ALEKSANDRA A. KOROZA

Katedra Zoologii Bezkręgowców i Hydrobiologii
Wydział Biologii i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Łódzki
Banacha 12/16, 90-237 Łódź
E-mail: aleksandra24koroza@gmail.com

WPLYW WSPÓŁCZESNYCH ZAGROŻEŃ ANTROPOGENICZNYCH I NATURALNYCH NA KORALE RAFOWE

WSTĘP

Korale rafowe są zwierzętami należącymi do rzędu parzydełkowców (Cnidaria). Rząd ten obejmuje około 10.000 gatunków zasiedlających w większości wody słone (APPELTANS i współaut. 2012). Rafy koralowe są tworzone przez korale madreporowe (Scleratinia) o twardym szkieletcie powstającym z węglanu wapnia. Do tej pory zostało opisanych 1520 gatunków koralów należących do rzędu Scleratinia (APPELTANS i współaut. 2012). Przykładami ich są rodzaje *Acropora*, *Pocillopora*, *Goniastrea* i *Porties* (NOTHDURFT i WEBB 2007). Są zbudowane z małych polipów osadzonych na węglanowo-wapiennym podłożu.

Rafy koralowe występują w wodach między 30°N a 30°S. Podane współrzędne wskazują miejsca występowania raf ciepłowodnych i płytkowodnych, które zostaną omówione w niniejszym artykule, natomiast nie będą omawiane rafy zimnowodne i głębokowodne. Najbardziej bogatym regionem występowania koralowców jest tak zwany „Trójkąt Koralowy”, obejmujący Indonezję, Filipiny, Wyspy Salomona i Timor-Leste, gdzie występuje 75% wszystkich poznanych gatunków (BURKE i współaut. 2012). Z kolei powierzchnia raf w Azji i Oceanii stanowi 80% wszystkich raf na świecie (TEH i współaut. 2013). Duża część koralowców jest wrażliwa na zmiany w środowisku, wpływające na znaczące zróżnicowanie ich występowania i różnorodności (BURKE i BONDURIANSKY 2017).

Różne gatunki i populacje koralowców mogą żyć w symbiozie z innymi organizmami morskimi, takimi jak zooxantelle (*Sym-*

biodinium), żółtymi lub brązowymi glonami należącymi do bruzdnic (Dinoflagellata) (np. korale ciepłowodne, płytkowodne z gatunku *Acropora tenuis*) lub bez zooxantelli (np. zimnowodne korale z gatunku *Lophelia pertusa*) (ROBERTS i współaut. 2006). Obecność zooxantelli u koralów jest determinowana przez warunki środowiskowe, takie jak dostęp do światła, temperatura wody, oraz cechy charakterystyczne dla gatunku czy populacji. Zooxantelle uczestniczą w dostarczaniu koralowcom składników odżywczych oraz, razem z osiadłym na koralach mikrobiomem (bakterie, prokaryoty, grzyby), wspomagają obieg azotu, siarki i fosforu. Na przykład *Crenarchaeota*, należące do królestwa Archea, usuwają amoniak przez nityfikację i denityfikację (BOURNE i współaut. 2016). Symbionty koralów i wspomniane mikroorganizmy, aby przetrwać, potrzebują odpowiednich warunków (np. odpowiedniego oświetlenia czy przejrzystości wód) niezbędnych dla skutecznego przeprowadzania procesów metabolicznych (BURKE i współaut. 2012, ESTEBAN i współaut. 2019). Dlatego, rafy koralowe, jako integralne i złożone środowiska zależne od symbiontów, są wrażliwe na zmiany w ekosystemie, takie jak: wahania temperatury wody, jej zakwaszenie i obfitość rozpuszczonych składników odżywczych, które mogą niekorzystnie oddziaływać na podłoże węglanowo-wapienne. Te czynniki z kolei są uzależnione nie tylko od naturalnych procesów biologiczno-chemicznych, ale także od czynników antropogenicznych, takich jak: intensywność połowów ryb, obecność szkodliwych substancji w wodzie i wielu innych, które zostaną omówione poniżej. Rafy kora-

lowe są istotną częścią podwodnego ekosystemu, zapewniają schronienie i pożywienie wielu zwierzętom, ale także stanowią naturalną barierę chroniącą wybrzeża. Odgrywają też swoją rolę w gospodarce i ekonomii ludzi zamieszkujących tereny bliskie rafom. Około 850 milionów ludzi na świecie żyje w odległości do 100 km od raf i jest zależnych od ich zasobów. Dają one nie tylko pożywienie (zdrowa, nie przełowiona rafa Oceanu Spokojnego może dawać od 5-15 ton owoców morza rocznie na 1km²), ale wpływają na turystykę, przemysł farmaceutyczny, a także stanowią naturalną barierę ochronną przed sztormami i erozją (BURKE i współaut. 2012, ESTEBAN i współaut. 2019).

Jak zmieniły się koralie rafowe na przestrzeni ostatnich lat w związku ze zmianami w środowisku i jak będą one wyglądały w przyszłości? Czy możemy zrobić coś, by poprawić ich stan? Celem pracy jest próba odpowiedzi na te pytania, w oparciu o dostępną literaturę dotyczącą zmian w występowaniu i zagrożeniach dobrze poznanych raf ciepłowodnych i tropikalnych.

