

JANUARY WEINER*

Zmiany różnorodności biosfery: dawniej, dziś, jutro**

Zmiany różnorodności biosfery to modny temat – dla badaczy, dla ekologów, dla opinii publicznej. Co roku ukazują się na ten temat setki publikacji naukowych, a jeszcze więcej popularnych i medialnych. Paradoksalnie, im więcej tekstów na ten temat się przeczyta, tym lepiej się wie, czego nie wiadomo.

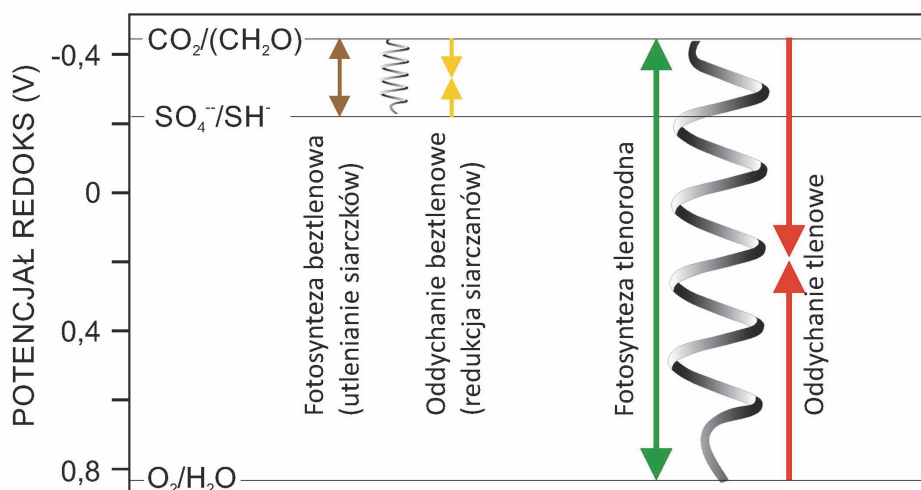
Nasz świat istnieje od 13,5 mld lat, Układ Słoneczny i Ziemia – od ok. 4,6 mld lat, życie na Ziemi – tego dokładnie nie wiemy, ale przypuszczamy, że od około 3,7 mld lat. Nie wiemy też, jak powstało życie. Jest wiele hipotez na ten temat (Weiner, Weiner 2023), ale możemy się domyślać, że od zarania życia na Ziemi rosła jego różnorodność. Immanentną cechą życia jest ewolucja – powielanie żywych obiektów z błędami (mutacjami) i naturalna selekcja, prowadząca do rozwoju różnorodnych linii ewolucyjnych. Nie wiadomo, czy pierwsze były autotrofy czy heterotrofy, ale prawie na pewno bardzo wcześnie były jedne i drugie. Od początku musiał działać dobór różnicujący strategie metaboliczne. Przez większość czasu wczesnego życia mikroorganizmy wykorzystywały chemiczne substraty – były chemoautotrofami i chemoheterotrofami, wykorzystując do reakcji, na których polega życie, syntezę związków organicznych przez redukcję i napędzanie procesów życiowych przez utlenianie; substratami są związki pierwiastków takich jak węgiel, siarka czy azot. Różne strategie życiowe heterotrofów: drapieżnika, pasożyta, a także chemoautotrofa, musiały powstać w najwcześniejszych etapach ewolucji. Trwało to co najmniej przez miliard (tysiąc milionów) lat. Wszystkie żyjące wówczas organizmy były bakteriami lub archeonami, niepozostawiającymi wyraźnych skamieniałości, które pozwoliłyby paleobiologom odtworzyć ówczesną różnorodność życia. Pozostawiły jednak ślady geochemiczne w skalnych osadach, na podstawie których można wnioskować, jakie procesy mogły mieć miejsce w prehistorii życia na Ziemi.

Ogromnym postępem ewolucji było „wynalezienie” przez niektóre bakterie sposobu, aby do energochłonnej syntezy związków organicznych wykorzystać strumień dos-

* Prof. dr hab. January Weiner (january.weiner@uj.edu.pl), Instytut Nauk o Środowisku, Uniwersytet Jagielloński, professor emeritus

** Artykuł na podstawie referatu wygłoszonego na sesji „Klimat, przyroda i człowiek w antropocenie”, w ramach międzynarodowej konferencji „Świat w obliczu nowych wyzwań” podczas obchodów 150-lecia Polskiej Akademii Umiejętności, w Krakowie, w dniach 18–20 X 2022.

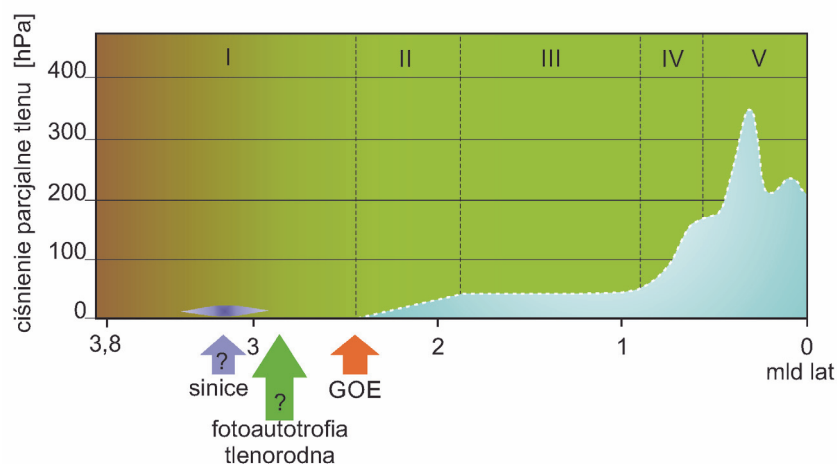
tępną energią słoneczną. Tak powstały fotoautotrofy, które początkowo w beztlenowych reakcjach redoks wykorzystywały siarkę, żelazo lub cząsteczkowy wodór (podobną strategię stosują dziś żyjące beztlenowe fotoautotrofy, na przykład zielone i purpurowe bakterie siarkowe). Kolejnym przełomowym „wynalazkiem” była fotosynteza tlenorodna, wykorzystująca energię światła słonecznego do rozkładu cząsteczki wody, uwolniony reduktor – wodór – służył do syntezy związków organicznych (Sánchez-Baracaldo, Cardona 2020). Uwolniony tlen mógł posłużyć do utleniania zredukowanych związków, by uwolnioną w ten sposób energią wykorzystać do pracy. Fotosynteza tlenorodna wymagała zaawansowanych adaptacji, ale dawała ogromną korzyść: budżet energetyczny mógł być prawie o rząd wielkości wyższy niż u beztlenowców (ryc. 1). To tak, jakby sinice przesiadły się z roweru na motocykl.



