

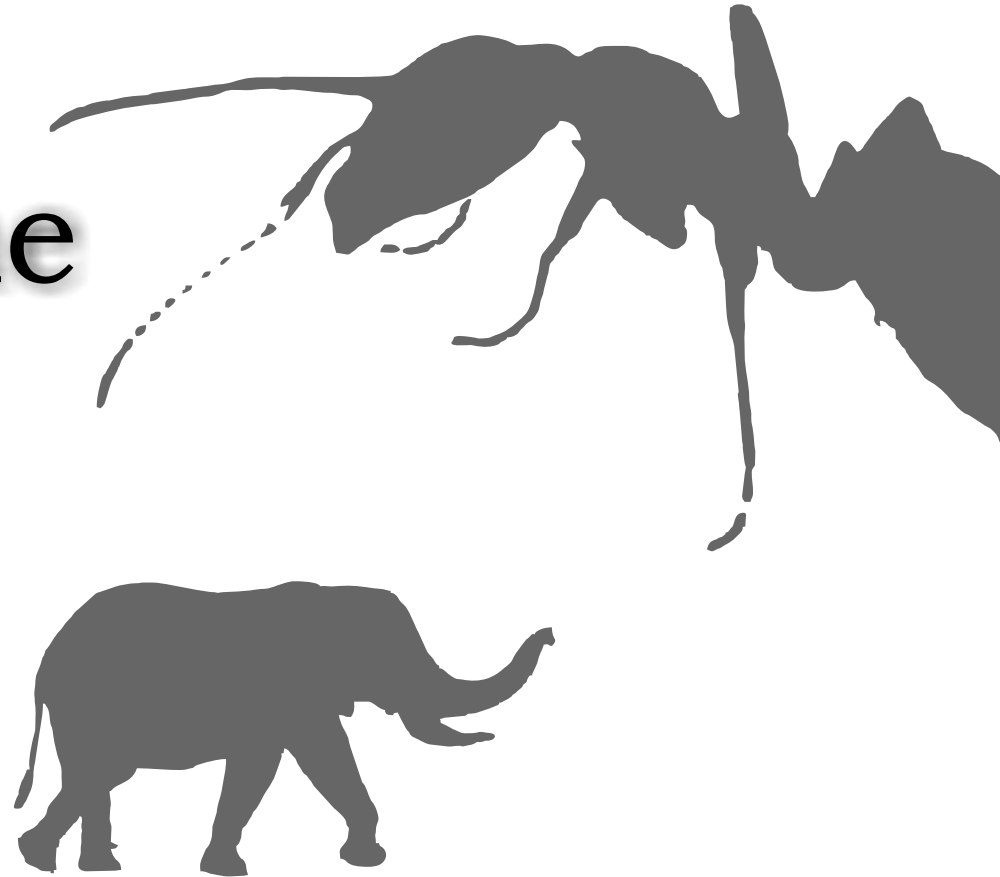
# Rozmiar; dlaczego jedne zwierzęta są małe a inne duże?



**Jan Marcin Węśławski & Dag O. Hessen**



**Rozmiar;**  
dlaczego jedne  
zwierzęta są  
małe a inne  
duże?



**Jan Marcin Węśławski & Dag O. Hessen**

# DWARF



Zmniejszające się rozmiary fauny – powszechna reakcja na ogrzewanie się Arktyki?

Projekt ufundowany przez Norweski Mechanizm Finansowy 2013, nr DZP/POL-NOR/201992/2014

## podstawowa informacja

Rozmiar ciała jest podstawową jednostką biologiczną, związaną ściśle z procesami życiowymi i właściwościami środowiska. Zmniejszenie się rozmiarów ciała jest uważane za trzecią powszechną, biologiczną odpowiedź na ocieplenie klimatu (na równi ze zmianami w cyklach biologicznych i rozmieszczeniem gatunków). Głównym celem tego projektu było przetestowanie hipotezy, że podwyższone temperatury będą powodowały zmniejszenie rozmiarów ciała u różnych grup arktycznej fauny. Selekcja naturalna związana z mniejszymi rozmiarami ciała w ogrzewającej się Arktyce będzie powodowała daleko idące zmiany w funkcjonowaniu ekosystemów, zwłaszcza w sieciach troficznych i obiegu węgla.

## uczestnicy

Instytut Oceanologii PAN

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Norwegian Institute for Nature Research (NINA), Tromsø



University of Oslo (UiO)

Akvaplan-niva (APN), Tromsø



## kierownik projektu

profesor dr hab. Maria Włodarska-Kowalczyk IO PAN

## opracowanie graficzne i rysunki

Stanisław Węśławski

## wydawca

© Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk, Sopot 2017

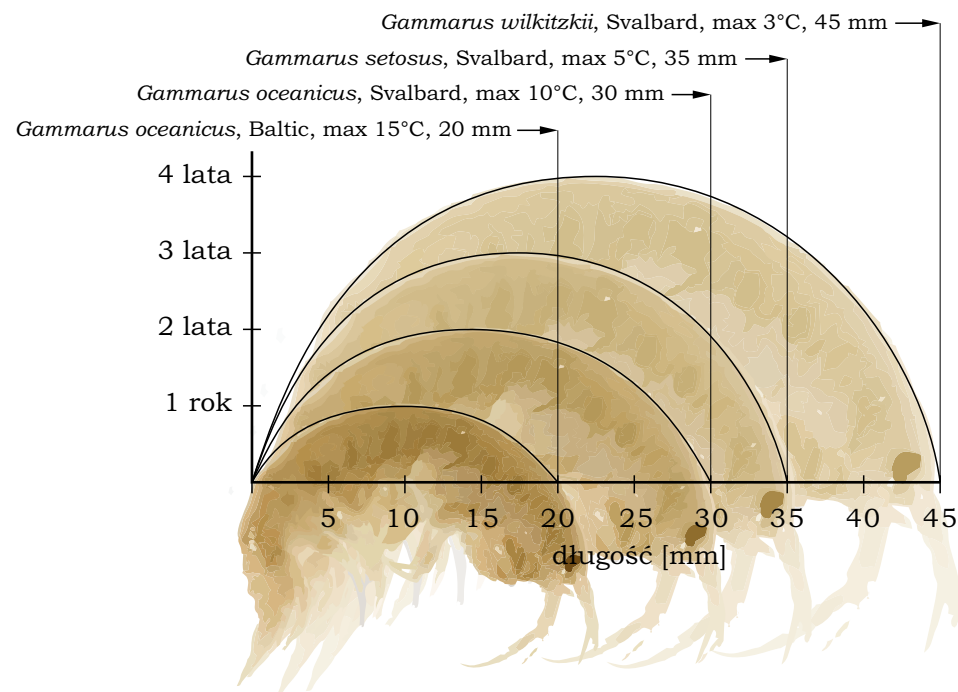
ISBN 978-83-941037-8-1

publikacja dostępna na [www.iopan.gda.pl/projects/Rozmiar/](http://www.iopan.gda.pl/projects/Rozmiar/)

## Wstęp

Rozmiary organizmów są niezwykle zmienne – ale dlaczego? Rozmiar jest jedną z najważniejszych cech gatunku i osobnika a ma ważne konsekwencje dla ekologii i ewolucji. Rozmiar decyduje w ogromnym stopniu kto kogo zjada, ale jest też związany z kosztami. Jeżeli jest się dużym, ma się mniej wrogów, tyle że duże ciało potrzebuje wiele energii. Rozmiar ciała może się również zmieniać w obrębie tego samego gatunku. Losy osobnika, dostępność do pokarmu, warunki środowiskowe, określają czy osobnik urośnie większy, czy pozostanie mały. W skali zbiorowiska gatunków, proporcja pomiędzy małymi i dużymi gatunkami mówi o różnicach w wykorzystaniu zasobów. Ponieważ indywidualny rozmiar jest zmienny i zależy od czynników środowiska, będzie zmieniał się wraz z ich zmianą. Z powodu globalnego wzrostu temperatury, coraz ważniejsze staje się zrozumienie wynikających z tego zmian w ekosystemie, w tym zmian wielkości organizmów.

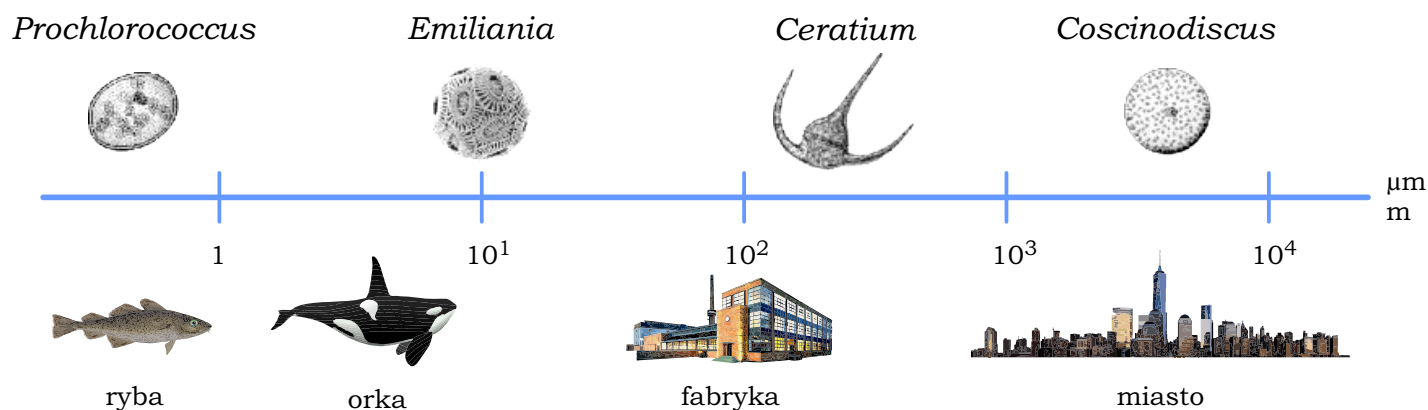
Ekosystemy arktyczne podlegają w tej chwili gwałtownemu ociepleniu, co dotyczy również środowiska morskiego. W tej książeczce przyjrzymy się fascynującemu zjawisku zmian rozmiarów ciała u zwierząt. Specjalną uwagę zwrócimy na zmienność związaną z przesuwaniem się gatunku z południa na północ, omówimy główne czynniki odpowiedzialne za rozmiar organizmu i prawa, które tym rządzą i ich związek ze zmianą klimatu.



