

Słoneczna symbioza

MALEŃKIE, PÓŁPRZEZROCYSTE POLIPY KORALOWE – ARCHITEKCI I BUDOWNICZOWIE POTĘŻNYCH RAF KORALOWYCH – SWĄ MOC ZAWDZIĘCZAJĄ ZWIĄZKOWI Z JEDNOKOMÓRKOWYMI GLONAMI WPRZĘGAJĄCYMI DO PRACY NIEWYCZERPANE ŹRÓDŁO ENERGII – SŁOŃCE. WYDAWAŁOBY SIĘ, ŻE ŚRODOWISKIEM ICH ŻYCIA POWINNY BYĆ WYŁĄCZNIE PŁYTKIE, INTENSYWNIE PRZEŚWIELANE WODY. NIEOCZEKIWANIE ODKRYTO JE TAM, GDZIE PROMIENI SŁONECZNYCH JEST JUŻ NIEWIELE. NIEDOSTATEK TEN KORALE NADRABIAJĄ NIEZWYKŁYMI PRZYSTOSOWANIAMAMI...

Korale raf* są znane i podziwiane ze względu na bogactwo skrywającego się w nich życia i jego niezwykłą wprost malowniczość. Organizmy budujące rafy (patrz ramka na str. obok) żyją w strefie intensywnego falowania wody, co powoduje, że ich szkielety ciągle narażone są na niszczenie. Małże, jeżowce i inne organizmy drążące jamki w masywnym szkielecie rafy oraz drapieżniki objadające polipy koralu (ryby, rozgwiazdy) dopełniają destrukcji. Jednak rafy nieustannie odtwarzają się i wzrastają (ryc. 1 i 2), tworząc po latach wielometrowe (a przy obniżającym się dnie morskim nawet wielokilometrowe) kompleksy skalne.

To zdumiewające, ale buduje je cienka otulina żywych tkanek koralu – kilkumilimetrowej grubości żywe ciało kolonii. Składa się ono z dziesiątków, a nawet dziesiątków tysięcy połączonych ze sobą drobnych osobników (polipów) (patrz ramka na s. 48). Swą niezwykłą



Fot. P. Laboulle/JACANA

Ryc. 1. Kolonijne, współżyjące z glonami korale *Acropora*, *Pocillopora*, *Seriatopora*, *Porites* należą do tych form, których udział w budowaniu raf jest największy. Kolonie gałzkowe rosną najszybciej (30–80 mm/rok), kolonie masywne wzrastają wolniej, ale ich szkielety są bardziej odporne na niszczące falowanie

wydajność w tworzeniu szkieletu koralu rafotwórcze zawdzięczają symbiozie z organizmami roślinnymi – zooxantellami (patrz ramka na s. 49). Te jednokomórkowe glony występujące w tkankach koralu potrzebują do życia światła. Dlatego też koral zooxantellowe są niejako skazane na występowanie w płytkich, prześwietlanych światłem słonecznym morzach tropikalnych.

W przeciwieństwie do nich, koral bez współżyjących glonów zasiedlają praktycznie wszystkie pełnosłone morza. Żyją zarówno na płyciznach, jak i w największych głębiach oceanicznych, gdzie temperatura wody spada do kilku stopni Celsjusza (ryc. 3). W większości są to formy o pojedynczych, stosunkowo dużych polipach (przeważnie o średnicy kilku centymetrów). Szkielety gatunków głębokowodnych mają często delikatną, ażurową konstrukcję. Ich podstawy zajmują stosunkowo dużą powierzchnię i zapobiegają pogrążaniu się w miękkim, ilastym osadzie pokrywającym dno. Formy kolonijne są dużo rzadsze i nigdy nie tworzą tak zintegrowanych kolonii jak koral zooxantellowe (ryc. 4).



Ryc. 2. Pomiędzy olbrzymimi koloniami koralu rafotwórczych żyją różne koral osobnicze. Szkielet sportretowanej tu grzybinki (*Fungia*) osiąga niemal metr średnicy. Niezwykłą cechą tego koralu jest zdolność poruszania się. Umiejętność ta może mieć niebagatelne znaczenie w przypadku niespodziewanego przysypania przez osad czy też przewrócenia koralu przez prąd wodny

U koralu wyraźny jest więc podział morskich „stref wpływów” – koral z symbiotycznymi glonami dominują w wodach płytkich, silnie nasłonecznionych, na głębinach zaś niepodzielnie panują gatunki obchodzące się bez pomocy zooxantelli. Co dzieje się jednak w strefie przejściowej – w strefie zapadają-

cych ciemności? Co dzieje się na głębokościach ponad 100 m, gdzie docierające światło nie jest wystarczające do fotosyntezy?