ZAGROŻENIA DLA KORALOWCÓW

Jednym z najpowszechniej występujących zagrożeń jest reakcja stresowa koralu na wzrastającą temperaturę wód, wynikająca z rosnącej emisji gazów cieplarnianych i zmian klimatu. Jest to tzw. blaknięcie koralu, polegające na utracie symbiontów z rodzaju *Symbiodinium* (DESCOMBES i współaut. 2015). Wytrzymałość koralu na zmiany temperatury wody jest zróżnicowana w zależności od gatunku i symbiontów oraz odporności koralowców na zmiany (BAKER i współaut. 2004). Ciekawe, że koralie mogą zmieniać kolonie swoich symbiontów, jeśli te nie są odporne na zmiany w środowisku. Przykładowo BAKER i współaut. (2004) obserwowali w Panamie, gdzie dominującym rodzajem koralu jest *Pocillopora*, różne odmiany genetyczne symbiotycznego *Symbiodinium*. Dla ułatwienia koralie zajmujące różne odmiany genetyczne *Symbiodinium* rozdzielano na kłady A, C i D. Odkryto, że dominujący tam w 1997 r. kład D nie biał, natomiast biał kład C. W 2001 r. kład D zdominował rafę Panamską w 63% (BAKER i współaut. 2004). W latach 1998, 2002, i 2016 australijskie koralie rafowe doświadczyły masowego bieleńcia wskutek podwyższonych temperatur wody, a badania prowadzone w tych rejonach wykazały, że inne czynniki, takie jak rybołówstwo czy zanieczyszczenia wody, miały w tym okresie niewielki wpływ na stan raf (HUGHES i współaut. 2003). W 1998 r. bieleńcie dotknęło rafy zlokalizowane głównie blisko wybrzeży, a mniej na południu i

w środku rejonu obejmującego Wielką Rafę Koralową (w każdym wspomnianym roku rafy doświadczały około 4-tygodniowych uderzeń ciepła). W 2016 r. w Australii bieleło 60% raf, czyli 4-krotnie więcej niż w latach 1998 i 2002 (HUGHES i współaut. 2017). Co więcej, rozwój koralowców, które uwalniają do wody gamety męskie i żeńskie, jest uzależniony od temperatury wody i zmiany klimatu; np. *Acropora tenuis* jest gatunkiem budującym rafy i bardzo wrażliwym na wspomniane czynniki, bowiem temperatura warunkuje czas powstania oocyty, a także ma wpływ na rozwój symbiontów (BABCOCK i współaut. 1986, RINKEVICH 1989, YUYAMA i współaut. 2012).

Kolejnym współczesnym zagrożeniem dla koralu jest wzrastający poziom CO₂ w oceanach, co prowadzi do podwyższenia temperatury wody oraz, w konsekwencji, do zakwaszenia oceanów. Udowodniono, że szkielety koralu ulegają wapnieniu w mniejszym stopniu, gdy stężenie cząsteczek węglanu w wodzie spada. W procesie wapnienia szkieleto- koralu z rzędu Scleractinia dobudowują go wychwytyjąc z wody jony węglanowe CO₃²⁻ i jony wapniowe Ca²⁺, potrzebne do utworzenia budulcowego aragonitu CaCO₃ (DECARLO i współaut. 2018). Stężenie CO₂ jest m.in. zależne od silnych wiatrów, które odpychają powierzchnię wody od brzegu, a zastępuje ją często bardziej kwaśna woda głębinowa (ang. upwelling). W niektórych miejscach „upwelling” wiatrowy (wywołany przez rozbijanie się fal o wybrzeże i ograniczony do wód przybrzeżnych oraz szelfów kontynentalnych) występuje przy stromych wybrzeżach kontynentalnych, a nie ma miejsca na otwartych rafach oceanicznych (powodowany jest ruchami pionowymi wywołwanymi przez ruch wiatru, termoklinę oceaniczną oraz równikowe prądy oceaniczne, dotyczy większego terenu-otwartego oceanu) (GARVINE 1971). „Upwelling” może zarówno polepszać, jak i utrudniać rozwój koralu. Przykładowo, mały, lokalny „upwelling” poprawia ich stan, m.in. zmniejszając temperaturę wód lub wprowadzając dużą zmienność w średnich temperaturach wody, co może uodpornić koral na zmiany w warunkach środowiskowych, a duży „upwelling”, m.in. na wschodnim Pacyfiku, spowalnia rozwój występujących tam koralu (GRIMSDITCH i SALM 2006). Powodem tego zjawiska jest niskie pH wody głębinowej (wynoszonej w czasie „upwellingu”), wynikające z wysokiego stężenia CO₂ pochodzącego z naturalnych procesów. Procesami przyczyniającymi się do obniżenia pH wody są oddychanie i tryb życia na rafach organizmów takich jak strzykwy, jeżowce czy ryby, które często przyczyniają się do rozpuszczania CaCO₃ przez emisję CO₂ (AN-

DERSSON i GLEDHILL 2013). To z kolei spowalnia tempo wzrostu i wytrzymałość szkieletu koralu (FINE i TCHERNOV 2007). W czasie wzrostu koralu wyróżniamy dwa procesy: wydłużanie (przez wzrost do góry) i zagęszczanie (grubienie ścian). Z powodu różnego tempa wzrostu, gatunki koralu mogą odmiennie reagować na zmiany w środowisku, np. na zakwaszenie wód, ze względu na różną wrażliwość ich tkanek (DECARLO i współaut. 2018). Co ciekawe, gatunek *Pocillopora damicornis* w odpowiedzi na zmniejszające się pH w środowisku zwiększa stężenie Ca^{2+} w wodzie, w której występuje, a intensywność wapnienia koralu pozostaje taka sama jak przed zmianą w środowisku. Przykładem gatunku reagującego w odmienny sposób na podobne zmiany w środowisku może być reakcja *Acropora youngi* na zmniejszone pH wody. Koral ten w zmiennych warunkach nie jest w stanie znacząco kontrolować ilości Ca^{2+} w wodzie, a tym samym jego stopień wapnienia znacząco spada w warunkach obniżonego pH (DECARLO i współaut. 2018). Badania wykazały, że skład chemiczny wody wpływa na etap przyrastania grubości koralu, ale nie jest istotny dla wzrostu do góry (MOLLICA i współaut. 2018). Grubość koralu jest różna w zależności od rafy koralowej. Zauważono jednak pewne tendencje, a mianowicie rafy równikowe są bardziej narażone na wyhamowanie przyrostu grubości szkieletu na ze względu na wysokie spadki wartościach pH (powyżej 0,35 jednostek) wód w tych rejonach, np. w Trójkacie raf (11,4-20,3% spadku w przyroście koralu na grubość). Przykładem raf koralowych, które nie doświadczają aż tak drastycznych zmian w przyroście grubości są te znajdujące się na Karaibach i w Zatoce arabskiej (MOLLICA i współaut. 2018).

