążą rejsowe samoloty pasażerskie – np. żuraw szary unosi się na

wysokość do 10 km, a rekordzista, sęp plamisty, szybuje pod sam dach troposfery, tj. ponad 11 km. Na większej wysokości rozrzedzone powietrze nie dostarczyłoby minimum tlenu, a krew w żyłach złożonych organizmów przy bardzo niskim ciśnieniu przesłabłaby w stan wrzenia.

Gdzie znajduje się powietrzna granica życia? Wyżej niż tam, gdzie dolatują ptaki? Górną granicę biosfery określa się zwykle na wysokości ok. 75 km ponad ziemią, a zatem powyżej warstwy ozonowej, w górnych obszarach mezosfery. To tylko nieco niżej niż umowna granica kosmosu, przyjęta w Stanach Zjednoczonych Ameryki na wysokości 85 km, zaś powszechnie przez społeczność międzynarodową na wysokości 100 km, wyznaczonej umownie linią Karmana. Samochodem to zaledwie godzina drogi, kosmiczną rakieta 9 minut.

Badania oparte na modelowaniu sugerują, iż pionowe ruchy powietrza pozwalają z łatwością wznosić cząstki wielkości bakterii na wysokość 120 km ponad Ziemią, co potwierdzają analizy próbek atmosfery. Bakterie w stanie zachowania funkcji życiowych znajdowano nawet na zewnętrznej obudowie Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS), krążącej na niskiej orbicie stacjonarnej, na wysokości ok. 475 km ponad Ziemią. Autorzy badań wskazują, iż silne pionowe wiatry wiejące w górnej mezosferze i termosferze, z prędkościami sięgającymi 100 m/s, są w stanie wypchnąć ziemskie mikroby jeszcze wyżej w odleglejszą przestrzeń kosmiczną, gdzie porywane pyłem kosmicznym mogłyby wejść na drogi wiodące w kierunku innych planet czy ich księżyców. Hipotetyczny dziś, a efektywny ze względu na odległość i warunki planetarne byłby szlak kosmicznej wędrówki mikrobów między Ziemią a Marsem. Czy międzyplanetarne szlaki życia – takiego, jakie dziś znamy – bez statków kosmicznych, przez próżnię, okażą się faktem? Być może. Nie ma jednoznacznej górnej granicy ziemskiej atmosfery przechodzącej w międzyplanetarną przestrzeń (która też nigdzie nie jest wolna od atomów i cząstek) i prawdopodobnie nie ma jednoznacznej, bliskiej planecie

Rycina 4. Na dnie atmosferycznego oceanu – zjawiska i życie w troposferze



granicy atmosferycznego życia. Jest go coraz mniej i mniej, lecz gdzie dociera najdalej? Z czasem znajdziemy zapewne odpowiedzi i na te ważne pytania.

## **Wejście człowieka**

Od czasów pojawienia się życia, skład ziemskiej atmosfery pozostawał efektem interakcji świata nieożywionego z ożywionym. Działalność wulkanów, procesy wietrzenia i spalania przenikały się z metabolizmem organizmów prokariotycznych (beźjądrowych) i eukariotycznych (jądrowych), do których należą grupy protistów, grzybów, roślin i zwierząt, z czasem nas samych jako biologicznych osobników oraz całej stworzonej przez nas, przebogatej w wytwory materialne i działania, antroposfery. Kolejny przewrót w funkcjonowaniu atmosfery i jej wpływu na inne żywe organizmy wnosi era człowieka. My – organizmy tkankowe, posiadające wewnętrzne szkielety jako rusztowania, z wykształconymi kręgami głównej osi ciała tworzącej kręgosłup, organizmy stałocieplne, posiadające włosy i karmione gruczołami matki, co umiejscawia nas w gronie ssaków, organizmy o zaawansowanych mózgach uczestniczących w procesach poznawczych i zdolnościach manualnych cechujących naczelne – jako jedyne dotąd istnienia w znanym nam świecie wytworzyliśmy kulturę.

Nasze organizmy pobierają z atmosfery tlen, a wydalają dwutlenek węgla i metan, z oddechem i gazami jelitowymi. Oddajemy lub pobieramy ciepło, przyjmujemy i oddajemy substancje płynne oraz stałe. W tym względzie nie różnimy się niczym od plejady innych nie-ludzkich organizmów. Z jedną zasadniczą różnicą - w naszym przypadku kultura otoczyła te działania system higieny, kosmetyki i estetyki. Owe biologiczne czynności, czy tego chcemy czy nie, wpływają na nasze otoczenie, powodując użytkowanie siedlisk, czyli eutrofizację, wzbogacając w substancje biogenne gleby, wody czy powietrze. W skali jednego osobnika uboczne efekty naszego istnienia pozostawiają niewielki ślad; w skali populacji wiosek i miast całkiem znaczący. Każdego dnia na Ziemi działa w tym zakresie ponad 8 mld osobników, w cyklu 24 godz. na dobę, 7 dni w tygodniu – na 7 kontynentach i morzach. Bez zwolnień, bez urlopów. Ci co odchodzą lub rezygnują, zastępowani są nowymi. Liczba chętnych do ponoszenia wszystkich tych zobowiązań i przyjemności, w skali globu, nadal z każdym rokiem jeszcze wzrasta.