Ryc. 1. Potencjały redoks fotosyntezy bakteryjnej i oddychania beztlenowego oraz fotosyntezy tlenorodnej i oddychania tlenowego (wg Weiner, Weiner 2023)

Przez pierwsze setki milionów lat uwalniany tlen był pochłaniany przez minerały zawierające np. zredukowane związki żelaza oraz przez organizmy nim oddychające, przede wszystkim autotroficzne sinice. Mniej więcej 2,5 mld lat temu tempo produkcji tlenu zaczęło przeważać nad tempem pochłaniania, a jego ilość zaczęła wzrastać w atmosferze i w powierzchniowych warstwach oceanu (ryc. 2). Dla większości żyjących wówczas organizmów (beztlenowych heterotrofów i autotrofów) tlen był trucizną, dlatego około 2,5 mld lat temu doszło do pierwszej gigantycznej katastrofy w biosferze (Great Oxidation Event, GOE): wymarcia większości żyjących wówczas organizmów (Knoll 2022, Weiner, Weiner 2023). To było pierwsze Wielkie Wymieranie, spowodowane

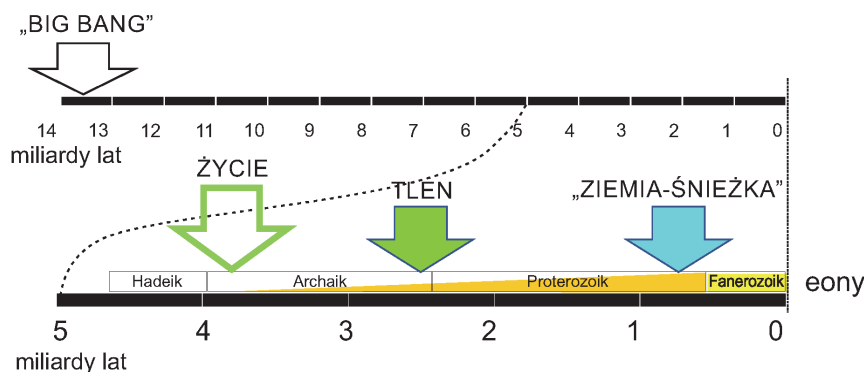
wane przez ówczesnych mieszkańców Ziemi, dlatego, że udało się im podwyższyć swoje budżety energetyczne.



Ryc. 2. Przebieg zmian zawartości tlenu w atmosferze Ziemi (wykres pokazuje hipotetyczne wartości ciśnienia parcjalnego tlenu; kolor niebieski). I – archaik: zupełny brak tlenu w atmosferze; II – okres stopniowego wzrostu zawartości tlenu, III – mniej więcej stała zawartość tlenu przez około 1 mld lat; IV – od 850 mln lat wzrost zawartości tlenu w atmosferze; V – fanerozoik: szczytowe wartości w okresie karbońskim i spadek do współczesnej zawartości. GOE – katastrofa tlenowa (Great Oxidation Event; wg Weiner, Weiner 2023, na podstawie Holland 2006)

Dzięki naturalnej selekcji tlenorodne fotoautotrofy i oddychające tlenem heterotrofy odniosły sukces ewolucyjny i stopniowo zdominowały biosferę, zwiększając jej całkowitą biomasę i bioróżnorodność. Jednym ze skutków tej koniunktury musiało być wyczerpanie niezbędnych do fotosyntezy zasobów dwutlenku węgla, a to z kolei musiało spowodować ochłodzenie klimatu. Nie ma prostych i jednoznacznych dowodów, że taki był związek przyczynowo-skutkowy, ale nie ma też wątpliwości, że około 700 mln lat temu doszło do głębokiego ochłodzenia klimatu całej Ziemi: oceany zamrzły, kontynenty pokrył śnieg i lód, tempo procesów życiowych całej biosfery (łącznie ze sprawcami tego wydarzenia) musiało ulec radykalnemu obniżeniu. Można przypuszczać, że było to drugie wielkie wymieranie, spowodowane przez mieszkańców Ziemi (ryc. 3). Jednak dwutlenek węgla był dostarczany przez cały czas aktywne wulkany, jego stężenie w atmosferze rosło, więc klimat się ocieplał, lody topniały. Od około 600 mln lat życie na Ziemi się odrodziło, nastąpiła eksplozja jego różnorodności, w czym wielki udział miały eukarionty i organizmy wielokomórkowe, które się wtedy pojawiły.

Od tego czasu mamy „historię pisaną” życia na Ziemi – w warstwach osadów na dnie oceanów zachowały się fosylia, znakomicie dokumentujące charakter i różnorodność życia i ich zmiany w czasie.

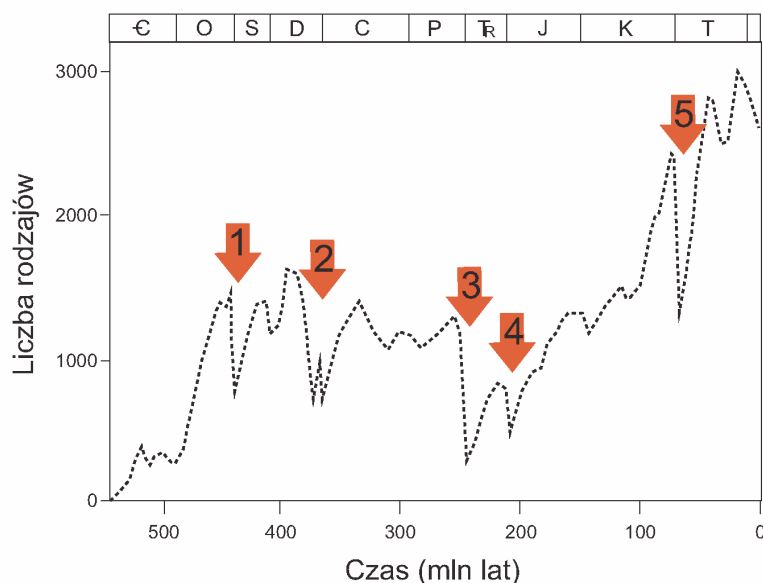


Ryc. 3. Wczesna historia Ziemi, początek życia i dwa pierwsze Wielkie Wymierania, spowodowane ewolucją fotosyntezy tlenorodnej

Mogli z tego skorzystać paleontolodzy, zwłaszcza że koncerny poszukujące ropy naftowej inwestowały w podmorskie wiercenia fundusze o rzędy wielkości przekraczające budżety instytucji naukowych, ale na szczęście udostępniły te materiały paleobiologom. Stało się to na przełomie lat 70. i 80. ubiegłego wieku – okazało się wtedy, że bogactwo i różnorodność życia w epoce fanerozoiku – jak nazywamy ten okres pisanej historii życia na Ziemi – rosło coraz szybciej, chociaż nie wzdłuż gładkiej krzywej wykładniczej: na wykresie wzrostu różnorodności taksonów widać załamania. Jedna z pierwszych, najbardziej sensacyjnych publikacji na ten temat (Raup, Sepkoski 1982) i powtórzona przez jednego z autorów 10 lat później na nowszych danych (Sepkoski 1993) pokazała wzrost liczby rodzin morskich otwornic w ciągu prawie 600 mln lat, ukazując głębokie załamania, co oznaczało wymarcie większości gatunków. Analizy danych powtórzone na innych zbiorach danych, obejmujących różne taksony, potwierdziły ten sam wzorec (ryc. 4). Pięć najgłębszych załamań nazwano „Wielkimi Wymieraniami” (nie zaliczając do nich wielkich wymierań sprzed epoki fanerozoiku). Kiedy jednak popatrzymy na wykresy oparte na bardziej współczesnych danych, obejmujących więcej form życia niż morski plankton, widać, że wymieranie trwało zawsze, oprócz owych pięciu „wielkich”, były wymierania spore, średnie, niezbyt duże, nieznaczne; im więcej było gatunków – tym więcej z nich wymierało (Alroy 2008, Alroy *et al.* 2008, Aberhan, Kiessling 2012, Holland, Sclafani 2015, Benson *et al.* 2021, Cermeño *et al.* 2022).