Dodatkowymi czynnikami powodującymi wzrost liczby zniszczeń są nadmierne połowy, niewłaściwe metody poławiania ryby, skorupiaków czy koralu na rafach, np. z użyciem dynamitu, drag czy cyjanku (CESAR i współaut. 2003). Czerwony koral w Morzu Śródziemnym odławiany jest jako cenny surowiec jubilerski od lat 70., a jego liczebność została zredukowana o około 50%. Średnia długość koralu czerwonych w wodach płytkich osiągała w latach 70. i 80. 12 cm, podczas gdy dziś wynosi około 3 cm. Dłuższe koralce czerwone można znaleźć jedynie na głębszych wodach (60 m i poniżej), gdzie osiągały około 10 cm (ROSSI 2019). Ta istotna zmiana wielkości czerwonych koralu ma również wpływ na ich rozmnażanie się, gdyż koral o długości 12 cm i grubych gałęziach był w stanie wyprodukować 3000 larw rocznie, a o długości 3 cm jedynie 90 larw rocznie (ROSSI 2019). Niekontrolowane

połowy ważnych dla ekosystemu drapieżników (np. ryb), także są zgubne dla raf, gdyż mogą powodować zmiany na wielu poziomach troficznych, ponieważ zniknięcie jednego drapieżnika lub jego niewielka frekwencja powoduje inwazję innego drapieżnika, który zyskuje przewagę, co prowadzi do ogólnych zmian w faunie i florze zajmowanego ekosystemu. Z badań DULVY i współaut. (2004) wynika, że struktura ekosystemów rafowych zależy od intensywności połowów ryb, które regulują liczebność drapieżnej rozgwieżdżonej korony cierniowej (*Acanthaster planci*), odżywiającej się koralowcami. Jej liczebność rosła w miejscach o intensywnych połowach. W wyniku tego zmalała liczebność koralu budujących rafy, wzrosło też pokrycie ich powierzchni algami, czego nie obserwowano w miejscach o zrównoważonych połowach.

Ponad 50% raf na świecie jest określonych jako przełowione, a ponad 30% jest w wysokim stopniu zagrożonych tym zjawiskiem, co może mieć zgubny wpływ na ekosystem (TEH i współaut. 2013). W wyniku zmian w ekosystemie i nadmiernego wzrostu liczebności drapieżników rafy są zagrożone. Co gorsza, larwy korony cierniowej lepiej rozwijają się w wodach o małej przejrzystości, bardzo żyznych i bogatych w fitoplankton (DE'ATH i współaut. 2012). W takich warunkach koral ograniczają zasięg występowania i zmniejsza się ich różnorodność (TANNER 1995). BAUMAN i współaut. (2010), podczas badań prowadzonych na przełomie października i listopada w 2008 r. w Zatoce Oman, stwierdzili negatywny wpływ algi (*Cochlodinium polykrikoides*) na liczebność koralu z rodzajów *Pocillopora* i *Acropora*.

Występowanie ryb w obrębie raf jest również zagrożone ze względu na pogarszające się warunki, czyli masowy wzrost liczebności alg, ograniczenie stężenia tlenu, wzrost zachorowań ryb w wyniku podwyższonego stężenia neurotoksyn paraliżujących centralny system nerwowy (BURKE i współaut. 2015, ZOHDI i ABBASPOUR 2019). Nadmierny rozrost alg ma też negatywny wpływ na jakość wody (wysoka żyzność wody związana z procesem eutrofizacji), a w związku z tym na koralu i występowanie powiązanych z nimi organizmów. Na Karaibach, kilka lat po dużym huraganie, gdy środowisko naturalne zaczęło się regenerować, algi z gatunku *Dictyosphaeria cavernosa* zdominowały florę rafy koralowej. Innymi słowy, nastąpił gwałtowny zakwit pleustofitów, czyli roślin wodnych unoszących się w toni lub na powierzchni wody i szybko namnażających się. W miejscu tym w niewielkiej liczbie występowały jeżowce *Diadema antillarum*, żywiące się młodymi koralowcami, małymi skorupia-

kami, a także glonami porastającymi koralami. Jego późniejsze zniknięcie doprowadziło do tego, że pokrycie powierzchni koralami spadło z 52 do 3%, a pokrycie algami wzrosło z 4 do 92% (KNOWLTON 2001).

Zniszczenia koralów mogą też pojawiać się w wyniku naturalnych klęsk, takich jak podwodne trzęsienia ziemi i często powiązane z nimi tsunami. Rify koralowe chronią wybrzeża przed siłą uderzeniową tsunami, przyjmując jej część na siebie. SHAO i współaut. (2019), badając rolę koralów podczas tsunami na Sri Lance i Malediwach, wykazali, że fale załamujące się na koralach mają mniejszą wysokość i zalewają o 5 do 10 razy mniejsze obszary lądu niż na terenach pozbawionych raf. Wiele koralów zostaje jednak zniszczonych (GOTO i współaut. 2019). Opisanym zjawiskom towarzyszy ostatnio stały, spowodowany zmianą klimatu, wzrost poziomu morza, co dodatkowo potęguje uszkodzenia koralów, prowadząc np. do zmniejszenia chropowatości ich powierzchni. Zniszczenia koralów mogą wpływać na efektywność ochrony wybrzeży przed tsunami. Przykładem mogą być zniszczenia po tsunami na oceanie indyjskim z 2004 r., wywołanym trzecim co do wielkości trzęsieniem ziemi w historii (FAKHRI-RAZI i współaut. 2019).