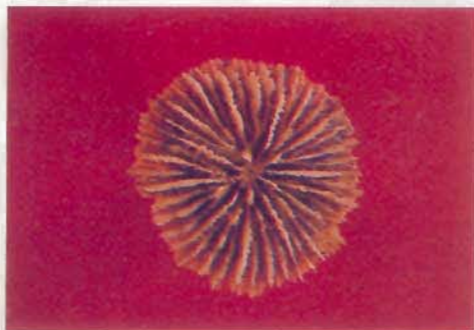
KORALE STREFY CIENIA

Każdy kto nurkował w głębokich wodach wie, że wraz ze wzrostem głębokości natężenie światła maleje, na co wpływ ma przejrzystość wody. Zmienia się również jego barwa w związku z odmienną przenikalnością w wodzie światła o różnych długościach fali. Poniżej 100 m ilość światła jest niewielka i jest ono jednocześnie zubożone o część widma niezbędną glonom do fotosyntezy. Któż by zatem przypuszczał, że spotka tam koral zooxantellowe. Ku zdumieniu biologów morskich okazało się jednak, że muliste dno głębokich stref

RAFY KORALOWE

Rafy koralowe występują na wschodnich wybrzeżach wielu kontynentów, opływanych przez ciepłe prądy oceaniczne. Otaczają też niezliczoną liczbę wulkanicznych wysp Oceanii i archipelagów wysp Oceanu Indyjskiego. Licząca około 2000 km długości Wielka Rafa Barierowa na wschodnim wybrzeżu Australii jest największą konstrukcją na świecie, stworzoną przez żywe organizmy. Optymalnym środowiskiem życia koralu ra-

fotwórczych są więc płytkie wody mórz szelfowych, o temperaturze 25–29°C, rozciągające się w szerokim pasie pomiędzy 32°30'N a 30°S szerokości geograficznej, dobrze natlenione i normalnie zasolone (od 30 do 43 proc.). Współczesne rafy zawdzięczają swoje istnienie nie tylko koralom, ale i szkieletotwórczej działalności takich organizmów, jak glony, stłubiopławy, gąbki, mszywiol czy osiadłe wieloszczety.



Ryc. 3. „Kwiaty głębin” – nierafowe, bez zooxantelli, osobnicze koral zamieszkujące głębiny mórz i oceanów. Od lewej: *Leptpsammia*, *Stephanocyathus*, *Fungiacyathus*. Gatunki tego ostatniego rodzaju żyją wyłącznie w wodach głębokich (100 m), jeden zaś, *F. marenzelleri*, został znaleziony na głębokości 6328 m w Rowie Aleuckim i jest najgłębiej żyjącym koral sześciopromiennym

Morza Czerwonego zasiedla gatunek kolonijnego koralu *Leptoseris fragilis* (ryc. 5), w którego komórkach licznie występują symbiotyczne glony. Aby wytłumaczyć ten fenomen, należało założyć, że zarówno natężenie, jak i długość fal światła docierającego na te głębokości wystarcza współżyjącym zooxantellom albo też, że niezbędne światło dostarczane jest w inny sposób.

Okazało się, że ta ostatnia hipoteza, pozornie najbardziej niewiarygodna, znalazła potwierdzenie. Grupa niemieckich uczonych pod kierunkiem D. Schlichtera i H. Fricke stwierdziła, iż obecne w komórkach koralu symbiotyczne glony nie różnią się od znanych u koralu płytkowodnych – korzystają z tej samej części słonecznego widma. Doświadczenia zaś wykazały, że cały organizm *Leptoseris fragilis* pochłania światło o zupełnie innych długościach – takich, jakie przeważają w miejscu jego występowania. Tak więc światło, przechodząc przez tkanki gospodarza do komórek glonów, zmienia się – następuje transformacja długości jego fal. Okazuje się, że dzieje się to za pośrednictwem specjalnych komórek koralu zawierających pigment. Komórki te, pod wpływem docierającego na te głębokości światła (o długościach fali 380–400 nm), wykazują silną autofluorescencję (emisję światła o innej długości niż pochłonięte) – emitują dokładnie takie światło, jakie potrzebne jest do fotosyntezy zooxantellom koralu. Oznacza to, że dzięki fluorescencji komórek pigmentowych