Jako istoty obdarzone kulturą, poczęliśmy wprowadzać do atmosfery nie tylko to, co wymaga od nas natura, ale też to, co umożliwiła przekazywana i rozwijana z pokolenia na pokolenie kultura. Ogromne ilości substancji gazowych, płynnych i stałych pochodzą z czynności tworzenia i użytkowania ziemskich surowców przetwarzanych na wytwory materialne, jak i z wszelkiej działalności służącej człowiekowi w celu ogrzania ciała, przygotowania pokarmu, pozyskiwania pól pod uprawy roślin i hodowli zwierząt, wytopu metali, produkcji cementu, przemieszczania się samochodami i powietrznymi statkami, lokomotywami i rakietaми, pozyskiwania ogromu energii na niepoliczalne cele. W czasach pokoju i wojny. Wytwarzamy te substancje przy produkcji niemal każdego wytworu myśli ludzkiej, jaki bierzemy w palce każdego dnia. Eutrofizacja kulturowa – działająca na środowiska lądowe, wodne oraz na atmosferę – była istotna ilościowo w przyrodzie już od czasu przejścia człowieka na gospodarkę wytwórczą w dobie neolitu. Przepięta w swej skali i różnorodności stała się wraz z rozwojem przemysłu opartego na węglu, żelazie i stali w erze industrialnej. To wówczas zaczęliśmy wprowadzać do atmosfery całą paletę gazów, pyłów i aerozoli z kominów domów, elektrowni oraz fabryk, z rur wydechowych

silników, z odpadów poprodukcyjnych i wszelakich śmieci. W trakcie swojej ewolucyjnej drogi do panowania nad Ziemią, człowiek w liczbie mnogiej stał się ostatecznie potężnym zarazem konstruktorem, jak i destruktoorem łądów, wód i atmosfery. Dziś jako wszędobylski i główny aktywista ma przeogromny wpływ na wszystkie ekosystemy Ziemi.

## **Atmosfera i życie – rzecz dziś najważniejsza**

Zakumulowane efekty działań człowieka, prowadzone od tysiącleci, a spotęgowane w ostatnich dwóch stuleciach, wpłynęły na skład gazów atmosfery, prowadząc do zmiany ziemskiego klimatu. Obserwowaną ich cechą jest globalne ocieplenie. Na razie, średnio nieco ponad 1°C. Po latach dyskusji i przeciwstawnych argumentów – często wspieranych ekonomicznym, politycznym bądź ideologicznym nastawieniem – społeczność naukowa (jak zawsze, poza pewną częścią) nie ma wątpliwości, kto jest sprawcą zachodzących zmian. To człowiek. Zmieniliśmy łądy, morza i oceany. Czyż moglibyśmy sądzić, że nie zmieniliśmy najdelikatniejszej ze sfer naszej Ziemi – powietrznej powłoki?

Zmiany składu atmosfery powodują dziś i potęgować będą wpływ na rozmieszczenie organizmów na całej planecie. Jednym sprzyjając, innym zagrażając. Jesteśmy na progu rozpędzającego się zjawiska. Na drodze ku czemuś nowemu. Objawy widzimy i doświadczamy. Od równika ku biegunom przesuwały się strefy klimatyczno-roślinne, wraz z nimi fauna. Wyższe temperatury i deficyty wody osuszają grunty, intensyfikują procesy dezertyfikacji, czyli pustynnienia. Przesuwają się wyżej piętra roślinne gór. Część organizmów zyska nowe przestrzenie, część się dostosuje, niektórym przyjdzie zejść ze sceny. W świecie żywych organizmów, w skali czasu geologicznego, tak było, jest i będzie. Jednak jeszcze nigdy sprawcą tych zmian nie okazał się człowiek. Zmiany zachodzące w atmosferze skłoniły Crutzena i Stoermera w roku 2000 do apelu o wydzielenie nowej epoki geologicznej zwanej antropocenem, czyli erą człowieka. Jesteśmy blisko jej formalnego uznania przez społeczność naukową. Crutzen i Stoermer wskazywali na globalne zmiany atmosfery wywołane przez człowieka epoki industrialnej. Inny z badaczy, Ruddiman zwrócił uwagę, iż w istocie rozwój rolnictwa zachodniej i wschodniej Eurazji, intensywne wylesienia pod powierzchnie pól, mokre uprawy ryżu oraz powszechna hodowla zwierząt kopytnych, zainicjowały zmiany składu atmosfery już 8 tys. lat temu w przypadku antropogenicznej emisji dwutlenku węgla oraz 5 tys. lat temu w przypadku emisji metanu. Powoli acz sukcesywnie, w tempie żółwia, do czasu aż przyszła era industrialna i nastąpił przyspieszony skok z energią zającą.

## **Wczoraj, dziś i jutro. Przyszłość atmosfery i życia**

Patrząc wstecz, wydzielić można trzy etapy rozwoju i przemiany atmosfery. Pierwszy – abiotyczny (prebiotyczny) za najstarszych czasów formowania planety i wczesnego jej kształtowania, nim zaistniało życie, z gazów obłoku planetarnego i procesów wnętrza Ziemi. Drugi to etap biotyczny, następujący wraz z pojawieniem się i rozwojem organizmów żywych, który wprowadził nowe źródło substancji pochodzących z metabolizmu biosfery. To najdłuższy etap historii ziemskiej atmosfery, trwający od ponad 3,6 mld lat. I etap trzeci, współczesny, zdecydowanie najkrótszy – to etap antropogeniczny związany z zaistnieniem nowego planetarnego czynnika, jakim stała się kultura człowieka. A w istocie jej uboczne skutki. Kultura liczy sobie raptem ok. 2 mln lat, zatem w skali planetarnej jest zaledwie małym ułamkiem ułamka głębi historii Ziemi. Oddziaływania kulturowe

na ekosystemy w ograniczonej skali miały miejsce w paleolicie, znacząco rozwinęły się w neolicie, lecz wielkoskalowe przemiany przyniosła bliska nam w czasie era industrialna.

W drodze rozwoju kulturowego – myśl ludzka, ludzka docieklivość, poszukiwania, wynalazki i innowacje wiodły ku przyszłości, coraz bardziej złożonej i lepszej, jeśli mierzyć ją szansą na przeżycie, długością życia przeciętnego człowieka. Rozwój nauki nowożytnej, określony jako rewolucja naukowo-techniczna, stał się źródłem epokowych innowacji technologicznych – rewolucji przemysłowej, ogromnego postępu ludzkości uwidocznionego dynamicznym wzrostem populacji. Tamte czasy dały podwaliny pod dzisiejszy rozwój technologiczny. Jednocześnie ta eksplozja innowacji przemysłowych przyczyniła się do katastrofalnych zniszczeń środowiska naturalnego planety. Minąć musiał czas bolesnych doświadczeń i refleksji, aby nauka i technika zajęła się jego naprawą. Ewolucja kulturowa, jak dotąd w długim czasie, jest wielkim sukcesem ludzkości. Dobrze daje sobie radę. W tym procesie są i wygrani, i przegrani. Tak działa ewolucja. Możemy mieć uzasadnioną nadzieję, iż postęp w naszym rozumieniu będzie trwał dalej. Ku przestrodze przed samozadowoleniem, pamiętać warto, iż absolutnych gwarancji nie ma. W historii życia na Ziemi są tacy, co zyskują i tacy, co tracą, schodząc ze sceny. Tak było, jest i będzie.

