



**dr hab.  
Mikołaj K. Zapalski,  
prof. UW**

Pracuje na Wydziale Geologii UW, jest członkiem Komitetu Nauk Geologicznych PAN. Zajmuje się paleoekologią raf paleozoicznych, w szczególności raf sylurskich i dewońskich, ewolucją ekosystemów rafowych i badaniami porównawczymi ze współczesnymi rafami. Nurek. [m.zapalski@uw.edu.pl](mailto:m.zapalski@uw.edu.pl)

# RAFY CIENIA

Rafy koralowe są najbardziej złożonymi ekosystemami morskimi, występują powszechnie w tropikalnych strefach przybrzeżnych. Czy grozi im wyginięcie, tak jak to się stało w czasie wielkiego kryzysu 260 mln lat temu?

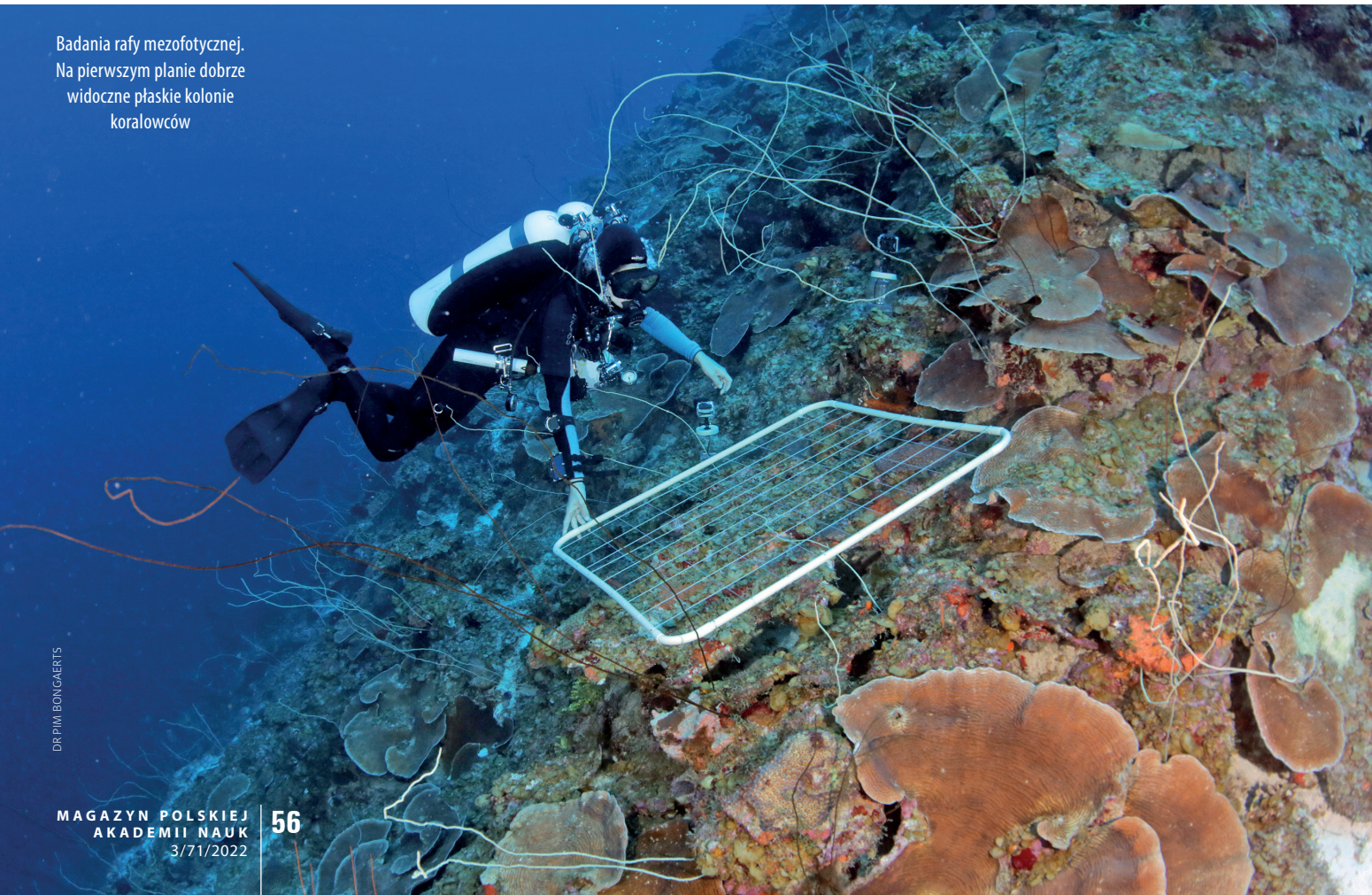
**Mikołaj K. Zapalski**

Wydział Geologii  
Uniwersytet Warszawski

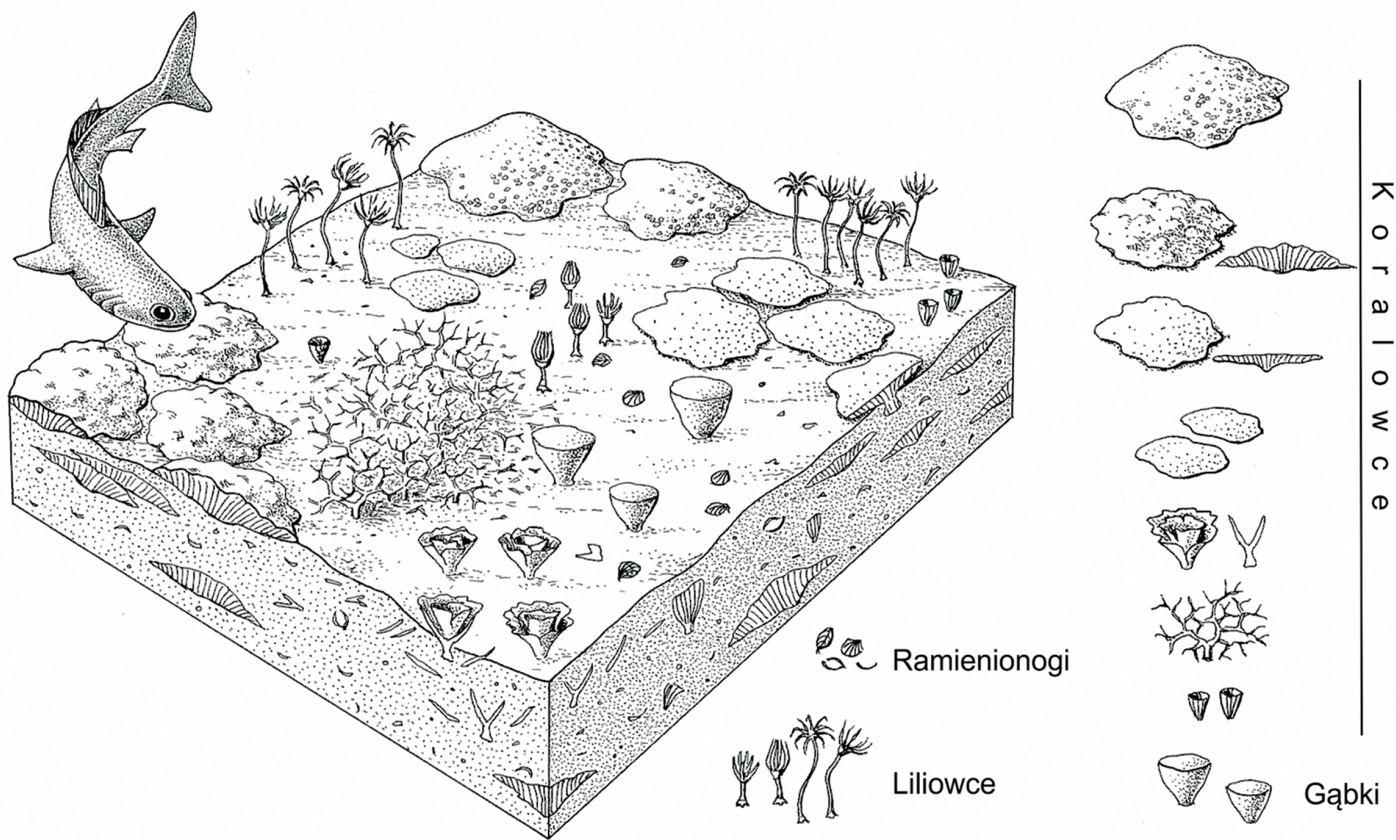
**O**wielkim znaczeniu raf koralowych może świadczyć fakt, że pokrywają one zaledwie 0,01 proc. powierzchni dna morskiego, a są siedliskiem dla blisko 25 proc. znanych gatunków zwierząt morskich i 5 proc. wszystkich znanych gatunków.