Najlepiej znane i najslawniejsze ze wszystkich Wielkie Wymieranie wydarzyło się 66 mln lat temu: wtedy wyginęły nie tylko dinozaury (o czym wiedzą nawet małe dzieci), ale 17% wszystkich rodzin, 50% rodzajów, 75% gatunków. Przyczyną było uderzenie asteroidy o średnicy kilkunastu kilometrów (tysiąc razy mniejszej od średnicy Ziemi), co uwolniło ogromną ilość energii, powodując skutki tektoniczne, gigantyczne fale tsunami i długotrwałą zmianę klimatu. Ilość wyzwolonej wówczas energii szacuje się na

420 000 EJ (eksadzuli, czyli 420×10^{21} J), co odpowiada 100 000 Gt trotylu – dziesiątki tysięcy razy więcej energii, niż zawiera 15 tys. bomb atomowych, zgromadzonych podobno przez niektóre współczesne populacje *Homo sapiens*.



Ryc. 4. Liczba rodzajów morskich zwierząt w epoce fanerozoiku; zaznaczono pięć Wielkich Wymierania na przełomie okresów (1) ordowiku i syluru, (2) dewonu i karbonu, (3) permu i triasu, (4) triasu i jury oraz (5) kredy i trzeciorzędu (wg Sepkoski 1993 i Sepkoski 2000, zmienione)

Tabela 1. Główne przyczyny i ocena intensywności pięciu Wielkich Wymierania

Wielkie Wymierania	Kiedy [mln lat temu]	Główna przyczyna	% wymarłych taksonów		
			Rodzin	Rodzajów	Gatunków
I	440 (Ordowik/Sylur)	Ochłodzenie? Promieniowanie $\gamma \rightarrow$ UV?	27	57	85
II	365 (Dewon/Karbon)	Wulkanizm Promieniowanie $\gamma \rightarrow$ UV?	19	50	75
III	253 (Perm/Trias)	Wulkanizm	57	83	90–96
IV	201 (Trias/Jura)	Wulkanizm	23	48	80
V	66 (Kreda/Paleogen)	Asteroida (+ wulkanizm?)	17	50	75

Największy spadek liczby gatunków nastąpił podczas trzeciego Wielkiego Wymierania, które determinuje granice okresów permu i triasu, 253 mln lat temu (ryc. 4). Według wielu oszacowań wyginęło wówczas 90–96% wszystkich gatunków (81% morskich, 70% lądowych), 83% wszystkich rodzajów, 57% wszystkich rodzin (wtedy ostatecznie wyginęły trylobity). Nie ma wątpliwości, iż główną przyczyną tego wydarzenia był gigantyczny wulkanizm, który trwał przez dwa miliony lat, pozostawił ogromne pokłady bazaltu (trapy syberyjskie), zmienił klimat i chemizm atmosfery (Tang *et al.* 2013).

Wulkanizm był główną przyczyną trzech Wielkich Wymierań (być może miał też swój udział w pozostałych), przyczyną tylko jednego było wydarzenie kosmiczne: zderzenie z asteroidą (tab. 1).



Ryc. 5. Szkielet leniwca olbrzymiego (*Megatherium americanum*), wymarłego 11 000 lat temu, wkrótce po inwazji gatunku *H. sapiens* do Ameryki Pd. (Muséum national d'Histoire Naturelle, Galerie de Paléontologie et d'Anatomie compare w Paryżu. Fot. J. Weiner)

Jako jedną z możliwych przyczyn dwóch wielkich wymierań stawiana jest hipoteza o wybuchu niezbyt odległej gwiazdy supernowej, której silne promieniowanie gamma mogło spowodować usunięcie z atmosfery warstwy ozonu i w konsekwencji dopuszczenie zabójczego promieniowania UV do powierzchni Ziemi (Fields *et al.* 2020). We wszystkich Wielkich Wymieraniach zniknęło 17–57% rodzin, co oznacza, że wyginęło co najmniej 3/4 wszystkich gatunków. Przyczynami wszystkich pięciu Wielkich Wymierań były wydarzenia zewnętrzne, a nie skutki funkcjonowania żywych organizmów na Ziemi. Po Wielkich Wymieraniach stosunkowo dość szybko – zwykle w ciągu kilkunastu milionów lat – różnorodność się odradzała (Cermeño *et al.* 2022).

W fanerozoiku było więc pięć Wielkich Wymierań i wiele mniejszych. Dziś coraz częściej mówi się o trwającym już obecnie „Szóstym Wielkim Wymieraniu”, wiele publikacji popularnonaukowych, medialnych, ale także *sensu stricto* naukowych, zajmuje się tym problemem (Kolbert 2016, Cowie *et al.* 2022). Są wiarygodne dane, które wskazują, że obecnie trwa wymieranie gatunków i redukcja różnorodności, a także, że istotną przyczyną jest działalność populacji jednego gatunku – *Homo sapiens*.

W najnowszej historii życia na Ziemi też mamy przykłady równoczesnego wymierania wielu gatunków, znamy konkretne przyczyny: to nasi przodkowie dokonywali tej eksterminacji. Przykładem są wielkie nietlne ptaki, moa (*Dinornis*) na Nowej Zelandii, oraz mamutaki („ptaki słoniowe; *Epiornis*) na Madagaskarze, które zniknęły, kiedy pojawili się ludzie. Hekatomba spotkała faunę dużych kręgowców obu Ameryk, kiedy ludzie przybyli z Azji przez przesmyk alaskański i w ciągu dwóch tysięcy lat zajęli oba kontynenty. Wyćpienie leniwca olbrzymiego (ryc. 5) to tylko jeden spektakularny przykład, ale ginęły wówczas dziesiątki gatunków ssaków i ptaków, o czym świadczą liczne dane paleontologiczne i archeologiczne (Meltzer 2020). W najnowszej historii mamy też dziesiątki przykładów wyćpienia gatunków (tab. 2), nawet z datami śmierci ostatnich osobników¹ – za dużo, żeby je tu wszystkie wymieniać.

Ale czy to jest wymieranie tej skali, co poprzednie pięć Wielkich Wymierań? Choć dość dobrze znamy liczbę gatunków, co do których jesteśmy pewni, że już ich nie ma, to jednak nie wiemy, ile gatunków naprawdę wymarło w czasach historycznych. Jeszcze trudniej oszacować proporcję, jaką wymarłe gatunki stanowią wśród wszystkich, które jeszcze żyją. Wymagałoby to założeń, że wiemy ile na Ziemi jest gatunków w każdej grupie taksonomicznej. Według dostępnych danych liczba gatunków, o których wiemy na pewno, że wymarły, stanowi bardzo niewielki procent gatunków, o których wiemy, że istnieją (tab. 2). Problem polega na tym, że naprawdę nie wiemy ani tego, ile gatunków wymarło, ani tego, ile jest gatunków współcześnie żyjących.

¹ Na przykład, ostatni ptak dodo (*Raphus cucullatus*) na wyspie Mauritius w 1662 r.; ostatni gołąb wędrowny (*Ectopistes migratorius*) w Ameryce Północnej w 1914 r.