Rys. 1 Pokrewne gatunki są zwykle mniejsze w obszarach cieplejszych i osiągają większe rozmiary w wodach zimnych. Tu przykład skorupiaków z rodzaju - *Gammarus*

## Rozmiary organizmów

Zwierzęta i rośliny mogą być zbudowane z jednej komórki lub są złożone z ich wielkiej ilości. Wydaje się nam, że organizmy jednokomórkowe są wszystkie jednakowo małe i taka jest generalna prawda, ale w obrębie tych miniaturowych organizmów istnieje niesłychana różnorodność rozmiarów. Na przykład najmniejsze sinice fotosyntetyzujące ( $0,2 \mu\text{m}$ , gdzie  $1 \mu\text{m} = 0,001 \text{ mm}$ ) różnią się rozmiarami od największego, osiadłego jednokomórkowego glonu (*Valonia ventriculosa* o średnicy  $5 \text{ cm}$ ) o 250 000 razy. W obrębie fitoplanktonu, największe komórki mogą osiągać rozmiar  $2 \text{ mm}$ , co daje różnicę ze wspomnianymi najmniejszymi komórkami aż 10 000 razy. Organizmy wielokomórkowe również osiągają imponującą rozpiętość rozmiarów – od małego wrotka o długości  $0,3 \text{ mm}$  do wala błękitnego ( $30 \text{ m}$ ), różnica w rozmiarach sięga 100 000 razy. Wprawdzie wszystkie wieloryby są wielkie a wszystkie widłonogie skorupiaki małe, ale w obrębie każdej z tych grup rozmiary gatunków różnią się 10 krotnie. Wśród jednej grupy taksonomicznej – np ryb, rozrzut rozmiarów może być jeszcze większy, od karłowatych rybek o rozmiarach kilku mm, do rekinów wielorybich o długości do  $12 \text{ m}$ . Co więc powoduje, że zwierzęta i rośliny mają tak bardzo zróżnicowane rozmiary? Czy jest na to jedno wyjaśnienie, czy wiele różnych? A przede wszystkim czy naprawdę znamy odpowiedź? Wszystkie organizmy zostały ukształtowane przez ewolucję, więc prosta odpowiedź, że rozmiar jest adaptacją do wymogów życia w środowisku, oznacza również, że rozwiązywanie podstawowych zadań życiowych jakimi jest odżywianie, przetrwanie i reprodukcja, może następować na wiele różnych sposobów.



Rys. 2 Zakres różnic wielkości pomiędzy jednokomórkowymi (powyżej osi) i wielokomórkowymi organizmami oraz wielkimi obiektami (poniżej osi).

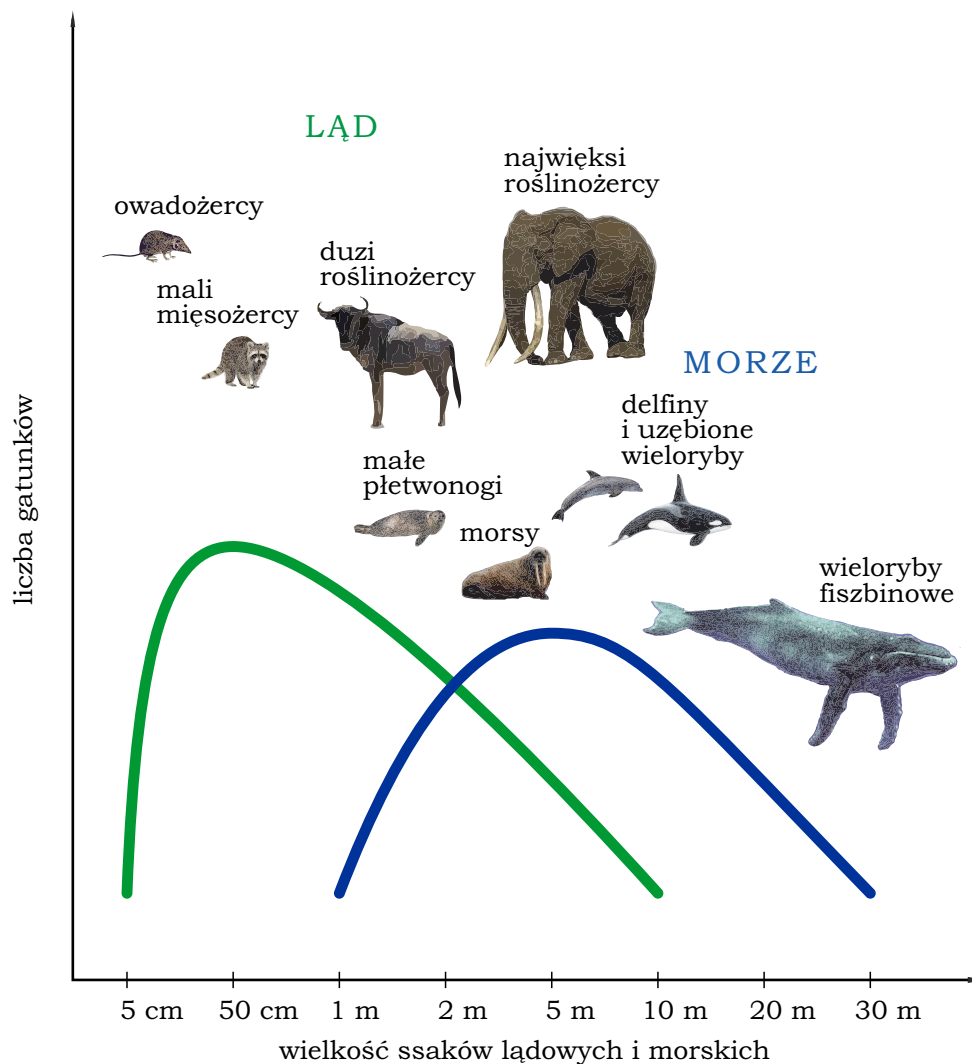
Tabela 1. Największe i najmniejsze organizmy w niektórych grupach systematycznych.

<b>Jednostka</b>	<b>Skala metryczna</b>	<b>Przykładowy organizm</b>
Dziesiątki metrów	10	Wieloryby
Metry	1	Płetwonogie, ryby
Centymetry	$10^{-2}$	Skorupiaki i owady
Milimetry	$10^{-3}$	Mały bentos i plankton
Mikrony	$10^{-6}$	Meiofauna
Nanometry	$10^{-9}$	Mikroplankton, wiciowce
Pikometry	$10^{-12}$	Pikoplankton, bakterie, sinice

## Jak rozkładają się rozmiary ciała wśród lądowych i wodnych zwierząt?

Zakres rozmiarów ciała u zwierząt stałocieplnych (ptaków i ssaków potrafiących utrzymać stałą temperaturę wewnętrzną) jest różny u ich przedstawicieli żyjących w wodzie i na lądzie. Zwierzęta wodne są duże lub bardzo duże – najmniejsze wodne zwierzęta to wydra morska i foka hawajska o długości 1 m i wadze kilkunastu kg. Zwierzęta lądowe dla odmiany są najczęściej małe – dominują gatunki wielkości gryzoni lub owadożernych, z najmniejszym znanym ssakiem – ryjówką etruską o wadze zaledwie 2 g (Tabela 2).

Głównym powodem tej różnicy jest niezwykła cecha wody – jej pojemność i przewodność cieplna. W odróżnieniu od powietrza wodę jest trudno ogrzać i oddaje ona ciepło bardzo powoli. Oznacza to, że utrata ciepła w wodzie jest 25-krotnie większa niż w powietrzu, aby utrzymać swoją temperaturę ciała w wodzie trzeba być doskonale izolowanym (np. przez warstwę tłuszczu jak u fok) i najlepiej mieć duże rozmiary, aby ograniczyć ucieczkę ciepła z organizmu przez powierzchnię ciała. Te rozwiązanie przyjęły wielkie ssaki morskie – płetwonogie, delfiny i wieloryby. Jedną z niewielu ryb, która potrafi utrzymać wewnętrzną temperaturę ciała jest tuńczyk zamieszkujący ciepłe, tropikalne wody, stałocieplność jest mu potrzebna do utrzymania dużej prędkości – to można osiągnąć tylko przy dużych rozmiarach ciała. Na lądzie, małe ssaki radzą sobie dobrze, szczególnie w ciepłym klimacie, tak więc ląd zdominowany jest przez małe gatunki (Rys. 3).

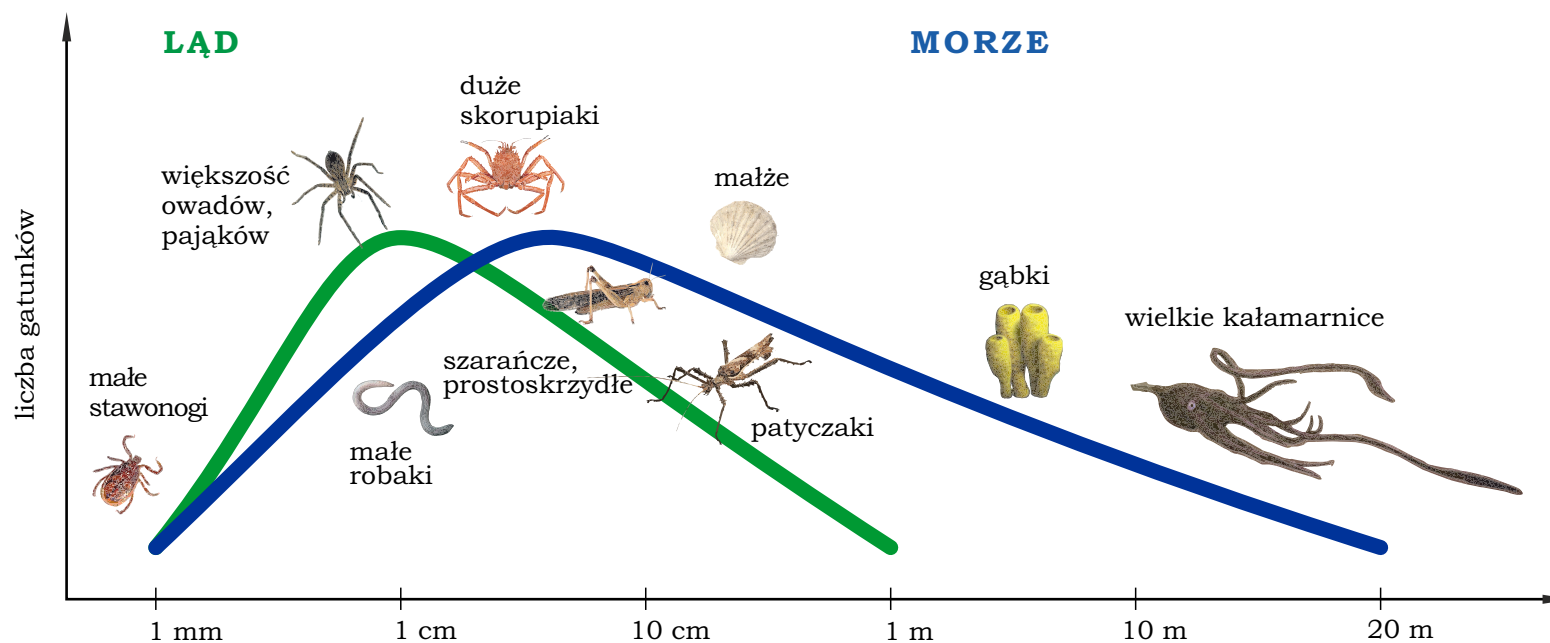


Rys. 3 Rozkład wielkości ssaków lądowych i morskich.