Niektórzy naukowcy (np. WEAR 2016) uważają, że obserwowane dzisiaj znaczące zmiany w strukturze raf koralowych wynikają raczej z kumulacji opisanych zagrożeń, niż z dominującego wpływu któregoś z nich z osobna.

ROZMIESZCZENIE I RÓŻNORODNOŚĆ GATUNKOWA RAF DAWNIEJ I DZIS

Wpływ działań człowieka na stan raf koralowych był widoczny już od późnych lat 80. XX w., a w latach 1992-1993 zmalał obszar zajmowany przez nie (WILKINSON 1999). Przyczyny tego zjawiska były podobne do zagrożeń, z którymi rify mierzą się dzisiaj, np: zmiana klimatu, zanieczyszczenia, naturalne procesy (np. sztormy). Wpływ zmian pogodowych na koralale można odczytać wydobywając ich rdzenie i analizując pierwiastki występujące w każdej warstwie (WILKINSON 1999). Zgodnie z raportem na temat stanu Wielkiej Rify Koralowej z 2008 r., około 20% raf zostało tam utraconych i jeśli warunki środowiskowe i nasze wykorzystanie naturalnych zasobów nie ulegną zmianie, to następne 15% raf zniknie do 2028 r., a do 2048 kolejne 20% (BIRKELAND 2019, WILKINSON 1999). Zgodnie ze światowymi danymi na temat zasobów raf koralowych, 75% z nich jest obecnie narażona na zagrożenia zarówno lokalne, jak i globalne (CHAVANICH

i współaut. 2015). W poszczególnych regionach świata straty powierzchni zajmowanej przez rify i zdolność pozostałych zdrowych raf do regeneracji są różne. Przykładowo, tereny obejmujące środkowy Pacyfik są określane jako mniej zagrożone, a atlantyckie, południowo-azjatycko-pacyficzne i indyjskie jako bardziej. Ten stan rzeczy może być spowodowany rozmieszczeniem raf, które w rejonach centralnego Pacyfiku występują w większej liczbie miejsc i duża ich część jest odizolowana, co powoduje, że zagrożenia, takie jak choroby koralowców, nie są rozprzestrzeniane masowo tak, jak w Atlantyku, gdzie rify są bardziej skupione (BIRKELAND 2019). Stopień zniszczenia raf zależy od rodzaju zagrożenia, z którym rafa się zmierzyła, ale też od rozmiaru rafy, struktury populacji i warunków środowiskowych. Efekty zniszczeń raf są widoczne w różnym stopniu na wyspach Galapagos, gdzie dominującym gatunkiem budującym rify jest *Porites lobata*. Pośrodku archipelagu, bliżej wysp Marchena, Darwina i Wolfa, rify okazały się bardziej odporne na zniszczenia przeżywając gwałtowne zmiany w środowisku od 1980 r., podczas gdy *P. lobata* na południu wysp Galapagos występuje sporadycznie i w niewielkich koloniach (GLYNN i współaut. 2018).

Różnorodność gatunkowa raf również ulega zmianie w zależności od zagrożeń, które musi przetrwać. DEVANTIER i współaut. (2006) udokumentowali, że około 30% z obserwowanych rejonów określonych zostało jako średnio zróżnicowane pod względem gatunków koralów tam występujących. 80% gatunków koralów odnotowano w mniej niż 20% rejonów Wielkiej Rify Koralowej. Szczególnie wysoki spadek różnorodności miał miejsce na północy raf przybrzeżnych. DEVANTIER i współaut. (2006) sugerują, że w tym rejonie wynika to prawdopodobnie ze zmian, które zaszły w ekosystemie australijskich rzek tropikalnych, zlokalizowanych w północno-zachodniej Australii na odcinku około 450 km i silnie powiązanych z lasami deszczowymi, doprowadzających wodę do oceanu, w związku ze zwiększającą się ilością materiału odkładanego przez rzeki oraz wzrostem stężeń związków organicznych i pestycydów, ale także dominacją wspominanego *Acatthaster planci*.

PRZYSZŁOŚĆ I DZIAŁANIA CHRONIĄCE RAFY

Regeneracja koralów jest możliwa, jednak wymaga czasu i z każdym kolejnym masowym bieleniem czy długotrwałym okresem przeławiania, szanse na to są coraz mniejsze (HUGHES i współaut. 2003). Działania chroniące koralale muszą zostać jak najszybciej

ciej wprowadzone, gdyż ich stan już dziś jest zły, a może się pogarszać ze względu na pogłębiające się zmiany (BAKER i współaut. 2008). Celów renowacji raf jest kilka: naprawa szkód wyrządzonych przez pływające i zakotwiczone o dno statki, rozbudowywanie środowiska raf koralowych, zwiększanie liczebności populacji gatunków szczególnie istotnych dla raf, np. przez powiększanie obszarów istotnych dla ich występowania (BAUMS 2008). Przewiduje się, że zakwaszenie wód i zmiana klimatu do 2030 r. podwyższy liczbę zagrożonych raf do 90%, a do 2050 r. prawie wszystkie z nich będą dotknięte zmianami powiazanymi z wymienionymi wyżej procesami. Strategia ochrony raf jest zależna od rejonu, w którym się ona znajduje, i jego charakterystycznych parametrów, takich jak: temperatura wody, żyzność i przejrzystość wód. Istotne są także cechy indywidualne koralu i rodzaj ich związków symbiotycznych z innymi organizmami oraz potrzeby tych organizmów niezbędne do prawidłowego funkcjonowania (zbiór organizmów takich jak grzyby, mikroorganizmy, zooxanthellae) (THURBER i współaut. 2009).