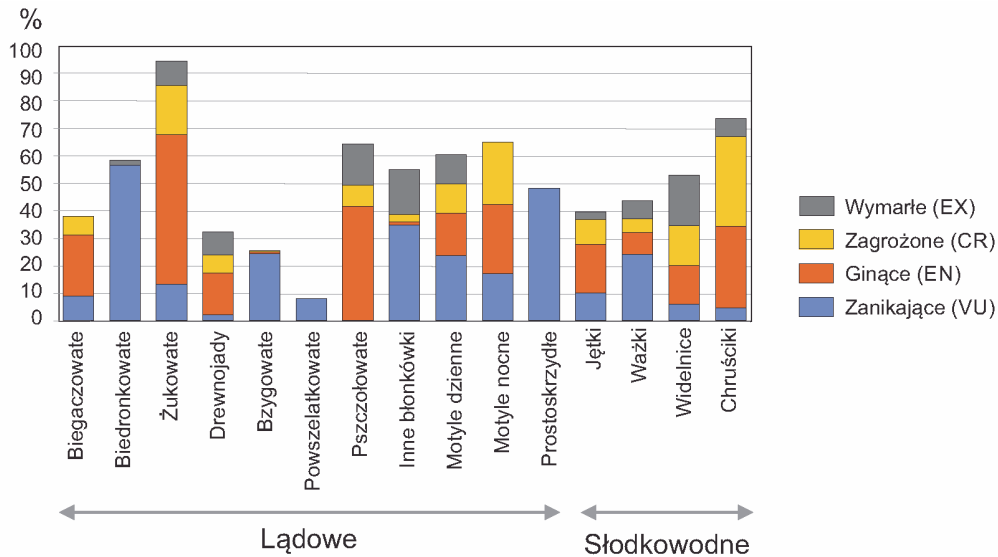
Mało jest wiarygodnych informacji o stuprocentowym wymarciu gatunków. Bardzo trudno to dokładnie określić. Jeżeli osobników jakiegoś gatunku (w skali całej planety) ostatnio nie widziano, to jeszcze nie dowód, że on już nie istnieje. Dla wielu gatunków można jednak stwierdzić zagrożenie wymarciem, którego miarą jest obserwowany spadek liczebności. Jest coraz więcej takich danych, dotyczących także mniej spektakularnych grup niż kręgowce. Na przykład nowe dane pokazują, że wśród obecnie żyjących owadów wiele taksonów jest mniej lub bardziej poważnie zagrożonych wymarciem (ryc. 6; Sánchez-Bayo, Wyckhuys 2019, Raven, Wagner 2021, Schachat, Labandeira 2021).

Tabela 2. Szacunkowe dane o liczbie gatunków wymarłych od roku 1500 (wg Weiner 2020, na podstawie IUCN Red List 2019)

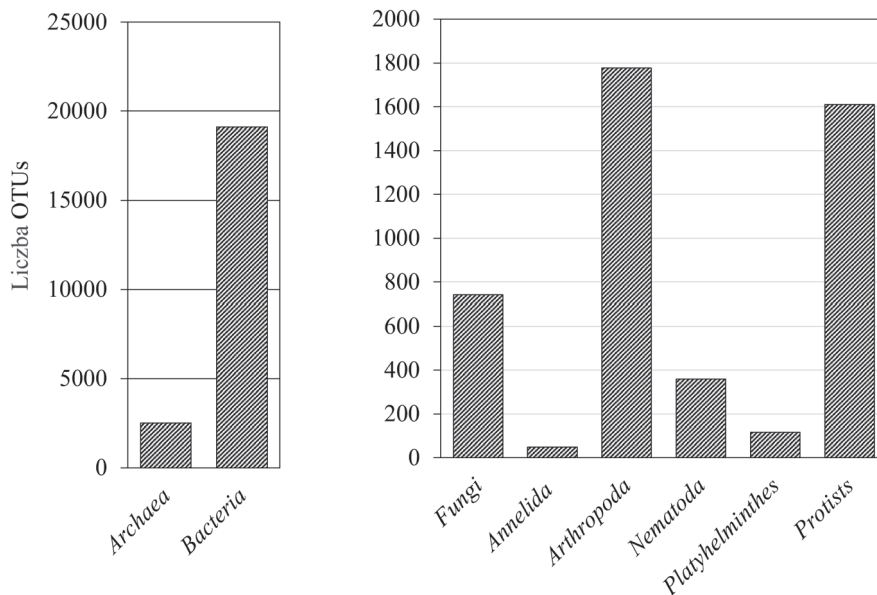
Takson	Udokumentowane wymarcia	Oszacowana liczba żyjących gatunków	% wymarłych
Mięczaki	313	$80,3 \times 10^3$	0,39
Skorupiaki	12	47×10^3	0,03
Owady	63	1200×10^3	0,005
Ryby	29	342×10^3	0,008
Płazy	72	$8,0 \times 10^3$	0,90
Gady	33	$10,8 \times 10^3$	0,31
Ptaki	161	$11,1 \times 10^3$	1,45
Ssaki	83	$5,8 \times 10^3$	1,43
Rośliny kwiatowe	146	268×10^3	0,05
Nagoląźkowe	4	$1,1 \times 10^3$	0,36

Gorzej jest z naszą wiedzą o tym, ile naprawdę jest gatunków i jaki procent tej liczby stanowią gatunki zagrożone. Co roku opisywane są tysiące nowych gatunków ze wszystkich grup taksonomicznych, nawet tych, które są najlepiej poznane, jak ptaki, ssaki, płazy, gady czy rośliny kwiatowe, i nie tylko w najbardziej egzotycznych rejonach świata (np. Köhler *et al.* 2005, Ghielmi *et al.* 2016, Irham *et al.* 2022).

Ogromną większość form życia w każdym ekosystemie stanowią bakterie, archeony, grzyby i mikroskopijne bezkręgowce. Współczesne metody molekularne pozwalają oszacować tę bioróżnorodność, rozróżniając genotypy mikroorganizmów, których większość jest nauce w ogóle nieznana; można określić ich liczbę, w poszczególnych grupach taksonomicznych, ale poza tym nic o nich nie wiadomo, dlatego do ich określenia zamiast terminu „gatunek” używa się terminu OTU (*Operational Taxonomic Unit*). Jest coraz więcej takich danych, na przykład w glebie lasu tropikalnego w Gujanie stwierdzono obecność dziesiątek tysięcy OTU-sów bakterii i archeonów, tysięcy stawonogów