Minimalne rozmiary ciała u stałocieplnych zwierząt są kontrolowane przez konieczność zatrzymania uciezki ciepła, natomiast ograniczenia maksymalnych rozmiarów ciała są różne u lądowych i wodnych organizmów.

Ważną cechą środowiska wodnego jest to, że ujmuje wagi, co oznacza, że ciężkie ciało staje się możliwe do uniesienia. Grawitacja ogranicza maksymalne rozmiary zwierząt lądowych – nie można mieć miękkiego ciała jak wielka kałamarnica i żyć na lądzie. Wielkie ciało potrzebuje siły wyporu wody, aby utrzymać drożność naczyń krwionośnych, przewodu pokarmowego i układu oddechowego oraz zachować zdolność poruszania się. Szkielet wewnętrzny jest najlepszym rozwiązaniem do pewnej granicy (słonie), przy większych rozmiarach właściwym środowiskiem staje się woda (wieloryby). Największe dinozaury lądowe prowadziły najprawdopodobniej ziemnowodny tryb życia.



Rys. 4 Rozkład wielkości lądowych i wodnych bezkręgowców

Table 2. Najmniejsze i największe zwierzęta wybranych gatunków

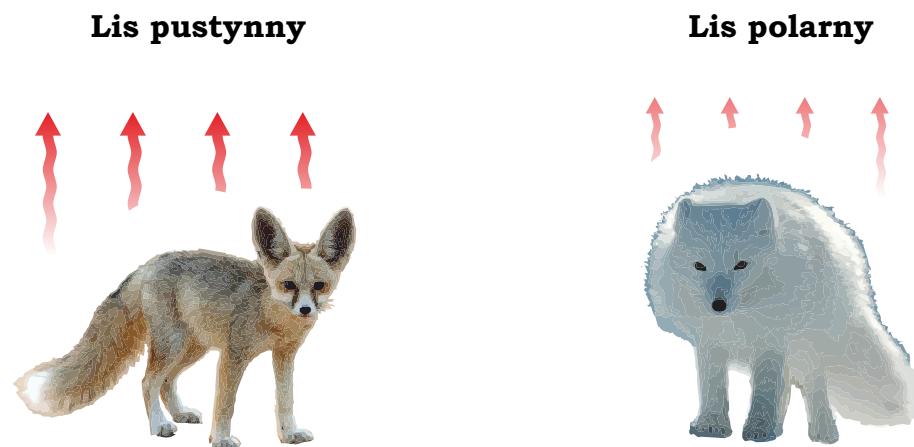
<b>Grupa</b>	<b>Najmniejsze gatunki</b>	<b>Wielkość</b>	<b>Obszar geograficzny, środowisko</b>	<b>Największe gatunki</b>	<b>Wielkość</b>	<b>Obszar geograficzny, środowisko</b>
Ryby	<i>Paedocypris progenetica</i>	8 mm	Indonezja, ciepła, świeża woda	<i>Mola mola</i> (Samogłów)	4 m długości, 2300 kg	Otwarty ocean tropikalny
Ssaki	<i>Suncus etruscu</i> (Ryjówka etruska)	2 g	Sucho, subtropiki	<i>Balaenoptera musculus</i> (Płetwal błękitny)	30 m, 190 ton	Otwarty ocean
Skorupiaki	<i>Stygotantulus stocki</i> (obunóg)	0.1 mm	Zewnętrzny pasożyt, wybrzeże Atlantyku	<i>Pseudocarcinus gigas</i> (Tasmański krab olbrzymi)	13 kg, 50 cm	Wybrzeże Australii
Małże	<i>Truncatella</i> sp. (muszlowiec)	2 mm	Tropikalne wybrzeże Atlantyku	<i>Architeuthis dux</i> (Kałamarnica olbrzymia)	18 m, 900 kg	Głębiny, otwarty ocean

Kiedy przyjrzymy się bezkręgowcom (zwierzętom posiadającym szkielet zewnętrzny – pancerz, skorupę, muszlę lub obywającym się bez nich) okaże się, że niemal wszystkie są zaskakująco małe. Największy owad ma tylko 60 cm długości, a najcięższy lądowy stawonóg – krab kokosowy potrafi osiągnąć imponującą wagę 4 kg, pozostałe bezkręgowce na lądzie są jednak małe – od kilku milimetrów do kilku centymetrów (Rys. 4). Powód, dla którego owady nie osiągają rozmiarów psa czy konia jest związany z ograniczeniami fizjologicznymi i mechanicznymi. Siła wyporu wody pomaga w pewnym zakresie, szczególnie w przeciągnięciu grawitacji, więc bezkręgowce morskie mogą być bardzo wielkie – jak kałamarnice olbrzymie (do 20 m długości) czy gąbki (średnica kilku metrów). Największe małże mają około metra średnicy, a największa morska pierścienica ma kilka metrów długości. Największy lądowy bezkręgowiec – australijska dżdżownica olbrzymia jest w rzeczywistości wodnym zwierzęciem, bo żyje w pobliżu rzek, w norach wypełnionych wodą.

### **Fizyczne ograniczenia w rozmiarach organizmów.**

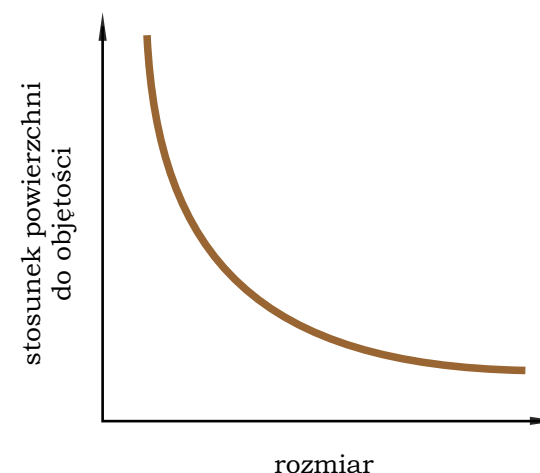
Siła ciężenia na lądzie powoduje problemy u organizmów lądowych – trzeba utrzymać ciało przed zapadnięciem i zachować transport płynów do odległych jego części. Wśród drzew, średnica pnia jest bezpośrednio związana z możliwą do osiągnięcia wysokością – tę zależność rozpoznano już setki lat temu. Wprawdzie najwyższe drzewa mogą utrzymać się pod naporem wiatru dzięki masywnym pniom i systemowi korzeniowemu, to jednak transport wody i biogenów z gleby do szczytu korony pozostaje trudnym problemem i w końcu ograniczeniem dla wzrostu. Anatomia porównawcza wykazuje, że kości i mięśnie dużych i małych zwierząt są bardzo podobne w swojej strukturze i efektywności. Generalnie, objętość mięśni i grubość kości wzrasta proporcjonalnie wraz ze wzrostem zwierzęcia, co oznacza, że kości myszy i słonia są podobne, biorąc pod uwagę różnicę w masie. Ograniczenia wielkości lądowego zwierzęcia są również związane z jego odżywianiem się i sposobem poruszania. Zwierzęta roślinożerne (zjadające trawy i inny pokarm roślinny) mają do dyspozycji wielkie zasoby pokarmu i mogą osiągać duże rozmiary. Ponieważ jednak pokarm roślinny ma niskie wartości energetyczne, roślinożercy muszą jeść niemal bez przerwy oraz potrzebują dużego i efektywnego przewodu pokarmowego. To jeden z powodów, dla których zwierzęta roślinożerne są duże. Dodatkową zaletą dużych rozmiarów jest szansa ucieczki przed drapieżnikiem, choć są tu też ograniczenia wynikające z ilości pokarmu, który można zebrać (słoń potrzebuje około 400 kg paszy dziennie) oraz z wagi. Dla większości wodnych organizmów ciężar ciała nie jest problemem, ponieważ puste przestrzenie ich ciała wypełnione są wodą, która nie jest ściśliwa, więc nie grozi im zaciśnięcie naczyń czy przewodu pokarmowego. Ogromne ciśnienia panujące na największych głębokościach nie przeszkadza organizmom, o ile nie mają gazowych pęcherzy. Wśród gatunków zasiedlających największe głębiny, większość jest mała, co jest efektem małej ilości i niskiej jakości pożywienia docierającego do największych głębi.

Wymiana ciepła jest bardzo ważna w kontekście wielkości zwierzęcia. Utrata ciepła jest związana bezpośrednio z powierzchnią ciała (jako, że ciepło ucieka przez skórę) i jest odwrotnie proporcjonalna do objętości ciała (większe rozmiary oznaczają powolniejszą ucieczkę ciepła). Z tego powodu duże zwierzęta radzą sobie lepiej w zimnym klimacie, a małe jak ryjówki czy kolibry aby zatrzymać ciepło, muszą niemal bez przerwy się odżywiać. Kształt ciała jest również istotny, im bardziej ciało jest zaokrąglone, tym mniejsze straty ciepła, podczas gdy wystające części ciała jak uszy, długie nogi, długa szyja pomagają oddawać ciepło i unikać przegrzewania gatunkom żyjącym w tropikach (porównanie lisa polarnego i pustynnego – Rys. 5).