Przed nami prawdopodobnie etap czwarty historii atmosfery. Przewidywany już wyobraźnią pisarzy, tak jak wiele wcześniejszych osiągnięć człowieka. To etap świadomej kontroli, kształtowania składu i jej właściwości środkami technicznymi, co określa się mianem inżynierii planetarnej. Planiści już dyskutują i mają pomysły na formowanie nowej, bardziej sprzyjającej życiu atmosfery Marsa. To, co bywało fantastyką w sferze literatury pięknej i sztuki filmowej, antycypowane i przedstawiane jako science fiction, z czasem za sprawą nauki wchodziło w sferę science reality. Marzenia, myśli i fantazje wyprzedzają techniczne możliwości, stają się inspiracją i kierunkowskazem działań. Prawdopodobnie, zanim ludzkość zajmie się inżynierią atmosfery Marsa, wcześniej działania takie skierujemy ku naszej własnej planecie. Technologie o różnej skali wpływu na parametry atmosfery i drogi realizacji już są proponowane. Wprowadzenie w dużej skali wymagać będzie ponadnarodowego porozumienia. Co do decyzji i realizacji, niewątpliwie z dozą potężnych obaw, mniej lub bardziej udanych eksperymentów, niewykluczonych porażek. Ryzyko, tak jak i w leczeniu chorego człowieka, zawsze istnieje. Jeśli dotychczasowe i przyszłe próby kontroli emisji gazów zawiodą, jeśli nowe technologie wytwarzania energii i produkcji nie wystarczą, być może innej drogi nie będzie. Wygrana ludzkości z łataniem dziury ozonowej w ziemskiej stratosferze pokazuje, iż działania w skali globalnej, dla dobra siebie i planety, są możliwe i mogą być skuteczne. Poza naszym dzisiejszym światem

Czy atmosfera jest konieczna dla istnienia życia? Poznając dziś inne pozaziemskie światy, możemy sądzić, iż nie. Dla zaistnienia takiego życia, jakie znamy na Ziemi absolutnie tak. Bez atmosfery nasza planeta, krążąca w oddaleniu średnio ok. 150 mln km od źródła ciepła, jakim jest Słońce, nie mając sama w sobie wystarczającego źródła energii, byłaby z występującymi tu wodnymi oceanami zimną kulą lodu, planetarną śnieżką, ze średnią temperaturą na powierzchni rzędu  $-20^{\circ}\text{C}$ . Taką śnieżką mogłaby być i posiadając atmosferę. Raz, na krótko w geologicznej historii, zaburzenie takie się stało, u schyłku proterozoiku, w okresie zwanym kriogenem (od greckiego kryos, czyli mróz) między ok. 720 a 635 mln lat temu, kiedy zlodzenie

pokryło niemal cały glob z jednym ówczesnym lądem zwanym Rodinia oraz wszechotaczającym oceanem Mirowia. Ochronna warstwa ziemskiej atmosfery, regulowana aktywnością żywych organizmów, łagodzi temperatury długim czasie geologicznym, w cyklu rocznym, jak i dobowym między dniem i nocą. Stwarza nam przeogromny komfort.

Życie naszej planety, ewoluując dostosowywało się do warunków ziemskich, ale i aktywnie je modyfikowało. Przyjęło się sądzić, iż Ziemia to idealne miejsce do życia. W istocie, życie na Ziemi od swego powstania, przez miliardy lat dostrajało się metodą prób, losowych eksperymentów i nieustannych weryfikacji do ziemskiego środowiska, które podlegało przemianie, także za sprawą organizmów. Dotyczy to również ziemskiej atmosfery. Niedawne obserwacje naszej najbliższej sąsiadki – planety Wenus – nasunęły przypuszczenia co do możliwości istnienia życia nawet na tak skrajnie niegościnniej planecie! Wenus to rozżarzona do  $460^{\circ}\text{C}$  kula o wywieranym na nią ciśnieniu 90 razy większym niż na Ziemi. W roku 2020 zasugerowano, iż nawet w takich okolicznościach mogłoby rozwijać się życie, jakkolwiek nie na powierzchni, lecz w wyższych warstwach gazowej otuliny! Wniosek taki wysunęto na podstawie obecności fosforowodoru (fosfiny) – substancji, która może pochodzić od organizmów żywych. I choć tezy tej nie potwierdzono, otwiera ona nowe perspektywy dla poszukiwania życia w atmosferach innych światów planetarnych czy ich księżyców.

Dziś atmosfery pozaziemskich globów zyskują dla badaczy kosmicznego krajobrazu nowy, szczególny wymiar – specyficznego markera obecności życia. Uważa się, iż światy „zarażone” i tętniące życiem, jak nasz glob, będą miały skład atmosfery powiązany z metabolizmem ich mieszkańców. Uboczne produkty życiowych funkcji, wypełniające owe powietrzne oceany, mogą być źródłem tak oczekiwanej przez ludzkość informacji o istnieniu pozaziemskiego życia. Nasuwa się pytanie, w jaki sposób poszukujący życia astrobiolodzy, nie widząc żywych organizmów, mogą poznać, że one tam są? Za sprawą spektroskopii, czyli czytania kodu kreskowego światła emitowanego przez odległe gwiazdy. Światło gwiazdy, przechodząc przez atmosferyczną powłokę krążącej wokół niej planety, ulega oddziaływaniu substancji w niej zawartych. Modyfikuje cechy świetlnego promienia, będącego swoistym kosmicznym listem, jak światło przechodzące przez mozaikę różnobarwnych szybek witrażu maluje indywidualny, jedyny w swym rodzaju obraz. Pochłonięte fragmenty widma światła informują, jakie substancje je przesłoniły. Możliwości oferowane przez współczesną naukę są niesamowite! A przecież zaledwie 2 mln lat temu zaczęliśmy naszą przygodę z kulturą od ostrzenia patyków, łupania kości, kamieni, z czasem krzesania ognia... Dziś idziemy na spotkanie innych istot, na odległych globach, poszukując bioróżnorodności w bezkresie wszechświata. Na razie na naszej własnej galaktycznej wyspie Mlecznej Drogi. ■