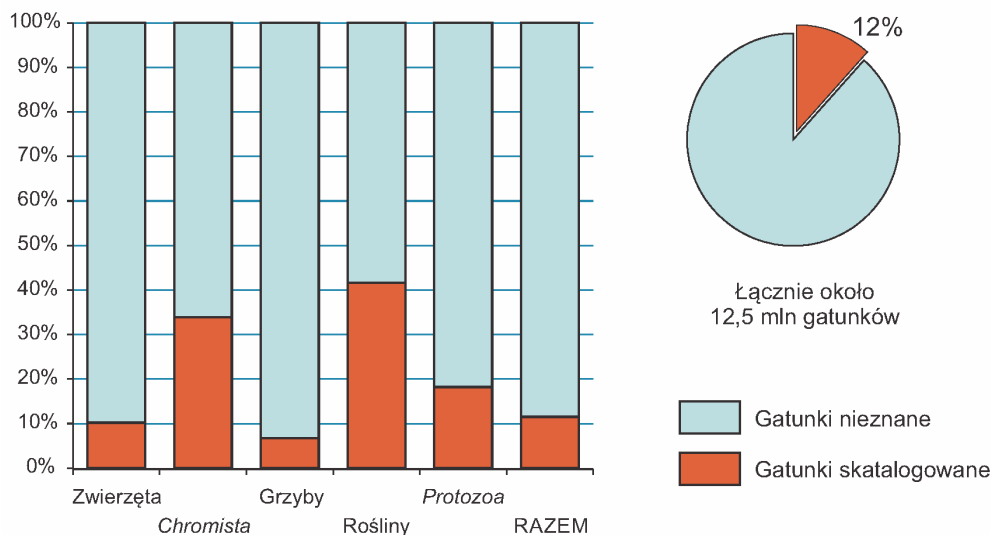
Ryc. 6. Proporcje liczb gatunków owadów lokalnie zagrożonych lub wymarłych, skategoryzowane według kryteriów Międzynarodowej Unii Ochrony Przyrody (IUCN): wymarłe (EX) – niezarejestrowane od 50 lat; krytycznie zagrożone (CR) – redukcja więcej niż 50% populacji; zagrożone – (EN) – redukcja więcej niż 30% populacji; zanikające (VU) redukcja mniej niż 30% populacji. (wg Weiner 2020, na podstawie Sánchez-Bayo, Wyckhuys 2019)



Ryc. 7. Liczebność taksonów wykrytych metodami molekularnymi w glebie lasu deszczowego Gujany; OTU (Operational Taxonomic Unit, czyli Operacyjna Jednostka Taksonomiczna) określa osobny takson, najczęściej w randze gatunku, którego jednak nie zidentyfikowano ani nie opisano (wg Zinger *et al.* 2019)

i pierwotniaków, setek OTU-sów grzybów, nicieni i innych grup taksonomicznych (Zinger *et al.* 2019, ryc. 7). Ostatnio (w grudniu 2022) opublikowano doniesienie o odkryciu nowej, dotychczas nieznannej grupy taksonomicznej wysokiej rangi, złożonej z wielu dotąd nieznanymi gatunków morskich drapieżnych mikroorganizmów eukariotycznych, które w niewielkich liczebnościach występują w morzach na całym świecie; tej supergrupie nadano nazwę *Provora* (Tikhonenkov *et al.* 2022). Nie wiadomo też, czy różnorodność mikroorganizmów obecnie rośnie, maleje, czy pozostaje stała (Thaler 2021).

Tempo opisywania nowych gatunków, również przy zastosowaniu metod molekularnych, nawet przy dyskryminacji budżetowej i nagminnej deprecjacji znaczenia badań taksonomicznych wciąż rośnie, co pozwala oszacować w przybliżeniu rzeczywistą liczbę gatunków we współczesnej biosferze. Jest ona wielokrotnie wyższa od liczby gatunków opisanych i nazwanych. Według najnowszych danych znamy około 2 mln gatunków zwierząt, roślin, grzybów i „pierwotniaków” (*Protista*). Badacze od wielu lat wkładają wiele wysiłku, aby oszacować ich prawdziwą liczbę, trwają spory, a rozmaite hipotezy różnią się o rząd wielkości. Jedna z najnowszych i ostrożniejszych (ryc. 8) mówi, że – być może – znamy zaledwie 12% współistniejących z nami gatunków (o OTU-sach bakterii i archeonów w ogóle nie wspominamy; Mora *et al.* 2011, Weiner 2020).



Ryc. 8. Proporcje liczby poznanych gatunków do oszacowanej liczby gatunków współcześnie żyjących (Weiner 2020, wg Mora *et al.* 2011)

Skoro mamy już oszacowania spadku liczebności gatunków (zatem liczbę zagrożonych wymarciem) i hipotetycznej liczby gatunków istniejących, można określić stopień

zagrożenia różnorodności biosfery. Takie dane, z listami zagrożonych gatunków, są regularnie publikowane przez powołane do tego międzynarodowe instytucje, przede wszystkim Międzynarodową Unię Ochrony Przyrody (IUCN 2022), także przez organizacje lub naukowe instytuty krajowe (Polska Czerwona Księga Roślin: Kaźmierczakowa *et al.* 2015, Polska Czerwona Księga Zwierząt: Głowaciński 2001, Głowaciński, Nowacki 2004). Ale i tu mamy kłopot: przecież dane o zagrożeniu gatunków i dane o liczbie istniejących nie są dokładne. Co więcej, tradycja i stopień zaangażowania badań naukowych wyróżnia pewne taksony kosztem innych. Jak ostatnio doniesiono, proporcja gatunków uwzględnianych w „czerwonych listach” jest znacznie większa dla lądowych kręgowców niż na przykład dla mięczaków i innych bezkręgowców (Cowie *et al.* 2022).

Najnowsze próby możliwie obiektywnego i metodycznie poprawnego oszacowania liczby wymarłych i zagrożonych wymarciem gatunków z różnych grup taksonomicznych przynoszą dane z określeniem marginesu możliwych błędów. Nie wchodząc w głąb tych analiz, można stwierdzić, że liczba gatunków wymarłych od roku 1500 i zagrożonych wymarciem obecnie zawiera się w przedziale 25–40%, średnio około 30% gatunków aktualnie żyjących (Antonelli 2022, Isbell *et al.* 2022). To może być początek bardzo dużego wymierania, jednak – jak dotąd – niedorównującego pięciu poprzednim wielkim katastrofom, w których na pewno ginęło więcej niż 3/4 wszystkich ówczesnych gatunków.

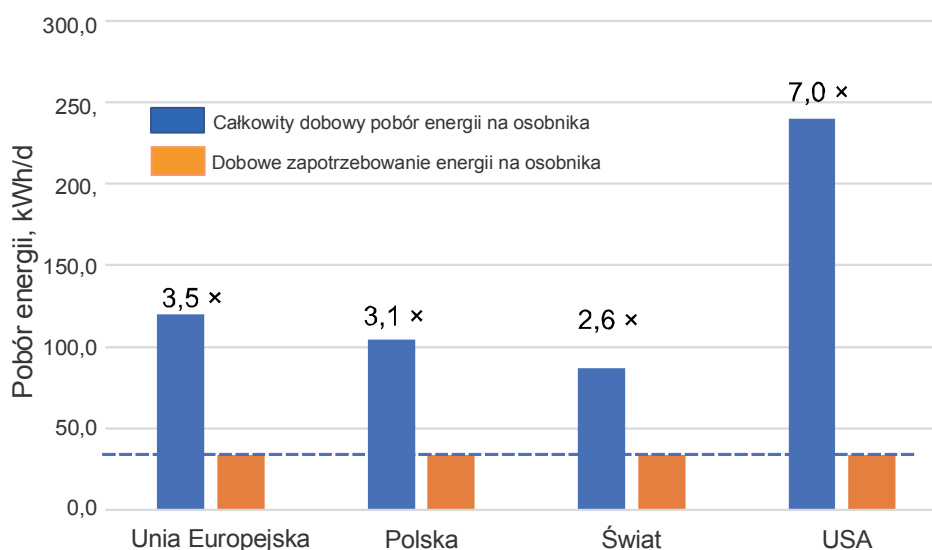
Jedno wiemy na pewno: przyczyną przyspieszonego wymierania gatunków jest dominacja we współczesnej biosferze jednego gatunku lądowego kręgowca, mianowicie *Homo sapiens*, co najmniej od 12 000 lat (Ellis *et al.* 2021). Przyczyną wymierania lub zagrożenia wymarciem dla wielu gatunków jest najczęściej zniszczenie naturalnych siedlisk, nadmierna eksploatacja, wypieranie przez gatunki inwazyjne (zawleczone przez człowieka), zmiany klimatu i stosowanie trucizn, zwanych pestycydami (Pereira *et al.* 2012, Weiner 2020).