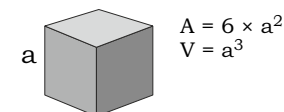


małe smukłe ciało (duża powierzchnia do objętości), szybkie oddawanie ciepła

duże krępe ciało (mały stosunek powierzchni do objętości), ciepło ucieka powoli



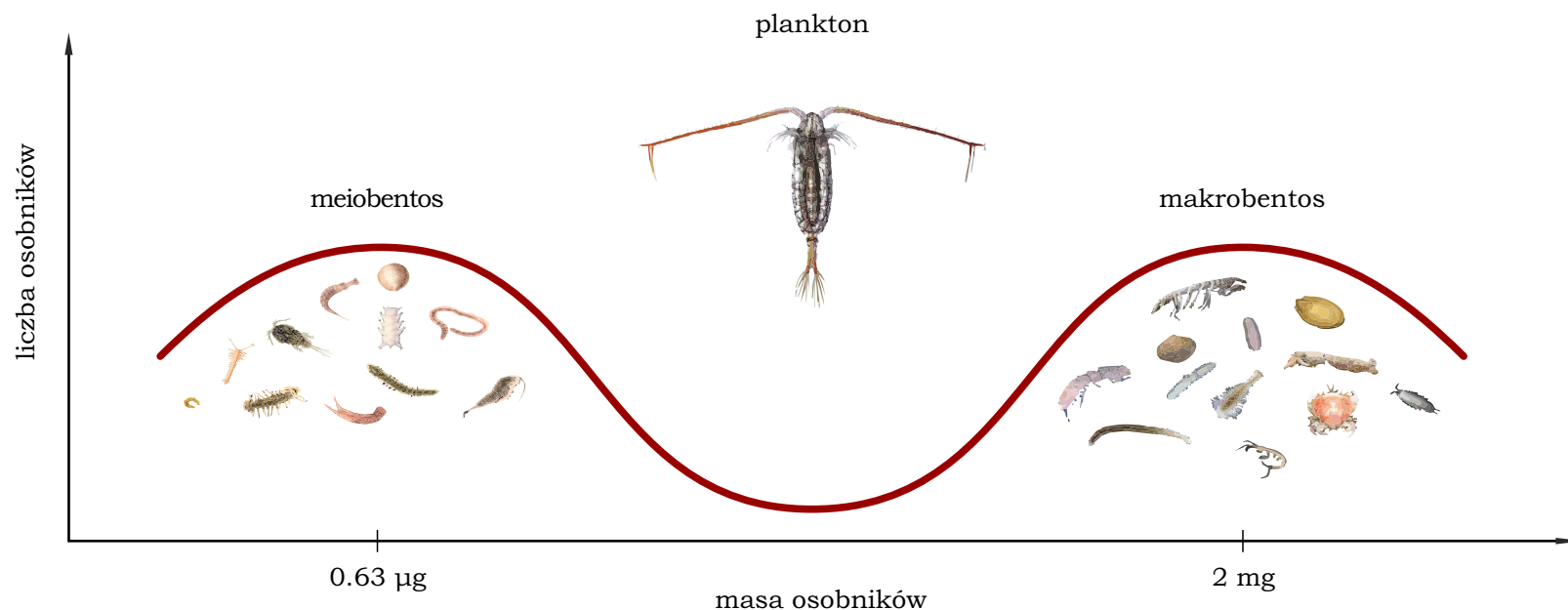
- (A) Powierzchnia wzrasta do kwadratu ( $a^2$ )
- (V) Objętość wzrasta do sześcianu ( $a^3$ )



Rys. 5 Zależność pomiędzy wielkością (powierzchnią i objętością) oraz wymianą ciepła u organizmów stałocieplnych

## Czas i przestrzeń – związek z wielkością organizmu

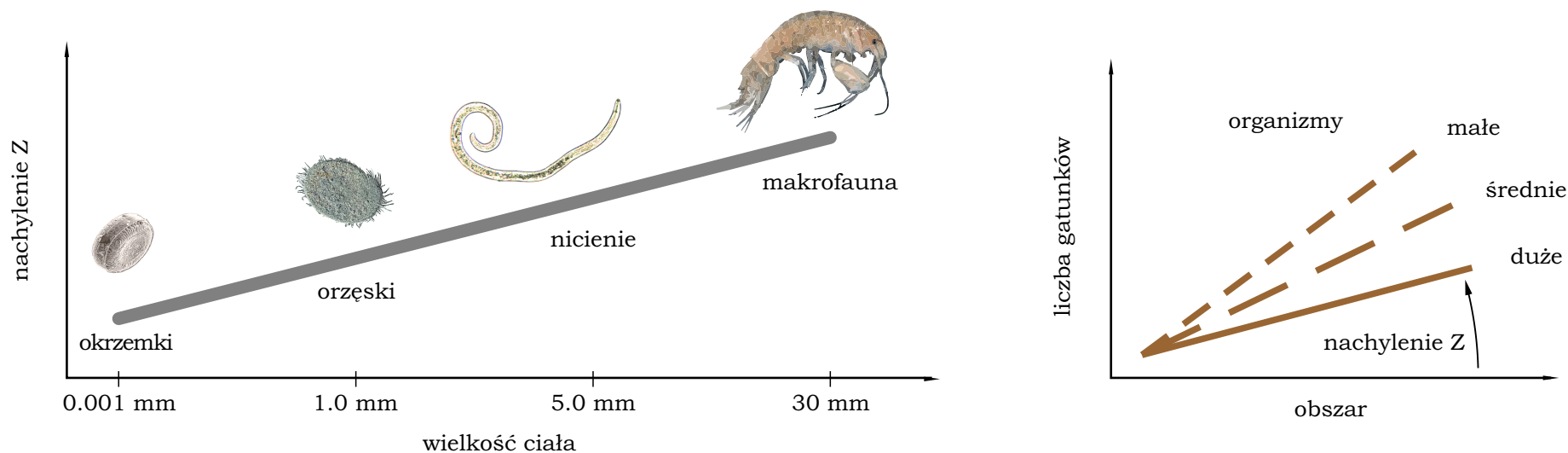
Wszystkie reakcje (np. syntezy biochemicznej) lub procesy (np. tempo dyfuzji) potrzebują czasu, a gdy zachodzą na poziomie komórkowym mogą być niezwykle szybkie – np. przechodzenie soli biogennych przez ściany komórkowe. Wśród dużych organizmów te procesy są zwielokrotnione przez rozmiar ciała – przez drogę, jaką cząsteczka musi pokonać do swojego celu. Im mniejszy jest organizm wodny, tym większą rolę będą odgrywały siły lepkości wody, a mniejszą jego kształt (zwykle owalny lub nieokreślony). Większe organizmy muszą przezwyciężyć gęstość wody i tu opływowe kształty bardzo się przydają. To co wygląda pod mikroskopem jak gwałtowny skok jednokomórkowca w kropli wody, w rzeczywistości jest bardzo powolnym ruchem, w porównaniu do prędkości większego organizmu przemieszczającego się w powietrzu.



Rys. 6 Charakterystyczny rozkład rozmiarów ciała u morskich bezkręgowców. Większość zwierząt planktonowych idealnie pasuje do przerwy pomiędzy dwiema grupami wielkości organizmów żyjących na dnie.

Szybkość poruszania się organizmów dna morskiego jest ściśle zależna od ich rozmiarów, najmniejsze gatunki meiofauny mogą pływać pomiędzy ziarnami piasku, podczas gdy makroorganizmy są wystarczająco silne by poruszać się przemieszczając osad, budując korytarze i kopce. We wszystkich strefach klimatycznych i zakresach głębokości zoobentos morski wykazuje tę samą zależność wielkościową – dwa oddzielone od siebie szczyty liczebności, które odpowiadają organizmom meio i makrofauny (Rys. 6). Przerwę w rozmiarach pomiędzy tymi dwoma grupami wielkościowymi wypełnia mezozooplankton – najliczniejsza grupa organizmów z toni wodnej mórz.

Krzywa przedstawiająca zależność gatunki – obszar, należy do najważniejszych funkcji obrazujących zjawiska ekologiczne – w tym wypadku łączy różnorodność gatunków z obszarem ich występowania. Oznacza, że im większy obszar jest dostępny, tym więcej gatunków będzie mogło się tam znaleźć. Okazuje się jednak, że nachylenie tej krzywej do osi X jest bardzo silnie zależne od wielkości organizmów. Bardzo małe organizmy są szeroko rozmieszczone i znajdziemy je wszędzie, nawet na bardzo małym obszarze, im większe gatunki tym więcej przestrzeni potrzebują i tym trudniej je znaleźć. Największe znane drapieżniki, jak niedźwiedź polarny, mają obszary występowania sięgające setek kilometrów kwadratowych, a wymarły gigant *Tyranosaurus rex* potrzebował prawdopodobnie tysięcy km<sup>2</sup> (Rys. 7).

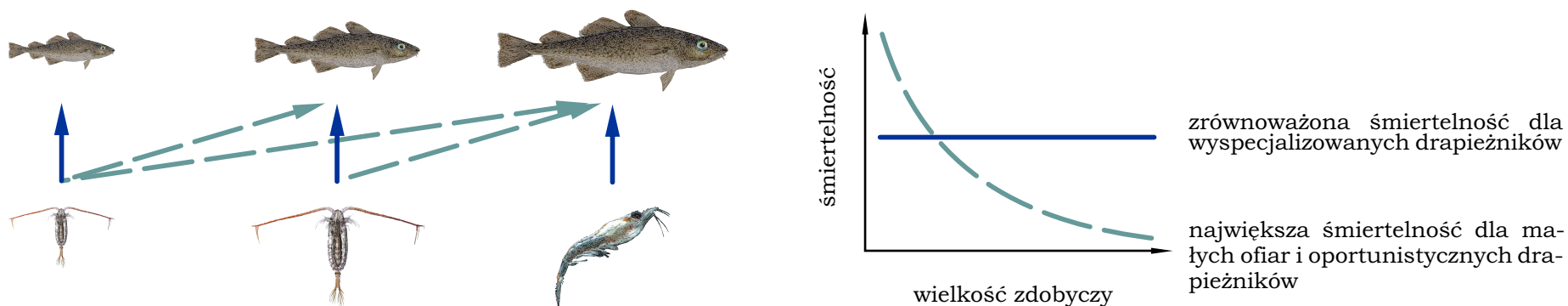


Rys. 7 Krzywa gatunki-areal i jej zależność od rozmiarów organizmu.