#### Literatura wybrana:

- Bryson B., 2020: *Krótką historią niemal wszystkiego*. Wydawnictwo Zysk i S-ka. Warszawa.
- Lovelock J., 2003: *Gaja. Nowe spojrzenie na życie na Ziemi*. Prószyński i S-ka. Warszawa.
- Ryszkiewicz M., 1994: *Matka Ziemia w przyjaznym kosmosie. Gaja i zasada antropiczna w dziejach myśli przyrodniczej*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Stanley S.M., Luczaj J.A., 2023: *Historia Ziemi*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Weiner J., Weiner J. 3., 2023: *Jak powstało życie na Ziemi*. Copernicus Center Press. Kraków.

# Notatki z życia – biosfera

Andrzej M. Jagodziński

*Tak więc z walki w przyrodzie, z głodu i śmierci,  
bezpośrednio wynika najwznioślejsze zjawisko,  
jakie jesteśmy w stanie pojąć...  
... z tak prostego początku zdołał się rozwinąć  
i wciąż jeszcze się rozwija nieskończony szereg form  
najpiękniejszych i najbardziej zadziwiających.*

Karol Darwin  
O powstawaniu gatunków drogą doboru naturalnego  
tłum. Szymon Dickstein

Wyjaśnienie pochodzenia życia na Ziemi (biogeneza, z gr. *bios* – życie, *génénesis* – pochodzenie, stawanie się) jest trudne, zapewne trudniejsze niż zdefiniowanie tego, czym jest życie. W literaturze naukowej istnieje wiele hipotez na temat tego, jak powstało życie na Ziemi, niemniej zagadnienie to w dalszym ciągu nie zostało jednoznacznie objaśnione i wciąż żywo interesuje nie tylko biologów; udzielenie odpowiedzi na to pytanie jest niewątpliwie zadaniem interdyscyplinarnym.

Różnorodność form życia na Ziemi oraz ich złożoność powodują, iż precyzyjne ujęcie terminu „życie” stanowi duże wyzwanie. Definiowanie tego pojęcia na ogół odbywa się poprzez enumerację (wyliczenie) atrybutów obiektu żywego – wśród nich wskazuje się m.in.: jego jednolitą, hierarchiczną i złożoną strukturę (skład chemiczny, budowa, kod genetyczny), zdolność do przetwarzania materii i energii (metabolizm), homeostazę (regulacja środowiska wewnętrznego), wzrost (wartość anabolizmu na wyższym poziomie niż wartość katabolizmu), replikację (powielanie osobników, rozmnażanie, zapewniające ciągłość przekazu informacji) i ewolucję na drodze doboru naturalnego (interakcje pomiędzy organizmami, adaptacja do zmieniających się warunków otoczenia) oraz umiejętność reagowania na różnorodne bodźce. Życie jest systemem bądź zbiorem elementów zdolnych do ewolucji rozpatrywanej w biologicznym ujęciu. Ponadto jest procesem masowym, a zatem obejmuje wiele różnych obiektów i uwzględnia interakcje zachodzące pomiędzy nimi. Życie jest właściwością całej biosfery i w ujęciu metabolicznym polega na cyklicznym redukowaniu oraz utlenia-

niu związków węgla przez organizmy żywe. Życie definiowane jest zarówno w ujęciu funkcjonalnym, jak i strukturalnym.

W zasadzie aż do końca XVIII w. wierzono, że istnieje możliwość samorodnego powstawania niektórych organizmów, a zatem i życia. Arystotelesowska (384-322 r. p.n.e.) abiogeneza (samoródtwo) opisywała powstawanie organizmów z rozkładającej się materii organicznej – myszy miały powstawać z brudnego siana, żaby z mułu rzecznoego, a muchy z mięsa. W XVII w. pojawiły się pierwsze doświadczenia, które podważały prawdziwość teorii abiogenezy (np. toskańskiego lekarza Franciszka Rediego (1626-1697), który wykazał, iż białe „robaki” pojawiające się w mięsie są larwami much, a nie powstają samorodnie), jednak dopiero w połowie XIX w. wyniki eksperymentów Ludwika Pasteura (1822-1895), francuskiego chemika i prekursora mikrobiologii, dostarczyły dowodów na to, że teoria ta nie znajduje potwierdzenia w obserwacjach. Choć Pasteur nie odpowiedział na pytanie, jak powstały pierwsze osobniki każdego z badanych przez niego gatunków, to wykazał, że nawet tak niewielkich rozmiarów organizmy, jak bakterie „rodzą się” z rodziców, których do pewnego stopnia przypominają. Fenomen powstawania życia wciąż jednak pozostawał nieodgadniony.

W latach 20. XX w. dwaj uczeni – brytyjski genetyk i biochemik John B.S. Haldane (1892-1964) oraz rosyjski biochemik i botanik Aleksandr Iwanowicz Oparin (1894-1980) – niezależnie od siebie przedstawili podobne koncepcje dotyczące warunków