Ustanawianie obszarów ochronnych pomaga w ochronie raf przed zagrożeniami ze strony rozwijającej się turystyki i rybołówstwa: niszczenie raf podczas nurkowania przez niedoświadczone osoby, zmiana uformowania wybrzeża dla tworzenia nowych ośrodków turystycznych powodujących osuwanie się wybrzeża i w konsekwencji zmętnienie wody, ograniczenie dostępu światła, zniszczenie dna w wyniku trałowania (CESAR i współaut. 2003).

Szacowana liczba gatunków koralu występujących na rafach na całym świecie waha się od 600.000 do 9 milionów (PLAISANCE i współaut. 2011). Powierzchnia występowania koralu znacząco się zmniejsza, a ich miejsce często zajmują gęste maty z glonów, doskonale rozwijające się przy nadmiarze składników odżywczych, takich jak azot czy fosfor, które są dostarczane do wód ze ściekami (KNOWLTON 2001). BURKE i współaut. (2011) podają, że około 27% raf znajduje się na terenach chronionych, z czego ponad połowa jest zlokalizowana u wybrzeży Australii. Ochrona wybrzeży nie zawsze przynosi zamierzone skutki, np. w Australii jedynie w 15% chronionych rejonów odnotowano poprawę stanu koralu, czego nie stwierdzono aż w 47% obszarów. W statystykach światowych sytuacja jest równie poważna, gdyż jedynie dla 6% obszarów morskich zanotowano pozytywne skutki ochrony i renowacji raf, podczas gdy 75% siedlisk koralu nie jest w ogóle chronionych. Środki przeznaczane na ochronę i renowację raf są źle rozdzielane. Zwykle przeznaczane są na ograniczenie

przełowienia raf, uważanego za dominujące, podczas gdy powinny być równomiernie dysponowane na zmniejszenie wszystkich zagrożeń (WEAR 2016). Z drugiej strony, możemy również odnaleźć przykłady, gdzie inwestycja w każde z zagrożeń nie przyniosła efektów. W Australii ochrona raf przez ograniczanie połowów i kontrolowanie żyzności wód nie zmniejszyła efektów gwałtownego wzrostu temperatury wody, które już trzykrotnie doprowadziło do masowych bieleń dotykających coraz większej powierzchni rafy (HUGHES i współaut. 2017).

Inną metodą renowacji raf jest rozmnażanie koralowców i introdukcja do środowiska na różnych etapach rozwoju (NAKAMURA i współaut. 2011). Takie postępowanie pozwala na reintrodukcję danego gatunku koralu tam, gdzie naturalne odtworzenie jest już niemożliwe ze względu na mniejszą liczbę uwalnianych jaj i ograniczenie zapładniania (KNOWLTON 2001). Istnieje kilka metod sztucznego rozmnażania koralu rafowych, a jako jedną z pierwszych zastosowano transplantację fragmentów (VAN OPPEN i współaut. 2015). Jest to jednak metoda rozmnażania bezpłciowe, która nie zapewnia różnorodności genetycznej, dlatego obecnie coraz częściej stosuje się rozmnażanie płciowe, przenosząc koralę do środowiska naturalnego na różnych etapach rozwoju od larw po dorosłe osobniki (MINISTRY OF THE ENVIRONMENT 2004). Typ rozmnażania oraz rodzaj larw jakie uwalnia koral jest również istotny dla dyspersji tych zwierząt, ponieważ różne kształty, wielkości i charakter larw determinują długość ich przebywania w toni wodnej, zdolność do pływania i dystans jaki mogą pokonać w starciu z naturalnymi czynnikami, takimi jak prądy i pływy (GIANGRANDE i współaut. 2017). Larwy różnią się też wymaganiami dotyczącymi podłoża, na którym mają osiąść, by przejść kolejny etap rozwoju, i czasem, który są w stanie przeżyć w toni wodnej, w zależności od tego czy odżywiają się przez filtrację czy też zostały zaopatrzone w zapas składników odżywczych (HARRI i KAYANNE 2003). Wpływ na osiadanie larw ma również obecność mikroorganizmów (SHARP i współaut. 2015). Prawdopodobnie bakterie biorą udział w przekazywaniu związków azotowych do symbiontów koralu. Bakteria *Roseivivax* (gatunek pospolity), była też wykrywana w trakcie rozmnażania płciowego koralu, u których następuje zapłodnienie wewnętrzne a larwy zostają uwolnione po embriogenezie. Okazało się, że bakteria ta determinuje osiadanie larw koralu *Portia astreoides* przez regulację czasu morfogenezy, czyli etapu biologicznego rozwoju zarodka, w którym determinowany jest jego kształt (SHARP i współaut. 2015). To wszyst-