Koralowce były znane od starożytności, wspominał o nich Teofrast z Eresos (IV wiek p.n.e.), jednak ich natura pozostawała zupełnie nierozpoznana (Teofrast zaliczył je do minerałów). Znaczącym przełomem w poznaniu natury koralowców były badania Luigiego F. Marsiglego z Bolonii (znanego jako Marsilius), który przy użyciu prymitywnego mikroskopu obserwował żywe koralowce i opisał szczegółowo ich wygląd i zachowanie („osiem płatków” oraz wrażliwość na dotyk). Te obserwacje oraz analiza zapachu rozkładających się koralowców (zbliżonego do zapachu kapusty) przywiodły go do wniosku, że koralowce są roślinami (1625). Bada-

Badania rafy mezofotycznej.  
Na pierwszym planie dobrze  
widoczne płaskie kolonie  
koralowców







nia te doprowadziły 100 lat później (1723) do kolejnego przełomu, kiedy Jean-André Peyssonnel, zainspirowany pracą Marsiliusa, przeprowadził bardzo zbliżone (lecz na większą skalę) badania i doszedł do odmiennych wniosków. Stwierdził, że koralowce są zwierzętami. Karol Linneusz miał dużo problemów z klasyfikacją koralowców i mimo prac Peyssonnela zaklasyfikował je jako rośliny.

Większość koralowców znanych dawnym uczonym pochodziła z płytkich wód przybrzeżnych. Niewiele wiadano o koralowcach żyjących na większych głębokościach, choć już Linneusz i Karol Darwin (100 lat później) opisywali koralowce z wód głębokich – ten ostatni nawet z głębokości 120 m. Sporadycznie i raczej przypadkowo wylawiano koralowce głębokowodne, ale dość długo brakowało systematycznych studiów nad nimi. Okazy pozyskiwano w trakcie dragowania (czyli ciągnięcia specjalnych pojemników po dnie morskim) czy wylawiania hakami, jednak bardzo brakowało obserwacji żywych zwierząt. Dopiero w latach 50. i 60. XX wieku rozpowszechniły się nurkowania ze sprężonym powietrzem. Ze względu na techniczne obserwacje i badania całych ekosystemów skupiały się na wodach nie głębszych niż 30 m. Większe głębokości wymagają lepszego sprzętu, innych technik i procedur. W wyniku tych badań przyjmowano, że zasięg batymetryczny koralowców

to właśnie 30 m, a ich głębsze wystąpienia traktowano raczej jako przypadkowe.

## Symbioza

Koralowce płytkowodne tworzą rafy przy współdziałaniu glonów, głównie z grupy bruzdnic (takie koralowce symbiotyczne nazywamy zooxantellowymi). Ich symbioza opiera się na tym, że koralowiec dostarcza glonom zarówno schronienia, jak i dwutlenku węgla (z oddychania), dzięki czemu symbiont bardzo efektywnie fotosyntetyzuje, dzieląc się z koralowcem wyprodukowanymi w procesie fotosyntezy węglowodanami. Dodatkowo glon, wykorzystując CO<sub>2</sub>, sprawia, że woda morska wokół szkieletu koralowca ma wyższą zasadowość, co znacząco przyspiesza budowanie szkieletu, dzięki czemu to właśnie koralowce zooxantellowe są głównymi budowniczymi raf. Koralowce z morskich głębin nie mają glonów symbiotycznych, gdyż nie dociera tam światło. Do jakiej głębokości mogą występować koralowce zooxantellowe?

Badania głębin morskich i dna oceanicznego przyciągały badaczy już od czasów Williama Beebego, który w swojej batysferze w 1934 roku zszedł na głębokość 923 m. Różnorodne stworzenia głębokowodne (świecące, mające wyrostki czy rozciągliwe żołądki) budziły wielkie zainteresowanie, a za tym szły fundusze

Rekonstrukcja dewońskiej rafy mezofotycznej z Gór Świętokrzyskich. Widoczne płaskie i liściaste koralowce i liliowce.