koniecznych do powstania życia na naszej planecie. Obaj uczeni podejrzewali, że pierwsze formy życia na Ziemi pojawiły się w ciepłym, prymitywnym oceanie (w środowisku redukcyjnym „pradawnej zupy”). Były one heterotroficzne (cudzożywne). Oparin dowodził, że życie rozwinęło się z tzw. koacerwatów, czyli mikroskopijnych rozmiarów agregatów cząsteczek lipidów, kulistych, spontanicznie uformowanych i utrzymywanych razem przez siły elektrostatyczne w formie koloidalnej zawiesiny. Zdaniem Oparina agregaty te mogły być prekursorami komórek, a życie ewoluowało w trzech etapach, które obejmowały: ewolucję chemiczną (powstawanie prostych związków organicznych ze związków nieorganicznych pod wpływem wyładowań elektrycznych), molekularną (powstawanie koacerwatów, tzn. układów nadcząsteczkowych), a ostatecznie – ewolucję biologiczną. Haldane z kolei uważał, że w beztlenowej atmosferze najpierw utworzyły się proste cząsteczki organiczne (monomery), które stawały się coraz bardziej złożone (polimery) pod wpływem oddziaływania światła ultrafioletowego i wyładowań elektrycznych, a z nich powstały komórki. Konceptje obu naukowców można by sprowadzić do stwierdzenia, że powstanie pierwszych form żywych odbywało się w czasie długotrwałej ewolucji związków chemicznych. Eksperymentalnej weryfikacji hipotezy Oparina-Haldane'a dokonali w latach 50. XX w. Harold Urey (1893-1981), amerykański chemik, odkrywca deuteru – za co otrzymał w 1934 r. Nagrodę Nobla – oraz jego doktorant Stanley Miller (1930-2007), amerykański chemik i biolog. Naukowcy ci dowiedli, iż aminokwasy mogły powstać w warunkach pierwotnej Ziemi, pozbawionej tlenu, w wyniku prostych reakcji chemicznych z ich nieorganicznych prekursorów.

Dużym przełomem w analizie początków życia na naszej planecie były liczne badania prowadzone na poziomie molekularnym. Konceptja powstania życia na bazie samopo-

wielającego się RNA, sformułowana w latach 60. XX w. przez amerykańskiego biologa i biofizyka, Alexandra Richa (1924-2015), rozwinięta i uszczegółowiona w latach 80. m.in. przez Waltera Gilberta (ur. 1932), amerykańskiego fizyka, chemika i biologa, zakładała, że życie na globie zaczęło się od cząsteczek RNA – hipotezę tę nazwano „hipotezą świata RNA”. Założenia tej teorii Gilbert przedstawił w artykule *Origin of life: The RNA world*, opublikowanym w „*Nature*” (1986; 319:618). Stwierdził on, że cząsteczki kwasu rybonukleinowego, które przejawiają aktywność katalityczną, w „zupie pierwotnej” budują same siebie, są w stanie autoreplikować się, ewoluować, pełnić nowe funkcje czy syntetyzować białka. W 1981 r. dwaj badacze amerykańscy – Thomas Cech (ur. 1947) i Sidney Altman (1939-2022) – wykazali, że cząsteczki RNA mogą być tak nośnikami informacji genetycznej, jak i pełnić funkcje katalityczne bez udziału białek; cząsteczki RNA zdolne do katalizy nazwano rybozymami.

Wśród licznych hipotez opisujących powstanie życia na Ziemi wymienić należy także hipotezę panspermii, opartą na hipotetycznych scenariuszach egzobiologii, zakładającą, iż pierwsze cząsteczki biologiczne, a nawet organizmy, nie powstały na Ziemi, a przywędrowały ze Wszechświata. Szczególnie interesującą jest hipoteza panspermii ukierunkowanej, z której wynika, że życie zostało celowo „zasiane” na naszej planecie przez inną cywilizację. W pozanaukowym obszarze znajduje się jeszcze zupełnie odmienna od wymienionych koncepcja, iż życie jest efektem nadprzyrodzonego aktu stwórczego, którego nie można jednak opisać naukowymi narzędziami.

Najodleglejsza przeszłość naszej planety wciąż skrywa wiele tajemnic. Ziemia, błękitna planeta, jako część Układu Słonecznego, powstała najprawdopodobniej ok. 4,5-4,6 mld lat temu.







Była wówczas martwa i niegościnna. Nieco później, a „dokładniej” jakiś miliard lat później, na Ziemi istniały już organizmy, takie jak bakterie czy sinice, a zatem w pierwszym niecałym miliardzie lat istnienia globu musiało rozwinąć się życie. Nie dysponujemy oczywiście bezpośrednimi świadectwami potwierdzającymi początki życia na Ziemi, choć zapisy kopalne wskazują, że najdawniejsze organizmy żywe pojawiły się na naszej planecie co najmniej 3,5-3,8 mld lat temu. Nie zachowały się (lub też nie zostały jeszcze odnalezione) pierwsze organizmy, które poprzedzały te znane z muzealnych kolekcji i zbiorów naukowych formy o stosunkowo zróżnicowanej i zaawansowanej organizacji. Warto podkreślić, iż zdaniem uczonych życie zaistniało w warunkach beztlenowych, a powstające wówczas organizmy zmieniały pierwotne warunki, torując drogę ich następcom.

Fenomen życia bierze się z nieustannych przekształceń, toteż historia życia na naszej planecie może być rozpatrywana jako unikalny proces indywidualizowania się poszczególnych gatunków, a także ujawniania ekspresji ich genów. Warto podkreślić, że procesy życiowe to efekt działania cząsteczek, które same przecież żywe nie są. Analizę życia na Ziemi utrudnia przy tym fakt, że choć biolodzy dysponują licznymi zbiorami zdarzeń, to jednak są to zdarzenia zindywidualizowane, obejmujące historie poszczególnych osobników lub populacji, a zatem bytów niepowtarzalnych. Do zrozumienia procesu kształtowania życia na Ziemi bardzo przydatna jest teoria doboru naturalnego, będąca jednym z mechanizmów ewolucji biologicznej. Dobór naturalny (selekcja naturalna) prowadzi do kierunkowych zmian w populacji, które zwiększają jej adaptację do warunków, jakie panują w środowisku. W okolicznościach niesprzyjających jedne osobniki przeżywają, inne nie, dzięki czemu zwiększa się częstość występowania korzystnych genów w populacji, a decydują o tym nie tylko czynniki środowiska, ale i własności fenotypu. Z teorii doboru naturalnego, wprowadzonego do naukowego dyskursu przez Karola Darwina (1809-1882) oraz Alfreda Wallace'a (1823-1913), wynika, że obecne formy żywe

mają wspólnego, prostego, pojedynczego i bardzo odległego przodka, który był pierwszym organizmem żywym na Ziemi. Dzisiaj nosi on miano LUCA (ang. *Last Universal Common Ancestor*), czyli „ostatniego wspólnego przodka życia”. Darwin tłumaczył mechanizm zmian ewolucyjnych właśnie doborem naturalnym, który jest rezultatem walki o byt. Dzieła Darwina w wymierny sposób zrewolucjonizowały nasze rozumienie historii życia na Ziemi, choć brytyjski naukowiec nie tłumaczył istoty powstania życia z nieożywionej materii, ale pochodzenie jednych organizmów od drugih.