Typowe biomy zachowały się już tylko w parkach narodowych i rezerwach oraz tam, gdzie subpopulacje *Homo sapiens* nie znajdują odpowiednich warunków dla siebie. Współcześnie dominujące typowe krajobrazy to biomy przekształcone przez człowieka (ukuto dla nich nazwę „antromy”, od „*anthropogenic biomes*”; Ellis *et al.* 2010). Antromy zajmują już prawie całą powierzchnię lądów, pokrytych polami uprawnymi, pastwiskami, plantacjami drzew, wsiami i miastami itp. Niewielkie obszary nadal występujących biomów naturalnych to przeważnie pustynie, fragmenty puszczy amazońskich i polarna tundra.

Bezpośredni wpływ konsumpcji pokarmu przez ten gatunek ssaka na zasoby biosfery można różnie przedstawiać, na przykład porównując sumaryczną biomasa populacji gatunku *Homo sapiens* z biomasa pozostałych gatunków ssaków w biosferze. Biomasa gatunku *Homo sapiens* stanowi 1/3, a łączna biomasa kilku gatunków hodowanych przez niego w celu zaspokojenia zapotrzebowania pokarmowego (ssaki kopytne – głów-

nie bydło, świnie, owce i in.) to prawie 2/3 biomasy. Pozostałe 5400 gatunków ssaków, od ryjówek po słonie – to zaledwie 4% całkowitej biomasy (Bar-On *et al.* 2018). Jeżeli chodzi o ptaki *Homo sapiens* konsumuje rocznie 60 mld osobników drobiu (hodowana kura domowa jest najliczniejszym gatunkiem ptaka w historii biosfery).

Zaspokojenie głodu tego wszystkożernego gatunku przez konsumpcję roślin i zwierząt to tylko jeden aspekt jego wpływu na ekosystem biosfery. *Homo sapiens* powtórzył to, co 2,5 mld lat temu zrobiły sinice: znacznie podniósł swoje przeciętne osobnicze wydatki energetyczne, w niektórych lokalnych populacjach (np. w USA) siedmiokrotnie, w populacjach europejskich 3–3,5 razy (ryc. 9). Znaczna część populacji światowej ogranicza swój dobowy budżet energetyczny do zaledwie dwukrotnej wartości zapotrzebowania organizmu – co oznacza dramatycznie niski komfort życia, więc z poprawą warunków dobowe zużycie energii w tych populacjach będzie rosło i może średnia światowa dotrze do 3,5-krotnego zapotrzebowania fizjologicznego, jak to ma miejsce w wielu krajach rozwiniętych (Otero *et al.* 2019).



Ryc. 9. Całkowite dobowe zużycie energii i dobowe zapotrzebowanie energetyczne u osobników gatunku *Homo sapiens* (wartości przybliżone, z różnych źródeł; <https://ourworldindata.org/>)

W odróżnieniu od archaicznych sinic, które bezpośrednio wykorzystywały energię światła słonecznego, *Homo sapiens* korzysta głównie z zasobów zredukowanych związków węgla, zdeponowanych przez fotoautotrofy z poprzednich epok geologicznych. Energię pozyskuje przez utlenianie tych związków, zmieniając skład atmosfery i powierzchniowych warstw oceanów przez eksport ogromnych ilości dwutlenku węgla –

podobnie jak sinice zrobiły to z tlenem. Skutkiem jest ocieplenie klimatu i zakwaszenie wód, a w dalszej konsekwencji – redukcja liczebności, wymieranie i zmiana składu gatunkowego wszystkich ekosystemów na Ziemi. To drugi (czy trzeci) w historii życia na Ziemi przykład sporego – a może nawet wielkiego – wymierania, spowodowanego przez żywe organizmy, a nie katastrofę abiotyczną. Sinicom to też zaszkodziło, chociaż po milionach lat otwarło drogę do niebywałych sukcesów ewolucyjnych i wzrostu różnorodności biosfery.

Jak dotąd, mimo zmian w środowisku i wymierania innych gatunków spowodowanego przez *Homo sapiens*, populacja tego gatunku rośnie wykładniczo (Roser *et al.* 2013), właśnie przekroczyła 8 mld osobników. Skoro liczebność populacji rośnie, a nie maleje, to według kryteriów IUCN nie może być mowy o zagrożeniu tego gatunku. Jednak w ciągu ostatnich około 300 lat nastąpiło spowolnienie tempa wzrostu populacji. Statystycy opracowujący te dane zwykle prognozują dalszy wzrost populacji *Homo sapiens* w postaci gładkich krzywych – spadającego rocznego tempa przyrostu i coraz wolniejszego wzrostu liczebności populacji do osiągnięcia asymptoty około 11 mld w 2100 r. (np. Roser *et al.* 2013). To optymistyczna prognoza. Każdy, kto brał udział w ćwiczeniach z ekologii – jako student albo nauczyciel – dobrze pamięta, że eksperymentalne populacje najpierw rosną wzdłuż gładkiej funkcji wykładniczej, ale potem nie stabilizują swojej liczebności pod asymptotą (jak przewiduje naiwne równanie logistyczne), tylko wchodzą w oscylacje, następują chaotyczne wzrosty i załamania liczebności, niekiedy aż do całkowitego wymarcia. Przy wysokiej liczebności, to znaczy wysokim zagęszczeniu populacji, musi dochodzić do konkurencji wewnątrzgatunkowej o coraz mniej dostępne zasoby, do antagonistycznych interakcji z subpopulacjami tego samego gatunku, z gatunkami drapieżnymi, pasożytami, powodującymi epidemie, i tak dalej. Trudno przewidzieć, jak będzie przebiegała dynamika gatunku *Homo sapiens*, ale jego całkowite wymarcie w ciągu najbliższych tysięcy lat wydaje się mało prawdopodobne. To bardzo liczny gatunek, zdolny do przeżycia i rozrodu w prawie każdych warunkach klimatycznych, do korzystania z różnych pokarmów, tak że nawet przy znacznej redukcji liczebności współczesnej populacji (spowodowanej np. użyciem reakcji termojądrowych w konfliktach między subpopulacjami), ani nawet przy radykalnych zmianach warunków środowiska, gatunek ten, w sensie biologicznym, przetrwa (zmiany komfortu życia różnych populacji *Homo sapiens*, które przetrwają zahamowanie wzrostu lub redukcję globalnej populacji to osobny temat, który tu pomijamy).