Zapalski M. et al., „Coral Reefs” 2017. Rys. B. Waksmundzki



na badania. W efekcie powstała pewna luka w poznaniu ekosystemów morskich: dość dobrze znaleźliśmy rafy do głębokości 30 m oraz głębin morskie tam, gdzie nie dociera światło. Między nimi rozciągała się strefa cienia – i dosłownie, i w przenośni.

Przełomem w poznaniu tej strefy cienia były trzy wynalazki (lub usprawnienia techniczne) – m.in. dopracowanie samej techniki nurkowania na głębokości większe niż 30 m (tzw. nurkowania techniczne), co pozwoliło na dość powszechne schodzenie na głębokości większe niż 100 m. Wynaleziono tzw. rebreathery (rebridery), czyli urządzenia o zamkniętym obiegu powietrza, pozwalające na wychwytywanie dwutlenku węgla z powietrza wydychanego przez nurka, a następnie wzbogacenie go w tlen i ponowne wykorzystanie. W efekcie można było nurkować głębiej i dłużej. A w XXI wieku upowszechniły się podwodne drony (ROV – *remotely operated vehicle*), które pozwalają na bardzo wygodne badanie „bliskich” głębin.

Dzięki tym wynalazkom w latach 80. XX wieku badania płytkich głębin, czyli „strefy cienia”, znacząco przyspieszyły. Okazało się, że koralowce zooksantellowe zamieszkują wody do mniej więcej 170 m głębokości (bo tak głęboko sięga światło przydatne do fotosyntezy) i do tej głębokości też budują rafy, nazywane rafami mezofotycznymi („średniego światła”) lub rafami cienia. I o ile w latach 80. XX wieku rocznie ukazywała się jedna-dwie publikacje o takich ekosystemach, o tyle w ostatnich latach ich liczba przekraczała 400 rocznie. Około 2010 roku badacze zdali sobie sprawę, że rafy mezofotyczne pokrywają prawdopodobnie większe obszary dna morskiego niż ich płytkowodne odpowiedniki.

## Światło

Życie w środowisku o obniżonej ilości docierającego światła w sytuacji, w której każdy kwant energii słonecznej jest cenny, wymaga specjalnego przystosowania. Główną adaptacją koralowców zooksantellowych

na większych głębokościach jest znaczne spłaszczenie szkieletu, tworzą one coś w rodzaju paneli słonecznych, co ułatwia ekspozycję na światło tkanek zawierających glony symbiotyczne. Ten sam gatunek koralowca może w płytkiej wodzie mieć kształt zbliżony do sferycznego (mówimy wtedy o koloniach masowych), a w głębinach mieć talerzową lub listkowatą morfologię. Należy dodać, że takie adaptacje nie mogły powstać nagle i musiały być efektem długiego działania doboru naturalnego, można się zatem pokusić o szukanie dowodów na istnienie takich ekosystemów w przeszłości. Znacząco pomaga tu fakt, że szkielety koralowców są zbudowane z węgla wapnia, więc dobrze zachowują się w stanie kopalnym.

W 2000 roku brytyjski badacz Brian R. Rosen wraz ze współpracownikami zidentyfikowali jako pierwsze kopalne koralowce mezofotyczne. Stwierdzili oni, że pierwsze ekosystemy tych organizmów pojawiły się w późnym triasie. Późniejsze badania (m.in. zespołu prof. Bogusława Kołodzieja z UJ) wykazały obecność ekosystemów mezofotycznych w środkowym triasie (około 245 mln lat temu). Był to czas ekspansji koralowców sześciopromiennych (*Scleractinia*), a więc pojawienie się ekosystemów koralowców mezofotycznych jest zbliżone w czasie do pojawienia się raf skleraktiniowych.