BUDOWA POLIPÓW

Pojedyncze polipy koralu rafowych mają długość od około 1 mm do 2–3 cm (przeważają jednak mniejsze), cała kolonia zaś może mieć 2–3 m średnicy. Ciało polipów zbudowane jest tylko z dwóch jednowarstwowych nabłonków: zewnętrznej ektodermy (=epidermy) i wewnętrznej entodermy oraz rozdzielającej je galaretowatej warstwy niekomórkowej mezoglei. Wapienny (aragonitowy) szkielet jest wytworem ektodermy. Polipy większości koralu uzbrojone są w czułki z komórkami parzydełkowymi, za pomocą których potrafią zarówno obezwładniać wrogów, jak i atakować drobne organizmy morskie. Pokarm wprowadzany jest do znajdującej się we wnętrzu ciała jamy chłono-trawiennej, pełniącej funkcje trawienne oraz rozprowadzającej substancje odżywcze po ciele. Korale odżywiają się niewielkimi, aktywnie pływającymi organizmami, planktonem (larwy bezkręgowców, pierwotniaki) oraz rozpuszczonymi w wodzie prostymi substancjami organicznymi (aminokwasami) pobieranymi na drodze osmozy przez ciało polipa.

koralu ilość światła, które może być wykorzystane przy procesach fotosyntezy na tak dużych głębokościach, wielokrotnie wzrasta.

Dodatkowym przystosowaniem koralu do życia w tych nietypowych i trudnych warunkach jest kształt kolonii przypominający antenę satelitarną. Z jednej strony może to być przejaw typowej strategii organizmów broniących się przed pogrążeniem w miękkim osadzie, z drugiej zaś – maksymalnego powiększania funkcjonalnej powierzchni koralu, zawierającej komórki pigmentowe i zooxantelle.

Jakby nie dość było specyficznych przystosowań, korale *Leptoseris fragilis* wytworzyły niespotykany w całym koralowym świecie sposób pobierania pokarmu. Przejawem jego niezwykłości jest brak czułków – organów stanowiących u koralu podstawowe narzędzia zaczepno-obronne. Zupełnie nieoczekiwanym wynikiem badań anatomicznych ciała koralu stało się też odkrycie, że jego jama chłono-trawiąca nie jest, jak u wszystkich poznanych koralu, „workiem” jednostronnie otwieranym przez otwór gębowy i gardziel. Stanowi ona natomiast sieć skomplikowanych kanałów, których kontakt ze światem zewnętrznym zapewniają, oprócz centralnie położonego otworu gębowego, liczne mikroskopijne otworki (o średnicy 1–2 μm) w ścianach kanałów. „Naganiana” ruchem rzęsek woda morska wraz z zawieszonymi w niej drobnymi fragmentami materii organicznej wpływa do otworu gębowego (rzęski te, znane też u innych koralu, rozmieszczone są na powierzchni ciała, a także gęsto wysielają gardziel).

Następnie trafia do systemu kanałów i wypływa przez sieć maleńkich otworów na zewnątrz – zostawiając wewnątrz ciała koralu, niczym na sicie, drobiny pokarmowe. Ten bardzo sprawny system filtracyjny zapewnia niezbędny dla heterotroficznego (cudzożywnego) organizmu koralu dopływ materii organicznej. Jak można sobie wyobrazić, jest to system dużo bardziej efektywny w porównaniu z biernym wyczekiwaniem, z szeroko rozpostartymi czułkami, na stosunkowo rzadkie na tych

głębokościach ofiary.