ko powoduje, że ich hodowla jest niezwykle trudna, a reintrodukcja do środowiska naturalnego niezwykle ryzykowna. Istnieją też banki genowe różnych gatunków koralu, w których przechowywane są materiały genetyczne w celu zabezpieczenia ich przyszłości i zapewnienia możliwości ich ratowania. Materiał genetyczny jest zbierany z raf w czasie gametogenezy i głęboko mrożony (HAGEDORN i współaut. 2017). Jego efektywność jest taka sama po miesiącu przechowywania, jak i po roku (HAGEDORN i współaut. 2017). W literaturze brak jest jednak informacji o przewidywanym wpływie długotrwałego mrożenia spermy koralowców na efektywność materiału w przyszłości. Z prób przeprowadzonych przez HAGEDORN i współaut. (2017) wynika, że udało się rozmnożyć koral z zamrożonego materiału genetycznego (przechowywanego miesiąc i rok), co jest niewątpliwym sukcesem. Technika ta jednak wymaga jeszcze udoskonalenia, gdyż w wyniku tego procesu przetrwało aż o połowę mniej larw niż w wyniku rozmnażania ze świeżego materiału genetycznego. Niewątpliwie jednak stworzone banki genetyczne koralu mogą w przyszłości pomóc w odbudowaniu zniszczonych ekosystemów. W trakcie renowacji raf koralowych z użyciem metody mrożeniowej należy pamiętać o dobieraniu introdukowanych gatunków uwzględniając ich odporność na warunki środowiskowe, które są przewidywane w przyszłości w miejscu introdukcji (BAUMS 2008).

Wszystkie te działania są jednak kosztowne i wymagają udoskonalenia techniki, gdyż rozmnażanie koralu w warunkach sztucznych i ich introdukcja są niezwykle trudne ze względu na ich duże wymagania środowiskowe, a rozmnażanie z materiału przechowywanego nie zawsze jest skuteczne. Dwuletni projekt mający na celu rozmnożenie i reintrodukcję do środowiska naturalnego *Acropora tenuis*, gatunku budującego rafy na Filipinach, kosztował 165.400 \$, a koszty utrzymania kolonii koralu po 35. miesiącu życia wyniosły około 20,94\$ za każdą z 79 kolonii (CRUZ i HARRISON 2017).

PODSUMOWANIE

Przyszłość koralu leży w naszych rękach i zależy od tego, czy jesteśmy w stanie odpowiednio dobierać strategie ochronne. Jednocześnie dalsze losy raf koralowych są trudne do przewidzenia, gdyż mogą one różnić się od tych, które dzisiaj znamy ze względu na różnice genetyczne powstałe w czasie projektów reintrodukcji; np. banki genowe gromadzą materiał genetyczny dzisiejszych gatunków, które będą musiały się przystosować do nowych warunków środowiskowych i

zmieniać się genetycznie. Trudno jest globalnie określić, jak zmieniło się występowanie, liczebność i różnorodność gatunków budujących rafy do dziś. Jednak przedstawione przykłady raf ciepłowodnych ukazują, że w wielu kluczowych miejscach występowania koralu (Wielka Rafa Koralowa, Australia, Trójkąt Koralowy) już dziś obszary zajmowane przez nie są dużo mniejsze niż kiedyś, a różnorodność gatunkowa jest mniejsza. Banki genowe są nadzieją na przetrwanie koralu w przyszłości, jednak wiedza związana z przechowywaniem i skutkami reintrodukcji sztucznie rozmnażanych koralu do środowiska naturalnego nie jest jeszcze dostateczna. Nie możemy więc polegać jedynie na bankach genowych koralu. Podejmowane obecnie działania powinny więc być wszechstronne i dotyczyć wielu dziedzin, w tym szerokiej edukacji społeczeństw całego świata.

Streszczenie

Zagadnienie wpływu działalności ludzi na środowisko, np. nadmierne połowy prowadzące do wyeliminowania kluczowych drapieżników z ekosystemów, emisja gazów cieplarnianych, zmiana klimatu czy wprowadzanie ścieków do wód, jest problemem często dzisiaj poruszanym w nauce i mediach. Jednym z ekosystemów zagrożonych taką działalnością są rafy koralowe. Są one tworzone przez koralowce żyjące w symbiozie z wieloma organizmami np. algami *Symbiodinium*, które dostarczają koralom związków odżywczych, w zamian za możliwość życia w ich tkankach i łatwy dostęp do światła. Korale są też ważne dla wielu organizmów, które znajdują dzięki nim schronienie czy pokarm, np. papugoryb odżywiających się koralami czy jeżowców odżywiających się matami glonów pokrywających koralu i samymi koralami. Zła kondycja raf koralowych może więc nie tylko pozbawić domu i pokarmu, ale też wywołać choroby związanych z nią organizmów. Celem artykułu jest omówienie zagrożeń dla koralu i związanych z nimi niekorzystnych zmian oraz możliwe strategie poprawienia stanu rafy.

LITERATURA

- ANDERSSON A. J., GLEDHILL D., 2013. *Ocean acidification and coral reefs: effects on breakdown, dissolution, and net ecosystem calcification*. Ann. Rev. Marine Sci. 5, 321-348.
- APPELTANS W., AHYONG S. T., ANDERSON G., ANGEL M. V., ARTOIS T., BAILLY N., BAMBER R. i współaut., 2012. *The magnitude of global marine species diversity*. Curr. Biol. 22, 2189-2202.
- BABCOCK R. C., BULL G. D., HARRISON P. L., HEYWARD A. J., OLIVER J. K., WALLACE C. C., WILLIS B. L., 1986. *Synchronous spawnings of 105 scleractinian coral species on the Great Barrier Reef*. Marine Biol. 90, 379-394.
- BAKER A. C., STARGER C. J., MCCLANAHAN T. R., GLYNN P. W., 2004. *Corals' adaptive response to climate change*. Nature 430, 741.
- BAKER A. C., GLYNN P. W., RIEGL B., 2008. *Climate change and coral reef bleaching: An ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook*. Estuar. Coastal Shelf Sci. 80, 435-471.