W erze paleozoicznej (541–250 mln lat temu) również istniały rafy budowane przy współdziałaniu koralowców. Rafy ze środkowego dewonu (około 380 mln lat temu) dorównywały wielkością współczesnym rafom, jednak budowały je inne grupy koralowców. Koralowce paleozoiczne, tzw. koralowce denkowe i rugozy, wyginęły zupełnie w czasie wielkiego wymierania permskiego i najprawdopodobniej nie pozostawiły po sobie potomków. Niewiele wiemy o ich fizjologii, trochę więcej o ich ekologii.

Konstrukcja „paneli słonecznych” u współczesnych koralowców *Scleractinia* wynika z prostych praw fizycznych. Jeśli organizm chce wyciągnąć światło, będzie wytwarzać w tym celu zbliżone struktury. Ana-

Przekroje  
przez płaskie koralowce  
mezofotyczne  
ze stanowiska Wee Jasper,  
Nowa Południowa Walia,  
Australia



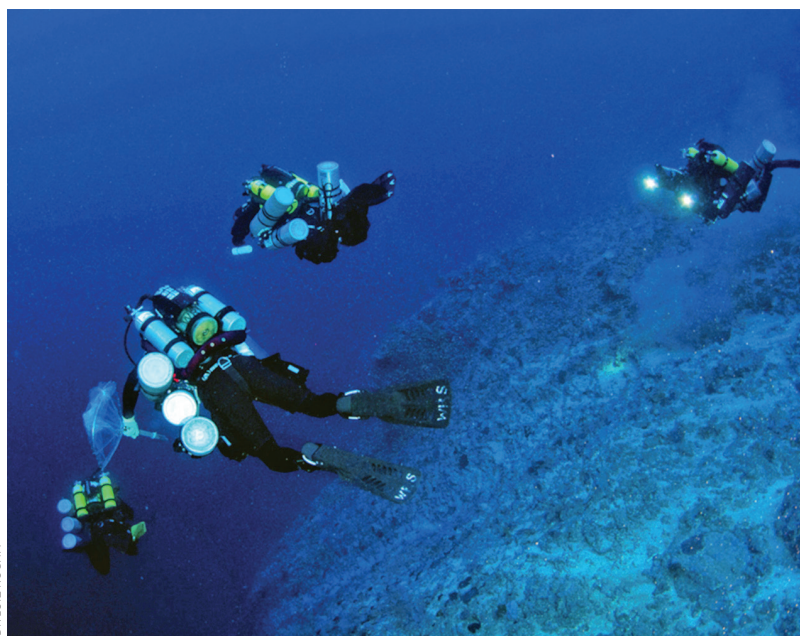


liza różnych zbiorowisk koralowców paleozoicznych ujawniła kilka zespołów, które są uznane za mezofotyczne. Pierwsze znaleziska pochodzą ze skał środkowego dewonu Gór Świętokrzyskich (sprzed blisko 390 mln lat), a następne z sylurskich osadów z Gotlandii (sprzed mniej więcej 430 mln lat) oraz z dewonu Maroka.

Zespoły koralowców ze skał dewońskich odsłoniętych w kamieniołomie Laskowa koło Kielc były znane od dawna. Wiadomo było mniej więcej, jak wyglądają, jednak ich płaski kształt nie był przedmiotem osobnych badań. Dopiero analiza kształtów koralowców (a nie ich składu gatunkowego) pozwoliła razem z analizą sedymentologiczną zinterpretować ten zespół jako typowo mezofotyczny, z dominującymi koralowcami płaskimi i liściastymi, oraz dużym udziałem koralowców gałązkowych. Badania bardzo zbliżonych nieco starszych zespołów prowadziliśmy w bieżącym roku w Nowej Południowej Walii (Australia). Stanowisko Wee Jasper było znane od dawna z występowania doskonale zachowanych ryb pancernych, nasze badania skupiły się na warstwach zawierających koralowce. Jest to pierwszy znany pełny ekosystem rafowy z dobrze opracowaną fauną ryb, które w dzisiejszych rafach stanowią niezmiernie ważny element ekosystemu.