Przykłady te ukazują kompleks przystosowań koralu *Leptoseris fragilis* do życia w półmrocznym środowisku głębokiego morza. Wydaje się, że symbiotyczny związek obu partnerów jest nierozdzielny. Uzależnione od światła autotroficzne (samożywne) zooxantelle nie potrafiłyby żyć na głębokościach przekraczających 100 m bez obecności w ciele koralu komórek pigmentowych. Jakie jest pochodzenie tych doskonałych przystosowań? Czy w trwającej ponad 200 mln lat historii koralowców szczęśliwymi możemy odnaleźć fakty wskazujące, że również korale



Ryc. 4. Głębokowodne korale kolonijne bez zooxantelli mogą tworzyć konstrukcje nieco podobne do raf. Na zdjęciu rozgałęziony szkielet koralu z rodzaju *Lophelia*

Fot. Marian Dziwinski

z minionych epok geologicznych mogły stosować podobną jak *Leptoseris* strategię życiową?

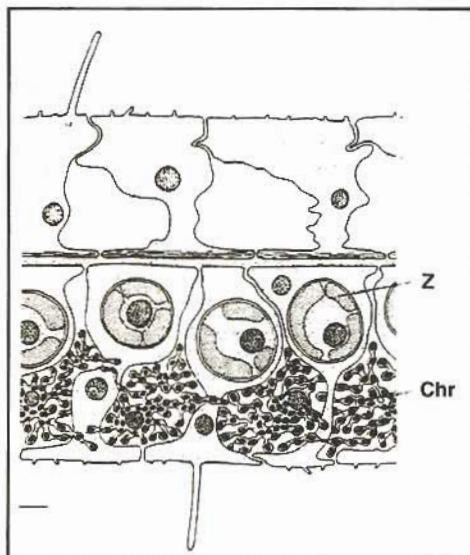
W PÓLMROKU EWOLUCJI

Interesujących danych dostarczają nasze skały wapienne powstałe w późnym okresie jurajskim (ok. 150 mln lat temu), odsłonięte na obszarze Jury Krakowsko-Częstochowskiej. Tworzą je między innymi występujące masowo płaskie kolonie koralu z uznanej za wymarłą rodziny *Microsolenidae* (ryc. 6). Zarówno pokrój skamieniałych kolonii tych organizmów, jak i szczegóły budo-



Fot. Marian Dziwiński

Ryc. 5. „Wynalazca” życia w półmroku – koral *Leptoseris fragilis* (a). Schematyczny diagram warstw ciała koralowca *Leptoseris fragilis* (b), pokazuje między innymi rozmieszczenie komórek pigmentowych – Chr. Komórki te wykazują silną autofluorescencję pod wpływem światła dostępnego na głębokościach 100–150 m. Światło o nowej długości absorbowane jest przez barwniki fotosyntetyczne kulistych, ciemnoczerwonych komórek zooxantelli – Z



wy szkieletu bardzo przypominają cechy współczesnych koralu *Leptoseris*. Analizując rodzaj i cechy skały, w której występują kopalne *Microsolenidae*, profesor Ewa Roniewicz z Instytutu Paleobiologii PAN w Warszawie uważa, że koral

te mogły żyć w wodach dość głębokich (rzędu kilkudziesięciu metrów). Niestety, stan zachowania szkieletów uniemożliwia poznanie ich „kopalnej fizjologii” (badaniami izotopowymi udaje się niekiedy potwierdzić symbiozę kopalnych

OWOCNA WSPÓŁPRACA

W komórkach entodermi koralu rafotwórczych występują glony zwane zooxantellami. Są one przedstawicielami wiciowców roślinnych – bruzdnic (*Dinoflagellata*: *Gymnodinium microadriaticum*). Ten rodzaj kooperacji między organizmami nazywany jest cytosymbiozą. Występujące w komórkach glonów plastidy (czyli wyspecjalizowane organelle komórek roślinnych, w których zachodzą procesy fotosyntezy) zawierają dwa barwniki fotosyntetyczne: chlorofil a i chlorofil b. Podczas fotosyntezy zooxantelle zużywają dwutlenek węgla wytwarzany w procesach metabolicznych koralu. Wykorzystują też dwutlenek węgla powstający w procesie tworzenia szkieletu. Właśnie usuwanie ga-

zowego produktu tej reakcji (CO_2) powoduje zadziwiająco szybki proces wytwarzania szkieletu przez koral rafotwórczy. Glony podnoszą sprawność organizmów swoich gospodarzy również przez usuwanie innych produktów przemiany materii (m.in. związków azotowych); pełnią tym samym rolę swoistych nerek. Warto wspomnieć, że z dobrodziejstw współżycia z zooxantellami korzystają nie tylko koral, ale również inne morskie organizmy. Glony te występują między innymi w jednokomórkowych ciałach wielkich otwornic czy też w tkance tzw. płaszczu ogromnych morskich małży z rodzaju przydacznia (*Tridacna gigas*), których średnica osiąga blisko 1.5 m.

koralu z glonami). Hipotezę o kopalnych odpowiednikach koralu *Leptoseris* wspierają więc jak dotąd głównie dane o szczegółach budowy ich szkieletu oraz informacje o batymetrii (głębokości) mórz.