- BAUMAN A.G., BURT J.A., FEARY D.A., MARQUIS E., USSEGLIO P., 2010. *Tropical harmful algal blooms: An emerging threat to coral reef communities?* Marine Pollut. Bull. 60, 2117-2122.
- BAUMS I. B., 2008. *A restoration genetics guide for coral reef conservation*. Mol. Ecol. 17, 2796-2811.
- BIRKELAND C., 2019. *Global status of coral reefs : in combination , disturbances and stressors become ratchets*. [W:] *World seas: an environmental evaluation*. SHEPPARD C. (red.). Academic Press, Elsevier, 35-56.
- BOURNE D. G., MORROW K. M., WEBSTER N. S., 2016. *Insights into the coral microbiome: underpinning the health and resilience of reef ecosystems*. Ann. Rev. Microbiol. 70, 317-340.
- BURKE N. W., BONDURIANSKY R., 2017. *Sexual conflict, facultative asexuality, and the true paradox of sex*. Trends Ecol. Evol. 32, 646-652.
- BURKE L., REYSTAR K., SPALDING M., PERRY A., 2011. *Reefs at Risk Revisited*. World Resources Institute, Washington, DC.
- BURKE L., REYSTAR K., SPALDING M., PERRY A., 2012. *Reefs at Risk Revisited*. World Resources Institute, Washington, DC.
- CESAR H., BURKE L., PET-SOED L., 2003. *The Economics of Worldwide Coral Reef Degradation*. www.wwf.or.jp/activities/lib/pdf_marine/coral-reef/cesardegredationreport100203.pdf.
- CHAVANICH S., SOONG K., ZVULONI A., RINKEVICH B., ALINO P., 2015. *Conservation, management, and restoration of coral reefs*. Zoology 118, 132-134.
- CRUZ D. W. DEL., HARRISON P. L., 2017. *Enhanced larval supply and recruitment can replenish reef corals on degraded reefs*. Scient. Rep. 7, 1-13.
- DE'ATH G., FABRICIUS K. E., SWEATMAN H., PUOTINEN M., 2012. *The 27-year decline of coral cover on the Great Barrier Reef and its causes*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 109, 17995-17999.
- DECARLO T. M., COMEAU S., CORNWALL C. E., MCCULLOCH M. T., 2018. *Coral resistance to ocean acidification linked to increased calcium at the site of calcification*. Proc. Royal Soc. B, Biol. Sci. 285, doi: 10.1098/rspb.2018.0564.
- DESCOMBES P., WISZ M. S., LEPRIEUR F., PARRAVICINI V., HEINE CH., OLSEN S. M., SWINGEDOUW D., KULBICKI M., MOUILLOT D., PELLISSIER L., 2015. *Forecasted coral reef decline in marine biodiversity hotspots under climate change*. Global Change Biol. 21, 2479-2487.
- DEVANTIER L. M., DE'ATH G., TURAK E., DONE T. J., FABRICIUS K. E., 2006. *Species richness and community structure of reef-building corals on the Nearshore Great Barrier Reef*. Coral Reefs 25, 329-340.
- DULVY N. K., FRECKLETON R.P., POLUNIN. N. V., 2004. *Coral reef cascades and the indirect effects of predator removal by exploitation*. Ecol. Lett. 7, 410-416.
- ESTEBAN M., JAMERO NURSE L., YAMAMOTO L., TAKAGI H., NGUYEN T. D., MIKAMI T., KENCH P., ONUKI M., NELLAS A., CRICHTON R., VALENZUELA V. P., CHADWICK CH., AVELINO E., TAN N., SHIBAYAMA T., 2019. *Adaptation to sea level rise on low coral islands : lessons from recent events*. Ocean Coastal Manage. 168, 35-40.
- FAKHRU'L-RAZI A., WONG M. M. R., SAID A. M., 2019. *Consequences of the 2004 Indian Ocean tsunami in Malaysia*. Safety Science, doi: [org/10.1016/j.ssci.2019.05.016](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.05.016).
- FINE M., TCHERNOV D., 2007. *Scleractinian coral species survive and recover from decalcification*. Scienc. 315, 1811.
- GARVINE R. W., 1971. *A simple model of coastal upwelling dynamics*. J. Phys. Oceanogr. 1, 169-179.
- GIANGRANDE A., GAMBI M. C., GRAVINA M. F., 2017. *Paradigm shifts in community ecology: open versus closed units, challenges and limits of connectivity studies*. Mar. Ecol. 38, e12480.
- GLYNN P. W., FEINGOLD J. S., BAKER A., BANKS S., BAUMS I. B., COLE J., COLGAN M. W., FONG P., GLYNN P. J., KEITH I., MANZELLO D., RIEGL B., RUTTENBERG B. I., SMITH T. B., VERA-ZAMBRANO M., 2018. *State of corals and coral reefs of the Galápagos Islands (Ecuador): past , present and future*. Mar. Pollut. Bull. 133, 717-733.
- GOTO K., HONGO C. WATANABE M., MIYAZAWA K., HISAMATSU A., 2019. *Large tsunamis reset growth of massive corals*. Progr. Earth Planet. Sci. 6, 14.
- GRIMSDITCH G. D., SALM R. V., 2006. *Coral reef resilience and resistance to bleaching*. IUCN, The World Conservation Union, 15-16.
- HAGEDORN M., CARTER V. L., HENLEY E. M., VAN OPPEN M. J. H., HOBBS R., SPINDLER R. E., 2017. *Producing coral offspring with cryopreserved sperm: a tool for coral reef restoration*. Scient. Rep. 7, 14432.
- HARII S., KAYANNE H., 2003. *Larval dispersal, recruitment, and adult distribution of the brooding stony octocoral Heliopora coerulea on Ishigaki Island, Southwest Japan*. Coral Reefs 22, 188-196.
- HUGHES T. P., BAIRD A. H., BELLWOOD D. R., CARD M., CONNOLLY S. R., FOLKE C., GROSBURG R., HOEGH-GULDBERG O., JACKSON J. B. C., KLEYPAS J., LOUGH J. M., MARSHALL P., NYSTROM M., PALUMBI S. R., PANDOLFI J. M., ROSEN B., ROUGHGARDEN J., 2003. *Climate change , human impacts, and the coral reef resilience*. Science 301, 929-933.
- HUGHES T. P., KERRY J. T., ÁLVAREZ-NORIEGA M., ÁLVAREZ-ROMERO J. G., ANDERSON K. D., BAIRD A. H., BABCOCK R. C., BEGER M., BELLWOOD D. R., BERKELMANS R., BRIDGE T. C., BUTLER I. R., BYRNE M., CANTIN N. E., COMEAU S. i współaut., 2017. *Global warming and recurrent mass bleaching of corals*. Nature 543, 373.
- KNOWLTON N., 2001. *The future of coral reefs*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 98, 5419-5425.
- MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, 2004. *Coral reefs of Japan*. Japanese Coral Reef Society. Japan.
- MOLICA N. R., GUO W., COHEN A. L., HUANG K. F., FOSTER G. L., DONALD H. K., SOLOW A. R., 2018. *Ocean acidification affects coral growth by reducing skeletal density*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 115, 1754-1759.
- NAKAMURA R., ANDO W., YAMAMOTO H., KITANO M., SATO A., NAKAMURA M., KAYANNE H., OMORI M., 2011. *Corals mass-cultured from eggs and transplanted as juveniles to their native, remote coral reef*. Mar. Ecol. Progr. Ser. 436, 161-168.
- NOTHDURFT L.D., WEBB G. E., 2007. *Microstructure of common reef-building coral genera acropora , pocillopora, goniastrea and porites : constraints on spatial resolution in geochemical sampling*. Facies 53, 1-26.
- PLAISANCE L., CALEY M.J., BRAINARD R. E., KNOWLTON N., 2011. *The diversity of coral reefs: what are we missing?* PLoS One 6, e25026.