Życie przenika i współtworzy biosferę. Biosfera jest układem biologicznym, który obejmuje wszystkie organizmy żyjące na naszej planecie oraz ich siedliska. Termin ten został zaproponowany w drugiej połowie XIX w. przez austriackiego geologa Eduarda Suessa (1831-1914), który w książce *Die Entstehung der Alpen* określił mianem biosfery warstwę na powierzchni globu pomiędzy atmosferą a hydrosferą i litosferą, w której realizuje się życie na Ziemi. Ponad 50 lat później rosyjski uczyony Władimir Iwanowicz Wiernadski (1863-1945), geolog i geochemik, założyciel Akademii Nauk Ukrainy, w książce pt. *Biosfera* (1926) nadał temu pojęciu nieco inny sens, definiując go jako globalny, zintegrowany system zależności pomiędzy organizmami a ich materialnym (nieożywionym) podłożem. Autor ujmuje biosferę jako warstwę geologiczną, sferę życia, powstałą przy współdziałaniu organizmów żywych. Biosfera ma charakter fizyczny i zaistniała wraz z pojawieniem się na Ziemi pierwszych organizmów, ewoluując wraz z nimi. Takie ujęcie biosfery bliższe jest oczywiście współczesnemu pojęciu „ekosystem”, jednakże przypomnieć trzeba, iż w czasach Wiernadskiego pojęcia tego jeszcze nie znaleźliśmy, albowiem wprowadzone zostało ono do języka naukowego w 1935 r. przez brytyjskiego ekologa Arthura G. Tansleya (1871-1955). Termin „biosfera” wszedł na stałe do nauki za sprawą angielsko-amerykańskiego uczonego, ekologa G. Evelyny Hutchinsona (1903-1991), który m.in. w publikacji pt. *The Biosphere*, opublikowanej w „Scientific American” (1970),

przybliżył jego znaczenie. Funkcjonowanie biosfery bazuje na sieciach i łańcuchach troficznych, w obrębie których następuje obieg materii i przepływ energii. Biosfera obejmuje dolną warstwę atmosfery (troposferę), litosferę (a w zasadzie jej wierzchnią warstwę – pedosferę), a także część hydrosfery. Obejmuje ona co najwyżej kilkunastokilometrową warstwę, co np. przy promieniu równikowym Ziemi (6378 km) jest wartością niezwykle małą. Warto dodać, że większość organizmów żywych żyje w warstwie o grubości do ok. 100 m. Większość nie oznacza oczywiście, że wszystkie.

Na szczególną uwagę zasługują wysiłki naukowców zmierzające do poznania wzorca przestrzennego rozmieszczenia różnorodności biologicznej biosfery, w tym także prace wspomnianego już Alfreda Wallace'a. Liczne badania z zakresu geografii roślin/zwierząt wskazują na to, iż liczba taksonów (np. gatunków, rodzajów czy rodzin) jest najwyższa w strefie równikowej i obniża się w kierunku biegunów. Mimo zebrania bardzo bogatego materiału empirycznego, tak w kontekście bogactwa gatunkowego, jak i danych środowiskowych charakteryzujących miejsca ich występowania, do dzisiaj nie wyjaśniono przyczyn obserwowanych wzorców, a hipotez omawianych we współczesnej literaturze jest co najmniej kilkanaście.

Istnienie życia na Ziemi uwarunkowane jest dopływem do niej energii promieniowania słonecznego, bowiem to przy jego udziale (a konkretnie przy udziale promieniowania fotosyntetycznie czynnego) zachodzi proces fotosyntezy. Biosfera wykorzystuje niewielką część tej energii. Jednakże to dzięki organizmom autotroficznym w odległej przeszłości nastąpiły najistotniejsze zmiany w składzie chemicznym atmosfery ziemskiej, pojawił się w niej cząsteczkowy tlen, a atmosfera zmieniła swój charakter z redukcyjnego na utleniający. W stanie wolnym tlen pojawił się w atmosferze Ziemi ok. 2 mld lat po uformowaniu się planety. Na poziomie ekosystemów proces wiązania węgla z atmosfery (w postaci CO<sub>2</sub>) oraz energii określamy mianem produkcji pierwotnej. Do tego procesu niezbędna jest także woda. Życie na naszej planecie opiera się właśnie na chemicznej reaktywności węgla, a także na dostępności wody, specyficznych właściwościach geochemicznych i klimacie naszej planety. Część związanej przez producentów energii zużywana jest przez nie same, część zaś przeznaczana jest do produkcji biomasy. W układach ekologicznych wyprodukowana w trakcie produkcji pierwotnej biomasa (i związana w niej energia) zużywana jest częściowo przez konsumentów (organizmy cudzożywne; produkcja wtórna), a martwa materia organiczna także przez destruentów (dekompozycja). Energia przekazywana jest zatem z niższego na wyższy poziom w bardzo złożonej sieci troficznej, która jest cechą układów ekologicznych.

Życie na Ziemi zmieniło nasz świat, i ciągle zmienia. W ujęciu historycznym przerywane było okresami ekstynkcjami (wymieraniem gatunków), które w najpoważniejszym wymiarze objęły prawdopodobnie 95% gatunków wielokomórkowych organizmów. Przyczyny tych wielkoskalowych ekstynkcji nie zostały dotychczas wyjaśnione, choć żadna z nich nie dotknęła biosfery w takim stopniu, by zagrozić rozwojowi życia na Ziemi. Rosnąca złożoność struktur tchniętych życiem oraz ich różnorodność są widocznym przejawem postępującej ewolucji biosfery. Różnorodność biologiczna przejawia się na trzech podstawowych poziomach: genetycznym, gatunkowym i ekosystemowym.