## Wielkość zwierzęcia i sieć pokarmowa

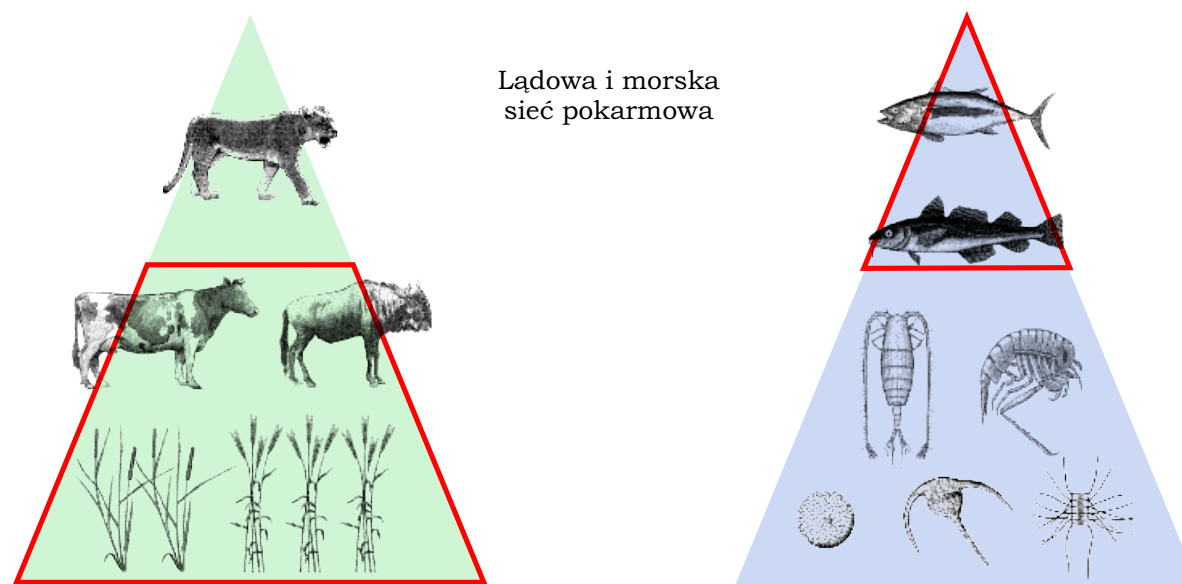
Wielkość zwykle określa los osobnika jako ofiary (zjadanego) lub drapieżnika (tego kto zjada). Większość zwierząt pełni obie te role, ale im większy jest rozmiar, tym mniejsze prawdopodobieństwo, że ktoś inny cię zje (słonie i wielkie wieloryby są mało wrażliwe na drapieżnictwo). Jednakże duże rozmiary są kosztowne, trzeba mieć dużą ilość pokarmu, żeby dostarczyć energii do wielkiego ciała. Wielkość ciała określa również jaki pokarm można zjeść. Skorupiak widłonogi w oceanicznym planktonie połyka w całości mikroskopijne glony, gąsienica zjada tylko części liścia, a słoń całe gałęzie i krzaki.

Wraz ze wzrostem rozmiarów ciała zwiększa się również zakres pokarmu, który można przyjmować. Małe morskie skorupiaki są najczęściej planktonożerne lub odżywiają się bakteriami, im większe – lub starsze, tym bardziej przechodzą na dietę drapieżnika. Ponieważ osobniki dorosłe u wielu gatunków są znacznie większe niż ich potomstwo, oznacza to, że duże osobniki mogą być kanibalami i wraz ze wzrostem ciała rozszerzają swoje możliwości żerowania (niszy ekologicznej). Wielkość drapieżnika i strategia jaką obierze – być oportunistycznym drapieżnikiem, który poluje na każdą zdobycz jaka się nawinie, czy specjalistą – żerować na wybranej grupie rozmiarowej zdobyczy – określa również strukturę populacji ofiar. Gdy przeważają oportuniści, największa presja skierowana jest na średnie ofiary (każdy potrafi je zjeść) i wzrasta liczba najmniejszych ofiar. Gdy w ekosystemie dominują wyspecjalizowani drapieżcy presja na ofiary rozkłada się równomiernie i wzrasta liczebność największych ofiar (potrafią je zjeść tylko największe drapieżniki) – Rys. 8.



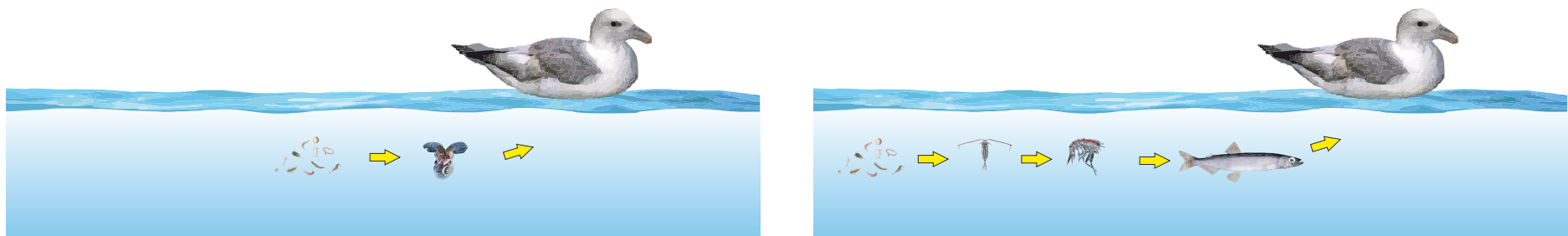
Rys. 8 Śmiertelność ofiar wynikająca z rozmiaru drapieżników (specjalistycznych lub oportunistycznych) oraz na struktury ich wielkości.

Unikalną cechą morskiej sieci pokarmowej jest to, że jej podstawą są mikroskopijne rośliny (glony, sinice, okrzemki itp.) co oznacza, że tylko bardzo mały roślinożerca może je zjadać, a co za tym idzie, na małego roślinożercę będzie polował też mały drapieżnik. Zupełnie inaczej jest na lądzie, gdzie duże rośliny (trawy, krzaki) są producentami i mogą być zjadane przez dużych roślinożerców (antylepy, krowy itp.). Eksploatacja przez człowieka zasobów biologicznych na lądzie jest bardzo efektywna, skoro możemy bezpośrednio konsumować albo dużych producentów (np. sałatę) albo dużych roślinożerców (krowy). W morzu, eksploatujemy duże drapieżne ryby (dorsze, łososie), które są odpowiednikami tygrysów i lwów na lądzie – to z kolei jest przykładem bardzo marnotrawnego wykorzystania energii (Rys. 9). W zimnych wodach, morski roślinożerca może dorosnąć do niespotykanych gdzie indziej rozmiarów – przykładem jest kryl i inne gatunki makroplanktonowych zwierząt o rozmiarach kilku cm. Ta wielkość pozwala już drapieżnikom, nawet tak dużym jak foki i duże ptaki, żerować na niskim poziomie troficznym, co tworzy najbardziej wydajny sposób przepływu energii w morskiej sieci pokarmowej. Tam gdzie woda staje się cieplejsza, zaczynają przeważać organizmy szybko rosnące i małe, sieć pokarmowa robi się złożona i energia rozprasza się pomiędzy wiele gatunków (Rys. 10).



Rys. 9 Wielkość morskich i lądowych roślinożerców odzwierciedla wielkość ich pokarmu. Duże rośliny mogą być zjadane przez duże zwierzęta, podczas gdy mikroskopijny plankton roślinny może być wyjadany tylko przez bardzo małych roślinożerców. Czerwona linia oznacza zasoby eksploatowane przez człowieka. W obszarze lądowym możemy wykorzystywać podstawę sieci pokarmowej, z małymi stratami energii. W morzu zbieramy duże drapieżniki co oznacza poważne straty w pozyskanej energii.





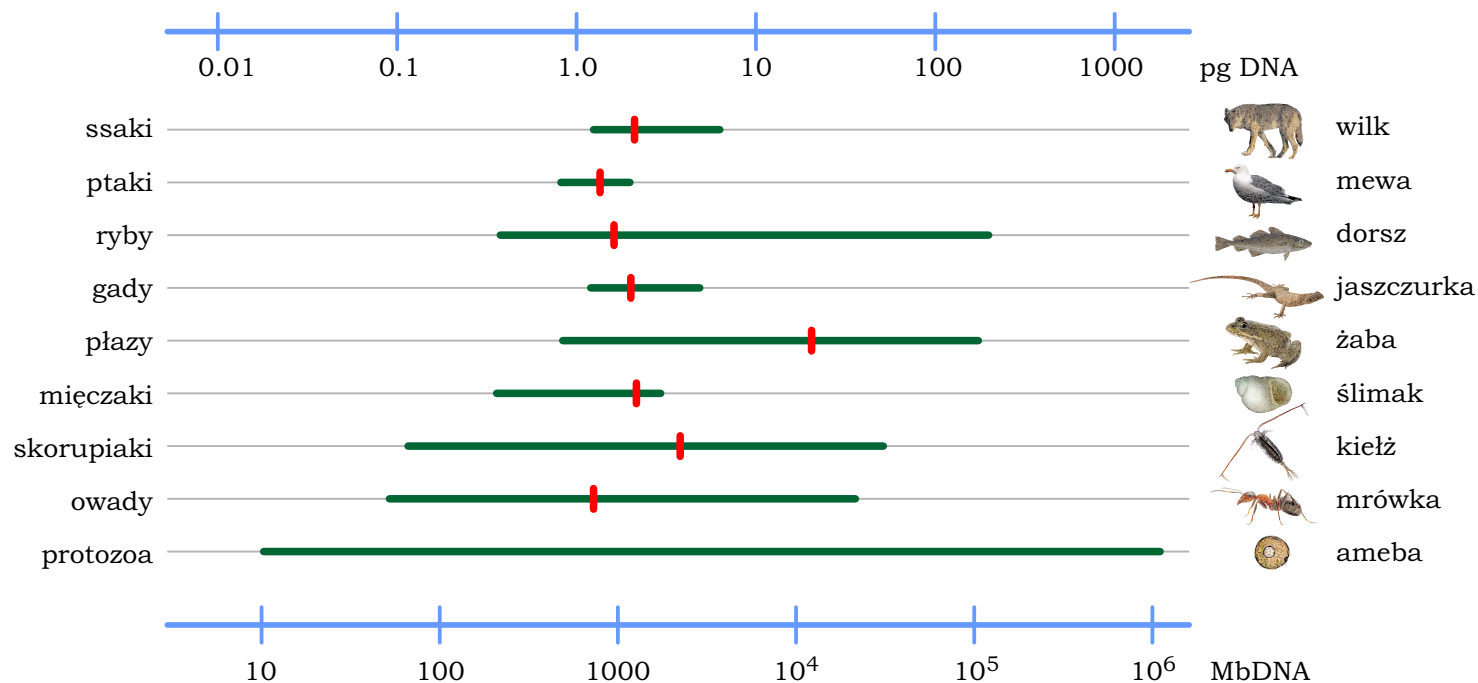
Rys. 10 Krótkie łańcuchy troficzne w polarnych morzach (obszary o niskiej energii) występują wtedy, gdy w zimnej wodzie powoli rosnący roślinożerca osiąga duże rozmiary (np. kryl, obunogi, ślimaki skrzydłonogie), które pozwalają drapieżnikom żerować bezpośrednio na nich. W cieplejszych wodach (o wysokiej energii) toń wodna jest zdominowana przez małe, zróżnicowane organizmy, pokarm jest rozproszony pomiędzy wielu konsumentów.