Gatunek *Homo sapiens* przetrwa, ale nie będzie żył wiecznie. Życie na Ziemi trwa od prawie czterech miliardów lat. Ile jeszcze potrwa? Słońce jest gwiazdą dość długowieczną, ale stale wzrasta natężenie jego promieniowania, a więc ogrzewanie Ziemi. Za około 6,5 mld lat skończy się Słońcu zapas termojądrowego paliwa, co spowoduje szybkie przemiany (mniejsza o astrofizyczne szczegóły, co do których wciąż trwają spo-

ry; Hecht 1994, Rybicki, Denis 2001) – Słońce stanie się czerwonym olbrzymem, temperatura powierzchni Ziemi osiągnie 1500° C – czyli o przetrwaniu śladów życia nie będzie mowy. Ale już wcześniej, wskutek wzrostu natężenia promieniowania słonecznego, temperatura na Ziemi wzrośnie, co przyspieszy wietrzenie skał krzemianowych, które pochłoną CO₂ i za około jeden miliard lat unicestwi fotosyntezę tlenorodną (dzisiejsze kłopoty z nadmiarem CO₂ to, w skali czasu trwania życia na Ziemi, chwilowy epizod). Za około półtora miliarda lat temperatura powierzchni Ziemi może osiągnąć 50° C. Może przetrwają beztlenowe bakterie i archeony w głębinach oceanu i litosfery, ale za 2,5 mld lat Ziemia będzie całkowicie wysterylizowana. Zgodnie z prognozami astrofizyków życie na Ziemi ma już za sobą 3/4 – a może aż 4/5 swojego czasu.

Bibliografia

- Aberhan M., Kiessling W., *Phanerozoic Marine Biodiversity: A Fresh Look at Data, Methods, Patterns and Processes*, [w:] *Earth and Life, International Year of Planet Earth*, J.A. Talent (ed.), Berlin 2012, Springer Science+Business Media B.V. s. 3–22.
- Aloy J., *Dynamics of origination and extinction in the marine fossil record*. PNAS 2008, 105, s. 11536–11542.
- Aloy J, Aberhan M., Bottjer D.J., Foote M., Fürsich F.T., Harries P.J., Hendy A.J.W., Holland S.M., Ivany L.C., Kiessling W., Kosnik M.A., Marshall C.R., McGowan A.J., Miller A.I., Olszewski T.D., Patzkowsky M.E., Peters S.E., Villier L., Wagner P.J., Bonuso N., Borkow P.S., Brenneis B., Clapham M.E., Fall L.M., Ferguson C.A., Hanson V.L., Krug A.Z., Layout K.M., Leckey E.H., Nürnberg S., Powers C.M., Sessa J.A., Simpson C., Tomašových A., Vissaggi C.C., *Phanerozoic Trends in the Global Diversity of Marine Invertebrates*. Science 2008, 321 (4), s. 97–100.
- Antonelli A., *The rise and fall of Neotropical biodiversity*. Botanical Journal of the Linnean Society 2022, 199, s. 8–24.
- Bar-On Y. M., Phillips R., Milo R., *The biomass distribution on Earth*. PNAS 2018, 201711842, <http://www.pnas.org/content/115/25/6506>.
- Benson R.B.J., Butler R., Close R.A., Saupe E., Rabosky D.L., *Biodiversity across space and time in the fossil record*. Current Biology 2021, 31 (19), s. R1225–R1236.
- Cermeño P., García-Comas C., Pohl A., Williams S., Benton M.J., Chaudhary C., Le Gland G., Müller R.D., Ridgwell A., Vallina S.M., *Post-extinction recovery of the Phanerozoic oceans and biodiversity hotspots*. Nature 2022, 607, s. 507–511.
- Cowie R.H., Bouchet P., Fontaine B., *The sixth mass extinction: fact, fiction or speculation?* Biol. Rev. 2022, 97, s. 640–663.
- Ellis E.C., Goldewijk K.K., Siebert S., Lightman D., Ramankutty N., *Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000*. Global Ecology and Biogeography 2010, 19 (5), s. 589–606.
- Ellis E.C., Gauthier N., Goldewijk K.K., Bird R.B., Boiving N., Díaz S., Fuller D.Q., Gill J.L., Kaplan J.O., Kingston N., Locke H., McMichael C.N.H., Ranco D., Rick T.C., Shaw M.R., Stephens L., Jens-Christian Svenning J.-C., Watson J.E.M., *People have shaped most of terrestrial nature for at least 12,000 years*. PNAS 2021, 118 (17), e2023483118, <https://doi.org/10.1073/pnas.2023483118>.

- Fields B.D., Melott A.L., Ellis J., Ertel A.F., Fry B.J., Lieberman B.S., Liu Z., Miller J.A., Thomas B.C., *Supernova triggers for end-Devonian extinctions*. PNAS 2020, 117 (35), s. 21008–21010.
- Ghielmi S., Menegon, M., Marsden S. J., Laddaga L., Ursenbacher S., *A new vertebrate for Europe: the discovery of a range restricted relict viper in the western Italian Alps*. Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research 2016, 54(3), s. 161–173.
- Głowaciński Z. (red.), *Polska czerwona księga zwierząt. Kręgowce*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa 2001.
- Głowaciński Z., Nowacki J. (red.), *Polska czerwona księga zwierząt. Bezkręgowce*. Instytut Ochrony Przyrody PAN w Krakowie, Akademia Rolnicza im. A. Cieszkowskiego w Poznaniu, 2004.
- Hecht J., *Science: Fiery future for planet Earth*. New Scientist 1994, 1919, s. 14.
- Holland H.D., *The oxygenation of the atmosphere and oceans*. Phil. Trans. R. Soc. B 2006, 361, s. 902–915.
- Holland S.M., Sclafani J.A., *Phanerozoic diversity and neutral theory*. Paleobiology 2015, 41 (3), s. 369–376.
- Irhram M., Haryoko T., Shakya S.B., Mitchell S.L., Burner R.C., Bocos C., Eaton J.A., Rheindt F.E., Suparno S., Sheldon F.H., Prawiradilaga D.M., *Description of two new bird species from the Meratus Mountains of southeast Borneo, Indonesia*. Journal of Ornithology 2022, 163, s. 575–588.
- Isbell F., Balvanera P., Mori A.S., He J.-S., Bullock J.M., Regmi G.R., Seabloom E.W., Ferrier S., Sala O.E., Guerrero-Ramírez N.R., Tavella J., Larkin D.J., Schmid B., Outhwaite C.L., Pramual P., Borer E.T., Loreau M., T.C. Omotoriogun, Obura D.O., Anderson M., Portales-Reyes C., Kirkman K., Vergara P.M., Clark A.T., Komatsu K.J., Petchey O.L., Weiskopf S.R., Williams L.J., Collins S.L., Eisenhauer N., Trisos C.H., Renard D., Wright A.J., Tripathi P., Cowles J., Byrnes J.E.K., P.B., Purvis A., Sharip Z., O'Connor M.I., Kazanski C.E., Haddad N.M., Soto E.H., Dee L.E., Díaz S., Zirbel C.R., Avolio M.L., Wang S., Ma Z., Liang J., Farah H.C., Johnson J.A., Miller B.W., Hautier Y., Smith M.D., Knops J.M.H., Myers B.J.E., Harmáčková Z.V., Cortés J., Harfoot M.B. J., Gonzalez A., Newbold T., Oehri J., Mazón M., Dobbs C., Palmer M.S., *Expert perspectives on global biodiversity loss and its drivers and impacts on people*. Front. Ecol. Environ. 2022, doi:10.1002/fee.2536
- IUCN 2022. *The IUCN Red List of Threatened Species*. Version 20221. <https://www.iucnredlist.org>
- Każmierczakowa R., Zarzycki K., Mirek Z., *Polska Czerwona Księga Roślin. Paprotniki i rośliny kwiatowe*. Instytut Ochrony Przyrody PAN, Kraków 2014.
- Knoll A.H., *Ziemia. Cztery miliardy lat w ośmiu rozdziałach*. CCP, Kraków 2022.
- Kolbert E., *Szóste wymieranie. Historia nienaturalna*. W.A.B. Warszawa 2016.
- Köhler J., Vieites D.R., Bonett R.M., García F.H., Glaw F., Steinke D., Vences M., *New Amphibians and Global Conservation: A Boost in Species Discoveries in a Highly Endangered Vertebrate Group*. BioScience 2005, 55 (8), s. 693–696.
- Meltzer D.J., *Overkill, glacial history, and the extinction of North America's Ice Age megafauna*. PNAS 2020, 117 (46), s. 28555–28563.
- Mora C., Tittensor D.P., Adl S., Simpson A.G.B., Worm B., *How many species are there on earth and in the ocean?* PLoS Biology 2011, 9, s. 1–8.
- Otero I., Farrell K.N., Pueyo S., Kallis G., Kehoe L., Haberl H., Plutzer C., Hobson P., García-Márquez J., Rodríguez-Labajos B., Martin J.-L., Erb K.-H., Schindler S., Nielsen J., Skorin