## Mętna woda

Nie każdy zespół koralowców o płaskich szkieletach jest mezofotyczny. Opisana morfologia szkieletu jest związana z dostępnością światła, a nie z głębokością jako taką. Badania współczesnych koralowców u wybrzeży Florydy wykazały, że szkielety podobne do mezofotycznych mogą pojawiać się w mętnych wodach już na głębokości około 10 m. Niektórzy badacze dzielą rafy cienia na niebieskie i brązowe. Te pierwsze to prawdziwe rafy mezofotyczne, występujące w przejrzystych wodach na dużych głębokościach, gdzie płaski kształt kolonii koralowców jest



DR LUIZ ROCHA

uwarunkowany pochłanianiem światła przez wodę morską. Brązowe rafy mezofotyczne to zespoły koralowców występujące w wodach mętnych i płytkich, gdzie światło jest pochłaniane przez cząstki osadu rozproszone w toni. Takie rafy powszechnie występują np. na szelfowych, przybrzeżnych obszarach Wielkiej Rafy Koralowej. Polsko-australijskie badania środkowodewońskich koralowców z australijskiego stanu Queensland (w ramach prowadzonego przez autora grantu) wykazały, że w paleozoiku istniały również brązowe rafy mezofotyczne. Charakteryzowały się one dużym udziałem koralowców płaskich, jednak dużo było też koralowców gałązkowych i masywnych (tych ostatnich w niebieskich ekosystemach mezofotycznych praktycznie nie ma).

Zmiany klimatyczne w XXI wieku stanowią wielkie zagrożenie dla raf koralowych. Na ile to niebezpieczeństwo dotyczy raf mezofotycznych, tego nie wiemy. Czy mogą one być swoistym refugium dla raf płytkowodnych? Niestety, nasza wiedza o takich ekosystemach i ich historii geologicznej jest niezmiernie fragmentaryczna. Współczesne ekosystemy rafowe są w miarę dobrze rozpoznane blisko wielkich ośrodków naukowych (np. na Hawajach, w Australii – Wielka Rafa Koralowa). Ale wiemy zbyt mało, by pokusić się o spójne uogólnienie dotyczące czynników kontrolujących rozwój tych raf czy rozmieszczenie gatunków koralowców, co w konsekwencji powoduje, że trudno rozpoznać zagrożenia. ■

Dziękuję dr. Pimowi Bongaertsowi i dr. Luizowi Rosze (California Academy of Sciences) za udostępnienie zdjęć.

Badania są wykonywane w ramach grantu NCN pt. „Mezofotyczne ekosystemy koralowców w środkowopaleozoicznym stadium rozkwitu raf” (2018/29/B/ST10/00954).

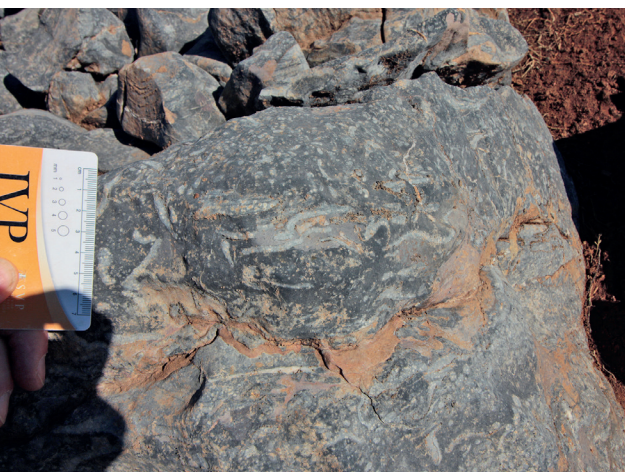
Badacze z California Academy of Sciences schodzą w głębinę, by badać mezofotyczną rafę Mo'orea, Polinezja Francuska. Używanie wielu butli jest charakterystyczne dla nurkowań technicznych

Chcesz wiedzieć więcej?

Lesser M.P., Slattery M., Mobley C.D., *Biodiversity and functional ecology of mesophotic coral reefs*, „Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics” 49/2018.

Zapalski M.K., Wrzosek T., Skompski S., Berkowski B., *Deep in shadows, deep in time: the oldest mesophotic coral ecosystems from the Devonian of the Holy Cross Mountains (Poland)*, „Coral Reefs” 36/2017.

Zapalski M.K., Baird A.H., Bridge T., Jakubowicz M., Daniell J., *Unusual shallow water Devonian coral community from Queensland and its recent analogues from the inshore Great Barrier Reef*, „Coral Reefs” 40/2021.



MIKOŁAJ K. ZAPALSKI (3)