Dowiedzieliśmy się trochę na temat ekologicznych i ewolucyjnych czynników odpowiedzialnych za małe lub duże rozmiary ciała. Są jednak duże różnice pomiędzy gatunkami, i co ważniejsze typami taksonomicznymi. Owady nigdy nie będą tak wielkie jak kręgowce (które uzyskały sztywność ciała przez rozwinięcie wewnętrznego szkieletu), ale ani kręgowce ani bezkręgowce żyjące na lądzie nie będą osiągały takich rozmiarów jak te żyjące w morzach. Do pewnego stopnia tłumaczą tę zależność fizyczne właściwości wody. Co jednak na podstawowym poziomie odróżnia mysz od słonia – czy jedno jest po prostu mniejszą wersją drugiego?

### **Wielkość ciała, komórki i genomu**

Wszystkie organizmy są zbudowane z komórek. Czy oznacza to, że mysz ma po prostu mniej komórek albo mniejszych niż słoń? Dla większości ssaków i ptaków odpowiedź jest prosta – małe i duże gatunki, różnią się liczbą komórek a nie ich wielkością. Ta zasada zmienia się, gdy sprawdzimy bezkręgowce, które różnią się bardzo wielkością komórek i gdzie często wielkość komórki związana jest z wielkością ciała. Wzrost zarówno bezkręgowców jak i zwierząt kręgowych przebiega przez dodawanie nowych komórek. Kiedy rozpoczynamy życie jako dwie komórki, w miarę jak rośniemy komórki dzielą się i specjalizują w tkanki takie jak kości, mięśnie, narządy, skórę, aż nie osiągniemy swego właściwego rozmiaru.

Kiedy zwrócimy uwagę nie tylko na różnice pomiędzy gatunkami, ale też w obrębie jednego gatunku, nabiera znaczenia fakt czy badamy osobnika młodego czy dorosłego. Większość bezkręgowców i inne organizmy zmiennocieplne (te, których temperatura ciała nie odbiega od temperatury otoczenia) rośnie powoli w niskich temperaturach, ponieważ tempo reakcji biochemicznych zwalnia, ale za to organizmy te osiągają duże rozmiary jako dorosłe. Szczególnie bezkręgowce morskie zamieszkujące duże głębokości w zimnych morzach są dużo większe od swych kuzynów z ciepłych wód – typowe są tutaj ogromne obunogi, rozgwiazdy czy kikutnice, które co ciekawe, mają często bardzo duże komórki. Ale właściwie dlaczego?



Rys. 11 Wielkość genomu jest bardzo zmienna wśród zwierząt, w nieoczywisty sposób. Poziome linie na wykresie obrazują zakres całkowitej wielkości genomu (w pikogramach DNA na górnej skali i w megabajtach DNA na dolnej skali) z wartościami średnimi zaznaczonymi na czerwono.

Wewnątrz wszystkich komórek znajdują się geny, a właściwie genomy, co oznacza całe DNA w komórce. Wszystkie geny są z DNA, ale nie cały DNA to geny. U wielu organizmów, większa część DNA znajduje się poza genami (u człowieka tylko 2% DNA to geny). Pozostałość zawiera wiele odmian DNA o nie do końca poznanej roli. Wiele z tego materiału pochodzi od wirusów (transposomy) i ilość ta jest różna w różnych komórkach, generalnie ilość poza genowego DNA powoduje zwiększenie rozmiaru komórki. Czasami znajdujemy powielone geny czy cały genom, choć zdarza się to najczęściej u roślin. Wśród zwierząt stałocieplnych, wielkość genomu zmienia się nieznacznie, ale u ryb, płazów i gadów może być bardzo różna. To zjawisko było znane od dawna, choć wciąż uznawane jest za paradoks, że wielkość genomu nie ma logicznego związku z wielkością organizmu lub jego złożonością. Znamy prymitywne rodzaje ryb a nawet ameby, które mają dużo więcej DNA w komórkach niż ma go człowiek. Duże komórki generalnie mają większy genom i odwrotnie, ale wciąż nie wiemy czy duży genom wymaga większej komórki czy na odwrót. Co jest jasne, to że właściwości organelli komórkowych wpływają na wielkość komórki i u wielu bezkręgowców również na wielkość ciała. Kryje się tu jeszcze wiele zagadek do rozwiązania dla przyszłych badaczy.

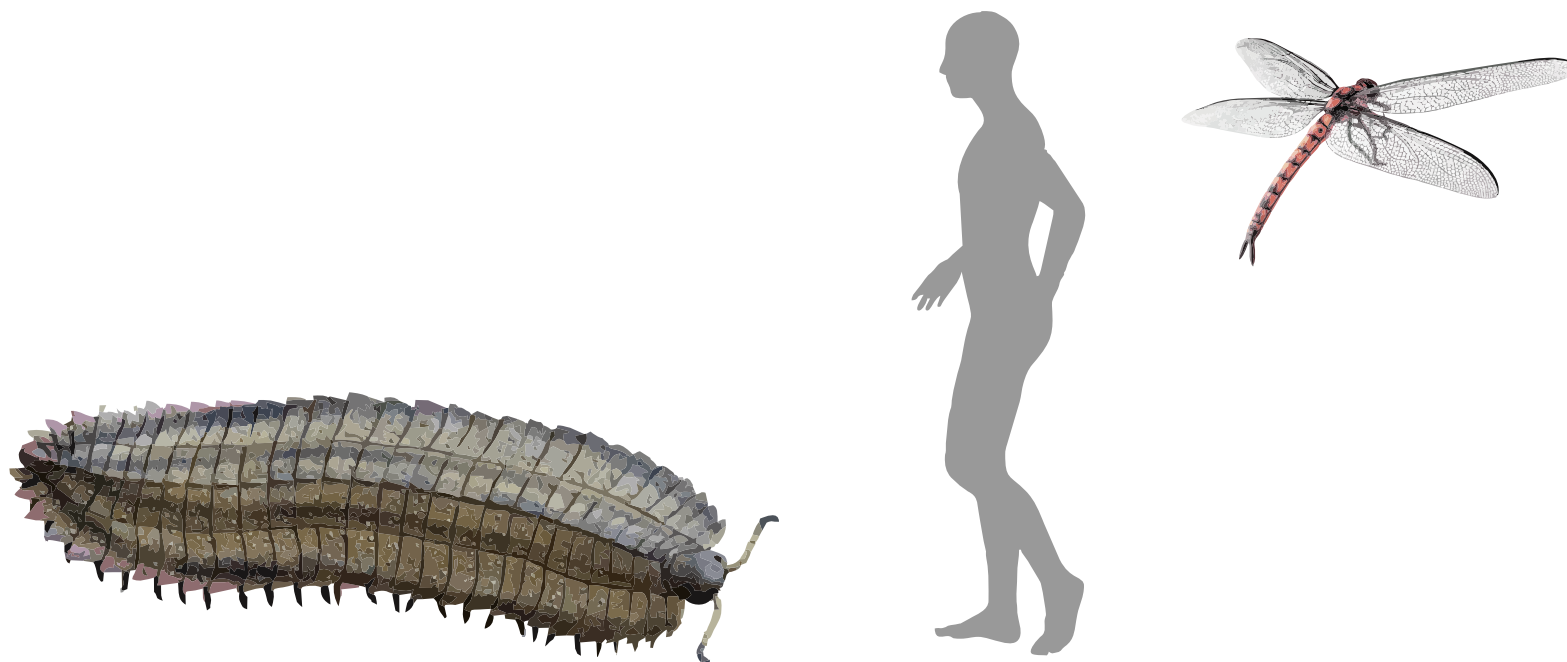
## **Rola tlenu**

W obrębie morskiego ekosystemu znajdujemy przykłady największych różnic w wielkości ciała, ale zwykle największe organizmy znajduje się w zimnych wodach lub na dużych głębokościach, a przyczyna tej zależności jest od dawna dyskutowana. Wiemy, że niska temperatura spowalnia wzrost organizmu, pozwala na dłuższe życie i często osiągnięcie większych rozmiarów ciała. Bezpośredni związek pomiędzy temperaturą i wielkością ciała nie jest jednak oczywisty. Może być tak, że choć zwierzę rośnie wolniej, długość życia kompensuje różnicę w termie wzrostu, czyli rośnie bardzo powoli przez całe życie i wcale nie musi być duże. Może być też tak, że inny decydujący czynnik zmienia się wraz z temperaturą – np. tlen. Ciepłe wody są zwykle ubogie w tlen (gorzej rozpuszcza się w wyższych temperaturach) a ponieważ tlen jest pobierany przez błony komórkowe i rozprowadzany w organizmie, im mniej tlenu, tym trudniej dostarczyć go do dużego ciała. W zimnych wodach tlen jest łatwiej dostępny, co może pozwolić na większe rozmiary komórek i całego ciała. Do tego dochodzi jeszcze rola jaką odgrywa we wzroście drapieżnictwo i zasoby pokarmowe. Zimne wody polarne są bardziej zasobne w substancje odżywcze niż tropikalne, a pokarm pozwala na uzyskanie większych rozmiarów ciała.