Nic dziwnego, że trudno jest nam zrozumieć zasady funkcjonowania poszczególnych ekosystemów, kiedy weźmiemy pod uwagę fakt, że botanicy, zoolodzy czy mykolodzy nie są w stanie podać choćby przybliżonej liczby gatunków występujących na Ziemi (jako całości czy w wybranym jej fragmencie). Znamy takie taksony, o których możemy z dużym prawdopodobieństwem powiedzieć, że opisaliśmy je niemal wszystkie. Dobrym przykładem są ptaki (98%), ssaki (95%), płazy i gady (95%) czy rośliny wyższe (90-95%). Zdecydowanie mniej wiemy natomiast o mikroorganizmach, grzybach, owadach czy pajęczakach, i to nie tylko o tych, które spotkać możemy w dziewiczych regionach Ziemi. Szacuje się, że na naszej globie występuje nawet do 10-30 mln gatunków, a dotychczas naukowcy opisali ok. 1,8 mln z nich. Rocznie opisuje się ok. 15-20 tys. nowych gatunków, głównie w regionach tropikalnych, co przywodzi na myśl smutny wniosek, że aby poznać bogactwo gatunkowe Ziemi potrzebowalibyśmy... kilkuset lat. Na naszych oczach giną gatunki (często w wyniku utraty siedlisk, miejsc bytowania), a mając na uwadze to, iż każdy gatunek stanowi niepowtarzalną, swoistą kombinację genów, redukcja różnorodności biologicznej wpływa negatywnie na funkcjonowanie systemów ekologicznych. Stąd też kluczowym wyzwaniem współczesnej ochrony przyrody jest zachowanie wszelkich przejawów różnorodności form życia (w tym zróżnicowania genetycznego), zapewnienie ciągłości i trwałości istnienia procesów ekologicznych (w tym ewolucyjnych), a szczególnie zaś ochrona gatunków rzadkich, zagrożonych wyginięciem.

Najważniejsze zagrożenia dla biosfery – które są przyczyną współczesnego, masowego wymierania gatunków na Ziemi – to pochodne gwałtownego wzrostu liczby ludności świata, i obejmują m.in.:

1. nadmierną eksploatację zasobów przyrodniczych,
2. rolnictwo (szczególnie wielkoobszarowe),
3. urbanizację,
4. inwazje biologiczne,
5. zanieczyszczenie środowiska,
6. zmianę klimatu.

Dominacja człowieka w biosferze i jego dwie równoległe postawy względem środowiska – postawa egoistyczna i postawa odpowiedzialności – przywodzą na myśl niezwykle ważne współcześnie pytanie: jak pogodzić dobrostan biosfery z korzystnym dla człowieka postępowaniem cywilizacyjnym? Instrumentalne traktowanie przyrody w dobie antropocenu – epoce geologicznej charakteryzującej się przemożnym wpływem człowieka na biosferę i geologiczny system Ziemi – najpewniej obróci się przeciwko człowiekowi i zagrozi nie tylko istnieniu przyrody jako wartości samej w sobie, ale także jemu samemu. ■

# Autorzy

**Ewa Borowska**, założycielka Extremo Technologies i obecna dyrektor ds. technologii (CTO). Naukowo oceanograf i astrobiolog. Zajmuje się początkami życia, wczesną fotosyntezą, geomikrobiologią oraz organizmami ekstremofilnymi. Łączy innowacyjne technologie, udoskonala systemy w oparciu o nowe biotechnologie i wdraża w firmie podejście interdyscyplinarne. Wierzy, że badania nad organizmami ekstremofilnymi odpowiedzą na wiele pytań dotyczących życia na innych planetach Układu Słonecznego i poza nim, walki z różnymi chorobami czy ochronie środowiska.

**dr hab. Ewa Chudzińska**, profesor Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, kierownik Zakładu Genetyki na Wydziale Biologii UAM, pełniła funkcję dyrektora ds. dydaktyki w Instytucie Biologii Eksperymentalnej. Prowadzi m.in. wykłady z Genetyki dla studentów biologii i biotechnologii WB. Dorobek publikacyjny obejmuje prace wykonane z wykorzystaniem metod genetyki molekularnej, odnoszące się do procesów mikroewolucji i hybrydyzacji w populacjach roślin blisko spokrewnionych i o niejasnym statusie taksonomicznym, w tym gatunków kryptycznych i gatunków tworzących kompleksy mieszańcowe. Jest też autorem artykułów popularnonaukowych oraz recenzentem licznych artykułów badawczych w czasopismach naukowych. Koncentruje się wokół zagadnień związanych z genetyką i ewolucją w populacjach roślin i zwierząt pod wpływem stresów abiotycznych oraz przebiegiem specjacji i ewolucji różnych organizmów. Zajmuje się analizą procesów wpływających na zróżnicowanie genetyczne w naturalnych populacjach roślin z uwzględnieniem badań nad demografią, biogeografią, hybrydyzacją i specjacją badanych gatunków.