- RINKEVICH B., 1989. *The contribution of photo-synthetic products to coral reproduction*. Mar. Biol. 101, 259-263.
- ROBERTS J. M., WHEELER A. J., FREIWALD A., 2006. *Reefs of the deep: the biology and geology of cold-water coral ecosystems*. Science 312, 543-547.
- ROSSI S., 2019. *Precious coral*. [W:] *Oceans in Decline*. ROSSI S. (red.). Springer, 105-116.
- SHARP K. H., SNEED J. M., RITCHIE K. B., MCDANIEL L., PAUL V. J., 2015. *Induction of larval settlement in the reef coral porites astreoides by a cultivated marine roseobacter strain*. Biol. Bull. 228, 98-107.
- SHAO K., LIU W., GAO Y., NING Y., 2019. *The influence of climate change on tsunami-like solitary wave inundation over fringing reefs*. J. Integrat. Environ. Sci. 16, 71-88.
- TANNER E., 1995. *Competition between scleractinian corals and macroalgae : an experimental investigation of coral growth, survival and reproduction*. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 190, 151-168.
- TEH L. S. L., TEH L. C., SUMAILA U. R., 2013. *A global estimate of the number of coral reef fishers*. PLoS One 8, e65397.
- THURBER R. V., WILLNER-HALL D., RODRIGUEZ-MUELLER B., DESNUES CH., EDWARDS R. A., ANGLY F., DINSDALE E., KELLY L., ROHWER F., 2009. *Metagenomic analysis of stressed coral holobionts*. Environ. Microbiol. 11, 2148-2163.
- VAN OPPEN M. J. H., OLIVER J. K., PUTNAM H. M., GATES R. D., 2015. *Building coral reef resilience through assisted evolution*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 112, 2307-2313.
- WEAR S. L., 2016. *Missing the boat: critical threats to coral reefs are neglected at global scale*. Marine Policy. 74, 153-157.
- WILKINSON C. R., 1999. *Global and local threats to coral reef functioning and existence: review and predictions*. Mar. Freshwater Res. 50, 867-878.
- YUYAMA I., HARI S., HIDAKA M., 2012. *Algal Symbiont type affects gene expression in juveniles of the coral acropora tenuis exposed to thermal stress*. Mar. Environ. Res. 76, 41-47.
- ZOHDI E., ABBASPOUR M., 2019. *Harmful algal blooms (red tide): a review of causes, impacts and approaches to monitoring and prediction*. Int. J. Environ. Sci. Technol. 16, 1789-1806.

KOSMOS Vol. 68, 4, 613–620, 2019

ALEKSANDRA A. KOROZA

Department of Invertebrate Zoology and Hydrobiology, Faculty of Biology and Environmental Protection, Lodz University, 12/16 Banacha Str., 90-237 Łódź, E-mail: aleksandra24koroza@gmail.com

CORAL REEF ISSUES CAUSED BY ANTHROPOGENIC AND ENVIRONMENTAL FACTORS

Summary

Nowadays, it is known that human activity of variate kind, e.g. overfishing, might cause great harm like excluding a key-carnivores from the environment or other activities like greenhouse gas emission leading to climate change or drainage of contaminated sewage. The well-known fact is also that coral reefs consist of small invertebrates building colonies-corals which are living in many associations with other organisms e.g. coral depends on *Symbiodinium* for their nutrients supply and instead provide for this algae a shelter and easy-access to light. There are many organisms depended on corals, the habitat they provide and their well-being, e.g. parrotfish-eats corals, some species of sea urchins which may feed on corals but also on algae covering it. The aim of this article is to discuss coral threats and how they might affect them but also possible strategies for corals well-being improvement.

Key words: algae, coral reefs, symbiosis, threats, zooxanthellae