Większe komórki i większe ciało musi być odpowiednio "opalone" przez wyższe dostawy tlenu i to ma również znaczenie w ewolucji życia na ziemi. Przez pierwsze 1,5 miliarda lat atmosfera naszej planety nie zawierała tlenu i dopiero po setkach milionów kolejnych lat fotosyntezy prowadzonej przez sinice, zawartość tlenu wzrosła do poziomu, który pozwolił na

powstanie wyższych i większych form życia. W czasie "kambryjskiej eksplozji życia", około 550 mln lat temu, ilość tlenu w atmosferze wzrosła gwałtownie i w morzu pojawiły się skomplikowane organizmy. Jest bardzo prawdopodobne, że to właśnie tlen pozwolił na ewolucję i rozwój dużych zwierząt.

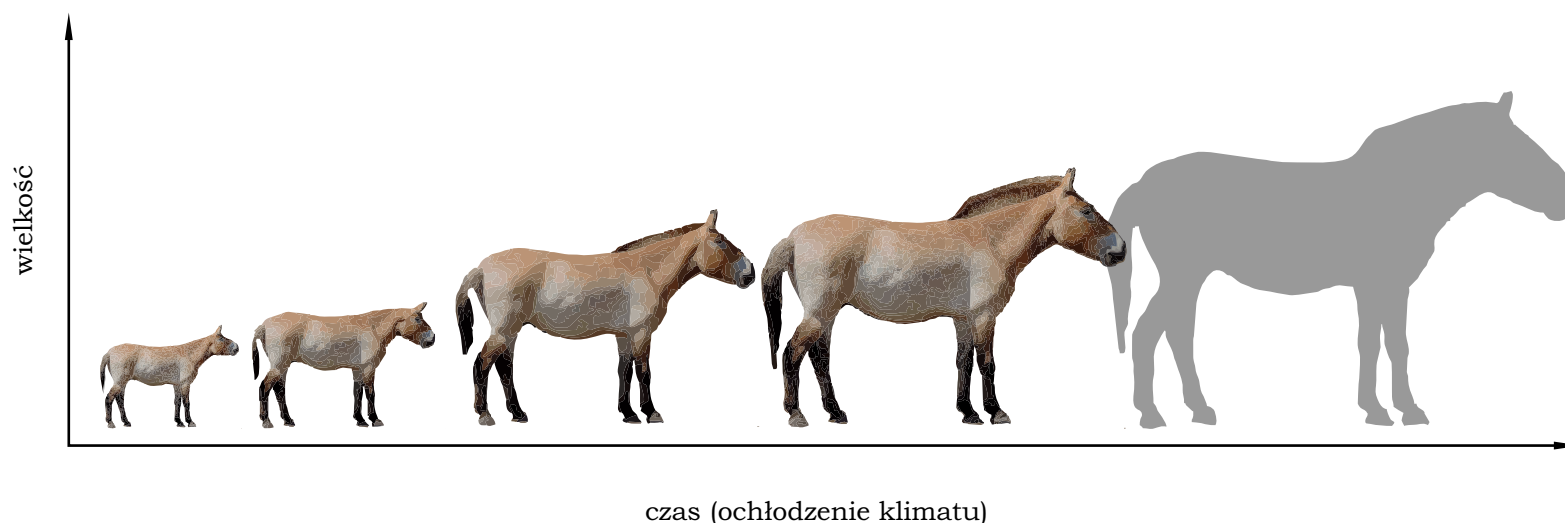
Dziś atmosfera składa się w 21% z tlenu, ale w czasie intensywnego rozwoju fotosyntezy 300 mln lat temu, zawartość tlenu wzrosła do 35% i z tego okresu pochodzą ogromne bezkręgowce lądowe jak ważki wielkości wrony czy dwumetrowe wije (Rys. 12). Niska temperatura wody sprzyja rozpuszczalności gazów (w tym tlenu) co pozwala na zwiększenie rozmiarów ciała. Oznacza to również, że gdy temperatura wody rośnie (jak obecnie w czasie globalnego ocieplenia) i koncentracja tlenu w wodzie morskiej maleje (co już obserwuje się w wielu miejscach) powstają warunki korzystne dla małych organizmów. Duże organizmy są zastępowane przez gatunki o mniejszych rozmiarach, albo same stają się mniejsze.



Rys. 12 Przykłady wielkich bezkręgowców kambryjskich – wija i wążki w porównaniu do sylwetki człowieka.

## Zapis paleontologiczny

Ponieważ klimat na Ziemi zmieniał się w przeszłości wielokrotnie i Ziemia raz była zlodzoną kulą śnieżną w prekambrze, potem cieplarnią w epoce mezozoicznej, rozmiary zwierząt zmieniały się w odpowiedzi na te warunki. Pierwsze dowody uzyskano analizując średnicę otworów nerek pozostawianych przez pospolite morskie robaki i pierścienice – w czasie ciepłego eocenu otwory były małe i wskazywały, że pozostawiły je małe organizmy, w miarę jak klimat oziębiał się aż do zlodowaceń w pleistocenie, średnica nerek morskiej fauny była coraz większa. Innym świadectwem paleontologicznym jest ewolucja koni w Ameryce północnej, które powstały w ciepłym okresie jako zwierzęta wielkości psa i w miarę oziębiania klimatu były zastępowane przez coraz większe gatunki (Rys. 13).

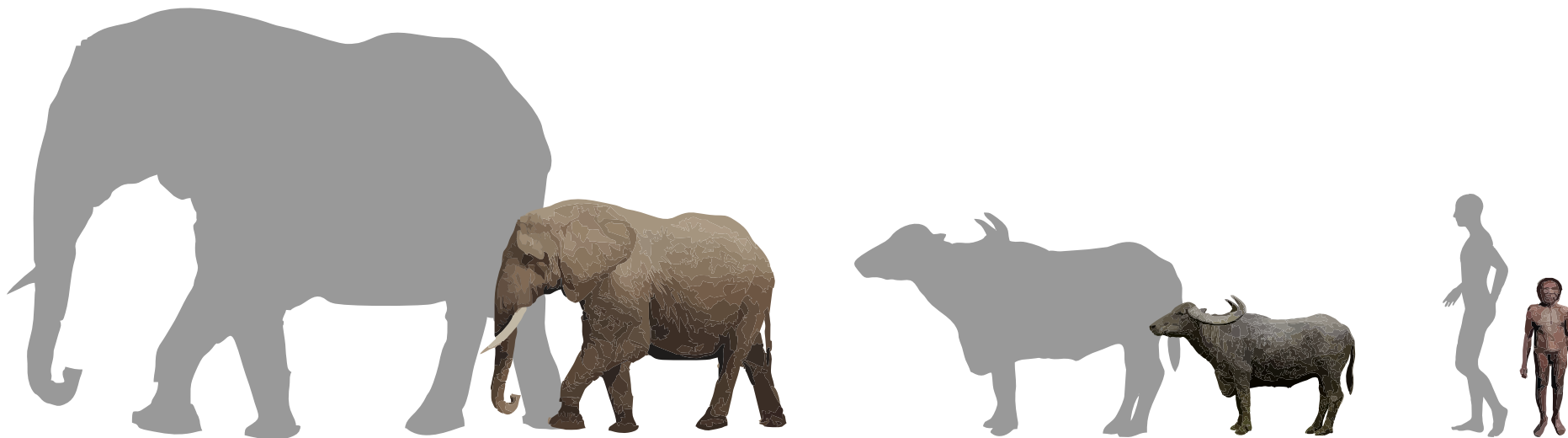


Rys. 13 Jak wiele innych gatunków, konie ewoluowały od małych form (wielkości psa) w ciepłym klimacie eocenu i uzyskiwały większe rozmiary aż do dzisiejszych w epoce lodowcowej – pleistocenie.

## Karłowacenie na wyspach

Temperatura, tlen, drapieżnictwo (lub eksploatacja) oraz dostęp do pokarmu to wszystko czynniki, które mogą wpływać na rozmiar osobnika lub gatunku. Ludzie, którzy cierpieli z powodu niedoboru białka, albo ogólnego niedożywienia, byli niżsi, co udokumentowano w różnych rejonach geograficznych w czasie naszej historii. Specjalny rodzaj karłowatości rozwinął się jednak wśród ssaków żyjących na małych wyspach. Z powodu ograniczonych zasobów, kolejne generacje stają się coraz mniejsze, co zaobserwowano w paleontologicznych materiałach znalezionych na małych wyspach wymarłych miniaturowych słoni, hipopotamów a nawet ludzi (tzw. Hobbit czyli *Homo floresis*).

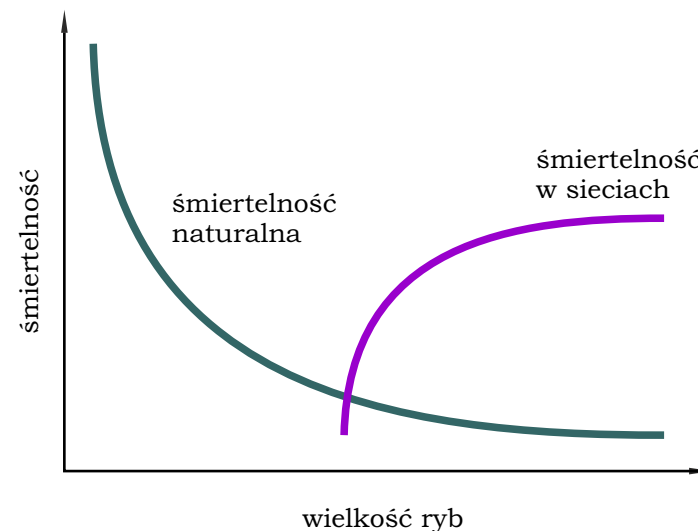
Najbardziej współczesne przykłady ewolucji rozmiaru ciała związanego z temperaturą dotyczą wiewiórek, pizmowców i susłów – ich rozmiary zmniejszyły się w Europie od chłodnego okresu w połowie XIX w. do dzisiejszego ocieplenia.



Rys. 14 Na wyspach odkryto kości małych gatunków słoni, bawołów i hominidów.