Patrzac na wyjątkowe, dobrane jakby na życzenie właściwości komórek pigmentowych koralu *Leptoseris* trudno nie spytać również o mechanizmy ewolucyjne, które tłumaczyłyby ich powstanie. W literaturze fachowej informacje o występowaniu i funkcji komórek pigmentowych u innych koralu są bardzo skąpe. Odnotowano jednak obecność pigmentów (z których część wykazuje pod wpływem światła fluorescencję) u niektórych płytkowodnych koralu. Prawdopodobnie formy o podobnej jak *Leptoseris* strategii życiowej wywodzą się z płytkowodnych koralu zooxantellowych, wyposażonych w system pigmentów (których pierwotna funkcja mogła być zupełnie inna, np. odstraszająca).

Odkrycie współczesnych głębokowodnych koralu zooxantellowych to nie tylko ekscytująca zagadka dla zoologów, ale również bodziec dla geologów i paleontologów do dalszych poszukiwań „zachowanego w stanie kopalnym półmroku” – skamieniałych koralu, które żyły w głębokich wodach w symbiozie z glonami.

JAROSŁAW STOLARSKI

* W artykule mowa jest o dominujących we współczesnej faunie koralowcowej koralach sześciopromiennych (*Scleractinia*). Nazwa tej grupy koralu odnosi się do ich sześciopromiennego planu zakładania septów (czyli promieniście ułożonych przegród dzielących jamę chłono-trawiczą koralu na komory). Oprócz koralu *Scleractinia* we współczesnej faunie koralowcowej najbardziej rozpowszechnione są koral Alcyonaria (niezbyt fortunnie zwane też koralami ośmiopromiennymi – od liczby pierzastych czułków), do których należy między innymi koral szlachetny (*Corallium rubrum*) charakteryzujący się pięknym, czerwonym szkieletem osiowym.

JAROSŁAW STOLARSKI jest pracownikiem naukowym Instytutu Paleontologii PAN w Warszawie.

ŚWIATŁO I ŻYCIE W MORZU

Fale o długości powyżej 600 nm (barwy „cieple”) mają stosunkowo małą przenikalność, w przeciwieństwie do fal o długościach na granicy lub poniżej dolnej granicy światła widzialnego. Z powodu większej absorpcji fal o mniejszych długościach morze najczęściej przybiera barwy niebieskozielone. Do głębokości około 100–150 m dociera jedynie 0.15–1.7 proc. światła obecnego na powierzchni wody.

Widmo docierającego tam światła słonecznego zubożone jest o fale większych długości, występują zaś te odpowiadające barwom od niebieskozielonej (500 nm) do ultrafioletowej (380 nm), przy dominującym udziale fal o długościach 380–420 nm. Do efektywnego procesu fotosyntezy w komórkach zooxantelli współżyjących z koralami potrzeb-

ne jest światło o długościach fal 400–720 nm. Istnieją jednak glony, które samodzielnie, bez symbiozy z innymi organizmami, potrafią korzystać z bardzo wąskiego spektrum promieniowania słonecznego.

Umiejętność tę mają między innymi krasnorosty (*Rhodophyta*), glony żyjące w morzu do głębokości 268 m. W chloroplastach tych glonów znajduje się zestaw barwników fotosyntetycznych, spośród których poza chlorofilem a i b najważniejsza jest czerwono-fioletowa fikoerytryna *R*. Pozwala ona krasnorostom absorbować te części promieniowania widzialnego, które docierają na duże głębokości, a mianowicie fale pomiędzy 540 i 570 nm (barwy zielonożółte). Z tych długości fal nie mogą korzystać rośliny wyższe i zieleńce nie mające odpowiednich barwników.