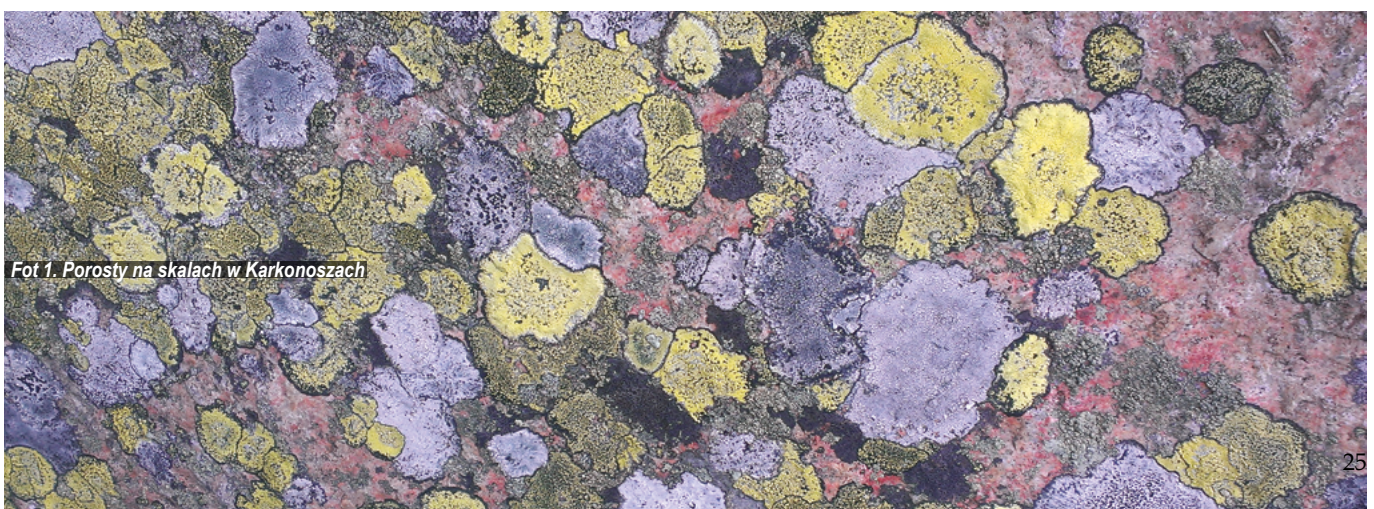
**prof. dr hab. inż. Andrzej M. Jagodziński**, leśnik i biolog. Profesor i dyrektor Instytutu Dendrologii Polskiej Akademii Nauk w Kórniku, w którym kieruje także Zakładem Ekologii. Jest także profesorem w Katedrze Łowiectwa i Ochrony Lasu na Wydziale Leśnym i Technologii Drewna Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Zawodowo zajmuje się analizą czynników determinujących produkcję biomasy i retencję węgla w lasach oraz analizą ekologicznych uwarunkowań różnorodności biologicznej ekosystemów leśnych.

**dr hab. Mirosław Makohonienko**, profesor Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, archeolog i geograf, paleoekolog czwartorzędu, badający miejsce człowieka w przyrodzie. Członek Rady Instytutu Geoekologii i Geoinformacji, członek Rady Wydziału w składzie ds. naukowych,

członek Rady Wydziału w składzie ds. administracyjnych, członek Wydziałowej Komisji ds. Grantów Unii Europejskiej, członek Instytutowej Komisji ds. dydaktycznych, członek Komitetu Redakcyjnego Badań Fizjograficznych (od 2010), członek zwyczajny (od maja 1998) Poznańskiego Towarzystwa Przyjaciół Nauk (PTPN), członek zwyczajny (od czerwca 2002) Stowarzyszenia Naukowego Archeologów Polskich (SNAP), członek Stowarzyszenia Archeologii Środowiskowej (SAS), współinicjator powołania Stowarzyszenia (członek założyciel), członek zwyczajny (od 2010 r.) Komitetu Badań Czwartorzędu, członek Zarządu (w latach 2006-2008) Association for Environmental Archaeology (Wielka Brytania). Recenzent w czasopismach naukowych zagranicznych (Quaternary International, Vegetation History and Archaeobotany, Geophysical Research Letters, Japan Review) i krajowych (Studia Quaternaria, Badania Fizjograficzne).

**dr Wojciech Stawikowski**, adiunkt w Instytucie Geologii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Główne obszary jego zainteresowań badawczych to geologia skał metamorficznych oraz rozwój tektoniczny stref górotwórczych, a także geologia regionalna Polski. Angażuje się on w badania naukowe realizowane przede wszystkim na obszarze Dolnego Śląska, w obrębie dawnego orogenu waryscyjskiego. Szczególną rolę w swej działalności zawodowej przywiązuje do prowadzenia działalności dydaktycznej oraz do popularyzacji wiedzy geologicznej. Jest opiekunem Studenckiego Koła Amerykańskiego Stowarzyszenia Geologów Naftowych przy UAM.

**dr hab. Witold Szczuciński**, profesor w Instytucie Geologii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, gdzie kieruje Pracownią Geozagrożeń. Głównym obiektem jego badań są osady, które stanowią archiwum historii Ziemi. Szczególnie interesuje go ilościowe ujęcie współczesnych procesów sedymentacyjnych oraz zapis zmian środowiskowych w osadach, zwłaszcza tych związanych z katastrofami naturalnymi (tsunami, sztormami, powodziami, impaktami meteorytowymi, szarżami lodowcowymi). Na ich potrzeby wykorzystuje szeroki wachlarz metod – od pomiarów ziaren piasku, przez badania promieniotwórczych pierwiastków z wykorzystaniem spektrometrii gamma po badania kopalnego DNA. Badania prowadzi zarówno na lądzie, jak i na morzu, głównie w obszarach polarnych (Spitsbergen, Grenlandia, Morze Grenlandzkie, Antarktyka), wschodniej Azji (Japonia, Tajlandia, Morze Południowochińskie, Rów Japoński) i w Polsce (Bałtyk, Wielkopolska, Tatry).



Fot 1. Porosty na skalach w Karkonoszach



INSTYTUT DENDROLOGII  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK



JUBILEUSZ

1933 r.  
Zakład Badania Drzew i Lasu

1950 r.  
Zakład Dendrologii i Pomologii

1952 r.  
Zakład Dendrologii i Pomologii  
Polskiej Akademii Nauk

1962 r.  
Zakład Dendrologii i Arboretum Kórnickie  
Polskiej Akademii Nauk

1974 r.  
Instytut Dendrologii  
Polskiej Akademii Nauk



 [idpan.poznan.pl](http://idpan.poznan.pl)

 [facebook.com/InstytutDendrologiiPAN](https://facebook.com/InstytutDendrologiiPAN)

 [youtube.com/@InstytutDendrologiiPAN](https://youtube.com/@InstytutDendrologiiPAN)

SPOŁECZNA ODPOWIEDZIALNOŚĆ NAUKI

# KLIMAT NA BIORÓŻNORODNOŚĆ

WYKŁADY I WARSZTATY



SONP/SP/513422/2021 - ŹRÓDŁA FINANSOWANIA:



Ministerstwo  
Edukacji i Nauki



Miasto i Gmina  
Kórnik



Fundacja  
Zakłady Kórnickie



Instytut Dendrologii  
Polskiej Akademii Nauk



## DENDRON+LOGOS



## RÓŻNORODNOŚĆ BIOLOGICZNA