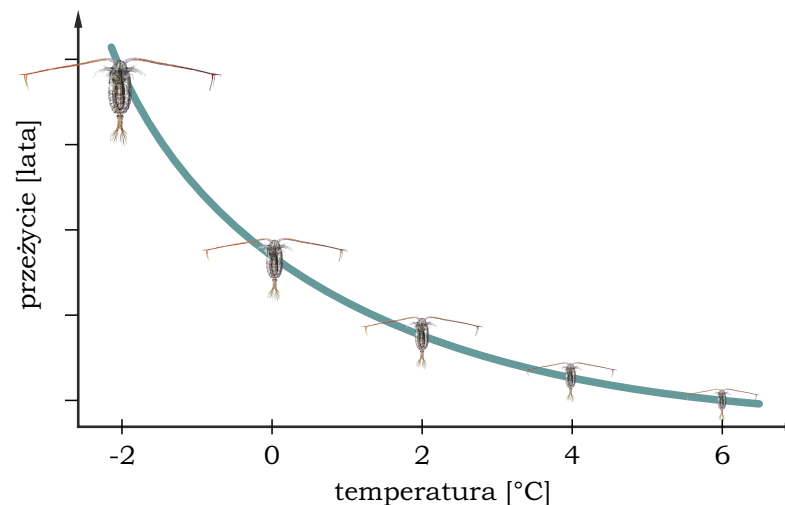
## **Eksploracja zasobów i jej wpływ na rozmiar zwierząt**

Zarządzanie zasobami, ochrona i wykorzystywanie zwierząt o różnych rozmiarach ciała zmieniało się bardzo co dawało różne konsekwencje w strukturze wielkości osobników w populacji. Od wielu lat rybacy i myśliwi eliminowali ze stada największe osobniki, celowo zostawiają mniejsze by mogły dorosnąć i rozmnożyć się. Taki był cel wprowadzenie selektywnych sieci rybackich z oczkami wystarczająco dużymi, żeby mogły przez nie uciec mniejsze ryby. Usuwanie największych osobników z populacji trwało co najmniej od początku XIX w. i w populacjach ryb spowodowało znaczące obniżenie średniej długości dorosłych osobników. Okazało się, że usuwano w ten sposób z populacji geny odpowiedzialne za duże rozmiary ciała, premiując przeżyciem małe osobniki. Dla przemysłowo poławianej ryby, najlepszą strategią życiową stało się rosnąć szybko, osiągnąć dojrzałość i rozmnożyć się zanim zostanie złapana. Ta sytuacja spowodowała trwałe zmiany genetyczne i redukcję długości ciała u najbardziej popularnych ryb o średnio 30%. Podobny problem mieli od dawna myśliwi, wybierający do odstrzału największe jelenie – byki z najokazalszymi rogami, kiedy okazało się, że rodzi się coraz mniej jeleni wyrastających na wielkie okazy, zaczęto regulować łowiectwo tak, by pozostawić w populacji największe i najzdrowsze osobniki do dalszego rozrodu, a usuwać małe, tak by poprawić skład genetyczny populacji.



Rys. 15 Połowy kładą nacisk na wielkość i dojrzałość ryb. Duże ryby są odławiane, małe mają szansę uciec i rozmnażać się.

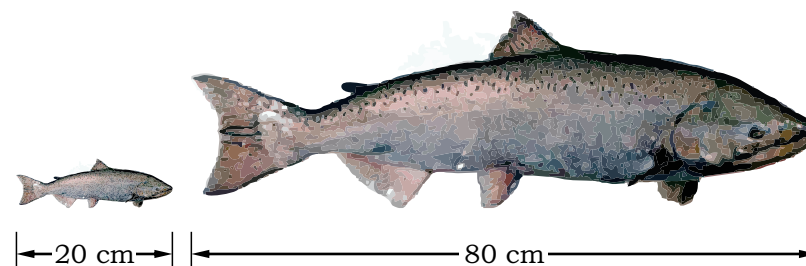
Z punktu widzenia gospodarki energetycznej zasobami pokarmu może się opłacać pozostać przy małych rozmiarach ciała, ponieważ przy tej samej ilości pokarmu populacja małych zwierząt będzie bardziej produktywna (przyrost wagi na jednostkę w ciągu życia) niż populacja dużych zwierząt. Udowodniono to w hodowli dawno temu, że ta sama ilość pokarmu da znacznie szybciej więcej mięsa z królików niż z krów. Jest to związane z generalną zasadą bioenergetyki, która mówi, że małe organizmy mają szybszą przemianę materii (metabolizm) niż duże, w efekcie mogą zamknąć swój cykl życiowy w krótszym czasie, zasada ta stosuje się też do morskich organizmów (Rys. 16).



Rys. 16 Wielkość i żywotność związana z temperaturą otoczenia.

### **Pokarm i rozmiar ciała – przypadek golca**

Jednym z najbardziej niezwykłych przykładów na plastyczność rozmiarów i wpływ pokarmu na wielkość organizmu jest arktyczny łosoś – golec. Ten gatunek ryby zamieszkuje arktyczne i subarktyczne jeziora a zwykle jego populacja dzieli się na część pozostającą całe życie w jeziorze i część migrującą na żerowanie do morza. Wszystkie golce, na rozród muszą wrócić do słodkiej wody. Forma migrująca może osiągnąć kilka kilogramów wagi po żerowaniu w zasobnym w pokarm morzu, podczas gdy formy osiadłe pozostają miniaturowe, z masą ciała nie przekraczającą kilku gramów (pomimo, że genetycznie są z tej samej populacji).



Rys. 17 Karłowaty gatunek żyjący w jeziorze i migrująca ryba w tym samym wieku.



## **Wpływ klimatu na zmiany wielkości organizmów**

Temperatura i czynniki z nią związane mają zasadniczą rolę w określeniu wielkości organizmu i dotyczy to gatunków od fitoplanktonu do ryb. Ponieważ wielkość jest bardzo istotna dla sieci pokarmowej (kto może zjadać kogo) ma ona wielkie znaczenie dla funkcjonowania całego ekosystemu. Ocean ogrzewa się współcześnie bardzo szybko, szczególnie w obszarze Arktyki, gdzie obserwujemy związany z tym zanik lodu. Kiedy podnosi się temperatura powierzchni morza, zmniejsza się dopływ substancji odżywczych z głębokich warstw wody, ponieważ różnica gęstości wody wynikająca z ogrzania osłabia możliwość mieszania warstw wody. Ta nowa sytuacja oznacza osłabienie napływu biogenów i ograniczenie w koncentracji tlenu, które w połączeniu ze wzrostem temperatury razem będą wpływać na większe szanse rozwojowe dla małych gatunków.

Jeżeli taki scenariusz się zrealizuje zmniejszenie produktywności fitoplanktonu będzie oznaczać nowe kłopoty, ponieważ mniej dwutlenku węgla będzie wiązane przez proces fotosyntezy. Ogromny nadmiar CO<sub>2</sub> który mamy już dziś, nie będzie usuwany do morza, a ponieważ pozostanie w atmosferze będzie dalej powiększał efekt cieplarniany. Innym skutkiem zachodzącej zmiany będzie mniej energii w dostępnej w podstawie funkcjonowania ekosystemu morskiego – czyli mniej pokarmu dla zooplanktonu, co oznacza mniej jedzenia dla ryb, a w konsekwencji ptaków morskich, fok, wielorybów, niedźwiedzi polarnych i w końcu człowieka. Zmiana struktury wielkościowej sieci troficznej sama w sobie będzie miała daleko idące konsekwencje, ponieważ duże bogate w tłuszcz widłonogi, zostaną zastąpione przez mniejsze, szybko rosnące gatunki ubogie w substancje zapasowe. Na razie nikt nie jest w stanie przewidzieć jak daleko ten proces się posunie i jaki będzie pełny zakres jego konsekwencji – jednakże jedno nie ulega wątpliwości, że klimat wpłynie na zmianę struktury wielkościowej a ta zmieni sieci troficzne w oceanie.

## Proponowana lektura

### Książki

- McMahon T.A., Bonner J.T. 1983 On size and life. *Scientific American library*. NY., 255pp.
- Peters, R.H. 1986. The Ecological Implications of Body Size. *Cambridge Studies in Ecology*.
- Smith, F. A. And Lyons, K. (Eds.) 2013. Linking Pattern and Process Across Space, Time and Taxonomic Group. *University of Chicago Press*.

### Periodyki naukowe

- Andersen K.H. et al. 2016 Characteristic sizes of life in the oceans, from Bacteria to whales. *Ann. Rev.Mar. Sci.* 8: 217-241.
- Angilletta M.J., Steury T.D., Sears M.W. 2004 Temperature, growth rate and body size in Ectotherms: fitting pieces of a life history puzzle. *Integr. Comp. Biol.* 44: 498- 509.
- D'Ambrosia A.R., Clyde W.C., Fricke H.C., Gingerich P.D., Abels A.A. 2017 Repetitive mammalian dwarfing during ancient greenhouse warming events. *Climatology* 3; e1601430.
- Dick T.J.M., Clemente C.J. 2017 Where have all the giants gone? How animals deal with the problem of size. *PlosBiol.* 15: e2000473.
- Hessen, D.O., Daufresne, M & Leinaas, HP. 2013. Temperature- size relations from the cellular-genomic perspective. *Biological Reviews* 88: 476-489.
- Horne C.R., Hirst A.G., Atkinson D. 2017 Seasonal body size reductions with warming covary with major body size gradients in arthropod species. *Proc.R. Soc. B.*, 284: 201770238.
- Kozłowski J. Czarnoleski M., Danko M. 2004 Can optimal resource allocation models explain why ectotherms grow larger in the cold? *Integr. Comp. Biol.* 44: 480- 493.
- Moody E.K., Rugenski A.T., Sabo J.L., Turner B.L., Elser J.J. 2017 Does the growth rate hypothesis apply across temperatures? Variation in the growth rate and body phosphorus in neotropical benthic grazers. *Frontiers in Env. Science* 5, 14.
- Neuheimer AB, Hartvig M, Heuschele J, Hylander S, Kiørboe T, et al. 2015. Adult and offspring size in the ocean over 17 orders of magnitude follows two life-history strategies. *Ecology*.
- Rikardsen, A. H. et al. 2000. Comparison of growth, diet and consumption on sea-run and lake-dwelling Arctic charr. *Journal of Fish Biology* 57:1172–1188.
- Sheldon RW, Prakash A. 1972. The size distribution of particles in the ocean. *Limnol. Oceanogr.* 17:327–40.
- Verberk WCEP, Atkinson D. 2013. Why polar gigantism and Palaeozoic gigantism are not equivalent: effects of oxygen and temperature on the body size of ectotherms. *Funct. Ecol.* 27:1275–85.
- West GB, Brown JH, Enquist BJ. 1997. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science* 276:122–26.