- T., Settele J., Essl F., Gómez-Baggethun E., Brotons L., Rabitsch W., Schneider F., Pe'er G., *Biodiversity policy beyond economic growth*. Conservation Letters 2020, 13, e12713 <https://doi.org/10.1111/conl.12713>
- Pereira H.M., Navarro L.M., Martins I.S., *The Bad, the Good, and the Unknown*. Annu. Rev. Environ. Resour. 2012, 37, s. 25–50.
- Raup D.M., Sepkoski J.J. Jr., *Mass extinctions in the marine fossil record*. Science 1982, 215 (4539), s. 1501–1503.
- Raven P.H., Wagner D.L., *Agricultural intensification and climate change are rapidly decreasing insect biodiversity*. PNAS 2021, 118 (2), e2002548117 <https://doi.org/10.1073/pnas.2002548117>
- Roser M., Ritchie H., Ortiz-Ospina E., Rod s-Guirao L., *World Population Growth*. Published online at OurWorldInData.org 2013, <https://ourworldindata.org/world-population-growth>.
- Rybicki K.R., Denis C., *On the Final Destiny of the Earth and the Solar System*. Icarus 2001, 151 (1), s. 130–137.
- Sánchez-Baracaldo P., Cardona T., *On the origin of oxygenic photosynthesis and Cyanobacteria*. New Phytologist 2020, 225, s. 1440–1446.
- Sánchez-Bayo F., Wyckhuys K.A.G., *Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers*. Biological Conservation 2019, 232, s. 8–27.
- Schachat S.R., Labandeira C.C., *Are insects heading toward their first mass extinction? Distinguishing turnover from crises in their fossil record*. Annals of the Entomological Society of America 2021, 114 (2), s. 99–118.
- Sepkoski J.J. Jr., *Ten years in the library: new data confirm paleontological patterns*. Paleobiology 1993, 19 (1), s. 43–51.
- Sepkoski J.J. Jr., *Crustacean biodiversity through the marine fossil record*. Contribution to Zoology 2000, 69 (4), s. 213–222.
- Tang Q., Zhang M., Li C., Yu M., Li L., *The chemical compositions and abundances of volatiles in the Siberian large igneous province: Constraints on magmatic CO₂ and SO₂ emissions into the atmosphere*. Chemical Geology 2013, 339 (15), s. 84–91.
- Thaler D.S., *Is global microbial biodiversity increasing, decreasing, or staying the same?* Front. Ecol. Evol. 2021, 9: 565649. doi: 10.3389/fevo.2021.565649
- Tikhonenkov D.V., Mikhailov K.V., Gawryluk R.M.R., Belyaev A.O., Mathur V., Karpov S.A., Zagumyonnyi D.G., Borodina A.S., Prokina K.I., Mylnikov A.P., Aleoshin V.V., Keeling P.J., *Microbial predators form a new supergroup of eukaryotes*. Nature 2022, <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05511-5>
- Weiner J. *Życie i ewolucja biosfery*. PWN, Warszawa 2020.
- Weiner J., Weiner J. 3., *Jak powstało życie na Ziemi*. CCP. Kraków 2023.
- Zinger L., Taberlet P., Schimann H., Bonin A., Boyer F., De Barba M., Gaucher P., Gielly L., Giguet-Covex C., Iribar A., Rejou-Mechain M., Raye G., Rioux D., Schilling V., Tymen B., Viers J., Zouiten C., Thuiller W., Coissac E., Chave J., *Body size determines soil community assembly in a tropical forest*. Molecular Ecology 2019, 28 (3), s. 528–543.

Zmiany r wnnorodno ci biosfery: dawniej, dzi s, jutro

Życie na Ziemi jest procesem realizowanym przez miliardy organizmów, należących do ogromnej liczby gatunków. Od powstania życia do dzi s liczba gatunków stale rośnie, ale proces ten jest przerywany g bokimi kryzysami (, Wielkimi

Wymieraniami”), kiedy liczba gatunków gwałtownie maleje. Jednak po stosunkowo krótkim czasie – licząc w milionach lat – liczba gatunków wraca do poprzedniej wysokości i nadal rośnie, aż do następnej katastrofy. Kiedy na Ziemi pojawił się gatunek *Homo sapiens*, zastał największą różnorodność biotyczną w historii Ziemi, ale w bardzo krótkim czasie – po szybkim wzroście jego populacji – różnorodność zaczęła znowu spadać. Czy jesteśmy świadkami początków kolejnego wielkiego wymierania? Jeżeli tak, to jakie mogą być tego konsekwencje dla tych gatunków, które przetrwają? Czy gatunek *Homo sapiens* też jest zagrożony? A życie na Ziemi? Łatwo postawić takie pytania, ale trudno na nie odpowiedzieć.

Słowa kluczowe: bioróżnorodność, Wielkie Wymierania, ewolucja

Changing biodiversity: formerly, today, tomorrow

Life on Earth is a process carried out by billions of organisms belonging to a huge number of species. From the beginning of life to the present day, the number of species steadily increases, but the process is interrupted by deep crises (“Great Extinctions”) as the number of species rapidly declines. However, after a relatively short period of time – millions of years – the number of species returns to their previous heights and continues to rise until the next catastrophe. When the species *Homo sapiens* appeared on Earth, it found the greatest biotic diversity in the history of the Earth, but in a very short time – after its rapid population growth – the diversity began to decline again. Are we witnessing the beginning of another great extinction? If so, what would be the consequences for those species that survive? Is *Homo sapiens* also endangered? And life on Earth? Questions easy to ask, but difficult to answer.

Key words: biodiversity, Great Extinctions, evolution

