

## Zmiany ekosystemów morskich i lądowych Antarktyki pod wpływem fluktuacji klimatycznych

Andrzej Tatur

Zakład Biologii Antarktyki PAN  
ul. Ustrzycka 10, 02–141 Warszawa

### Wstęp

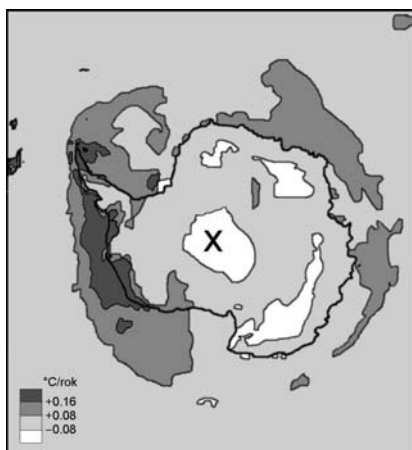
Ustabilizowana i prawie pozbawiona życia czapa lodowa kontynentu Antarktydy jedynie biernie rejestruje w nagromadzonym lodzie wszelkie naturalne, długoterminowe zmiany globalne klimatu, oraz potęgujące się antropogeniczne anomalie występujące w atmosferze Ziemi. Natomiast strefa brzeżna kontynentu antarktycznego, określana klimatycznie jako morska Antarktyka, żywo reaguje na wszelkie, nawet niewielkie i krótkotrwałe zmiany klimatyczne. Pod ich wpływem następują przeobrażenia środowiskowe wywołujące dynamiczne odpowiedzi fauny i flory skupionej na wolnych od lodu fragmentach wybrzeża. Ekosystemy tej ubogiej tundry, silnie sprzężone z ekosystemami morskimi, charakteryzują się (w odróżnieniu od ubogich pod względem biotycznym obszarów kontynentalnej Antarktyki) bogactwem form życia, przy dużym zróżnicowaniu powiązań ekologicznych. Chyba najlepiej poznanym pod względem ekologicznym obszarem lądowym morskiej Antarktyki jest wysunięty najdalej na północ, rejon Półwyspu Antarktycznego i otaczających go wysp. Obszar ten jest łatwo dostępny ze względu na stosunkowo małe zalodzenie i położenie w łagodnym klimacie i dlatego najwcześniej był intensywnie badany przez wiele grup naukowych.

W rejonie Szetlandów Południowych i zachodnich wybrzeży Półwyspu Antarktycznego, holocenińska deglacjacja pojawiła się z opóźnieniem i dopiero około 6 tys. lat temu powstały dość nagle wzdłuż wybrzeży oazy wolne od lodu. Lodowce były głęboko cofnięte do pozycji nawet dalszej niż obecnie, jednak bezpośrednie porównanie rozmiarów deglacjacji jest trudne, gdyż 6 tys. lat temu poziom oceanu był prawie 20 m wyższy niż obecnie i równowaga mas na granicy lodowców i oceanu kształtowała się wówczas odmiennie. Od tamtego czasu powierzchnia oaz znacznie się zwiększyła, lecz nie tyle w wyniku dalszej deglacjacji (istnieją dowody na liczne fluktuacje zasięgu lodowców), co w efekcie glacioizostatycznego wynoszenia wysp o blisko 60 m od początku holocenu i prawie 20 m od holocenijskiego optimum klimatycznego 6–5 tys. lat temu. Dzięki temu wynoszeniu wynurzyły się z oceanu rozległe obszary wyniesionych plaż. Nie ulega jednak wątpliwości, że w ciągu ostatnich 50 lat obserwujemy w Antarktyce Zachodniej wyraźną deglacjację utożsamianą przez wielu z globalnym ociepleniem klimatu. Lody szelfowe i lodowce się cofają, a dane meteorologiczne wskazują na systematyczny wzrost temperatury powietrza.

Odczytywanie przeszłych zmian klimatycznych i ekologicznych w oparciu o cechy utrwalone w profilach torfowych i rdzeniach osadów jeziornych morskiej Antarktyki napotyka niestety na istotne ograniczenia. Tylko w kilku miejscach tego rejonu natrafiono na profile torfowe sięgające 5–6 tys. lat

wstecz. Rdzenie jeziorne bywają wprawdzie starsze, lecz zarówno w przypadku torfów jak i osadów jeziornych wnioskowanie ogranicza prawie całkowity brak pyłków (zwykle znaczących fluktuacje warunków środowiskowych i ustalających chronologię), niewielka różnorodność gatunkowa flory tworzącej torfy lub nie do końca poznane specyficzne wymagania środowiskowe zespołów okrzemek, ważne w odtwarzaniu historii jezior i ich zlewni. Zazwyczaj występują również zasadnicze problemy z wiarygodnością oznaczania wieku metodą radiowęglową.

W miarę systematyczne badania ekologiczne prowadzone są w Antarktyce dopiero od 30 lat. W okresie tym stwierdzono dynamicznie zmieniające się liczebności różnych gatunków roślin i zwierząt, zarówno w morzu jak i na lądzie. Przebieg tych zmian, często zaskakujący rozmiarami, skłania do szukania przyczyn, które te zmiany spowodowały. Wśród wielu możliwych rozważa się również globalne zmiany klimatu Ziemi czy też skromniej, lecz pewniej precyzując przyczynę – wyraźne regionalne ocieplenie klimatu w rejonie Półwyspu Antarktycznego. To regionalne ocieplenie stwierdzone zostało jednoznacznie w pomiarach bezpośrednich jak i w globalnych symulacjach komputerowych (rys. 1). Widocznym jego dowodem jest też bez wątpienia powszechna deglacjacja (Weart 2001, Birkenmajer 2002, Braun i Gossmann 2002, Comiso 2003, Cook i in. 2005) udokumentowana na przestrzeni ostatnich 50 lat licznymi przykładami cofających się i malejących lodowców, wzmożonym rozpadem lodów szelfowych, jak również kurczeniem się pokrywy lodu morskiego i malejącym zasięgiem lodu pakowego wokół Półwyspu Antarktycznego.



Rys. 1. Kierunki zmian temperatury powierzchniowej w rejonie Antarktydy. Wykorzystane dane AVHRR z lat 1981-2000 (mocno uproszczony wykres wg Comiso 2003)

W środowisku antarktycznym istnieje pilna potrzeba znalezienia prostego, dynamicznego wskaźnika abiotycznego, a jeszcze lepiej biotycznego, w oceanie lub na lądzie, który mógłby być wykorzystany do śledzenia przeszłych i obecnych zmian klimatycznych bardziej precyzyjnie i uniwersalnie oraz z większą wrażliwością na czynniki krytyczne dla ekosystemów niż punktowe, konwencjonalne dane meteorologiczne nie dostarczające takich informacji.

Kilkanaście lat temu zaproponowano odtwarzanie zmian klimatyczno-ekologicznych w czasie holocenu na podstawie datowania opuszczonych przez pingwiny terenów lęgowych (Baroni i Orombelli 1994, a potem wielu innych). Założenie było proste (a może nawet za proste). Klimat (rozumiany

w tym wnioskowaniu jako stopień zalodzenia morza) zmusza pingwiny do zmiany miejsc lęgowych, do których ptaki te są zwykle mocno przywiązane. Opracowano nawet kilka modeli klimatycznych holocenu w oparciu o te gęsto datowane materiały organiczne (guano, kości) z opuszczonych kolonii. W dyskusji, jaka się później rozwinęła zwrócono uwagę, że ptaki mogą zrezygnować lub mogą być zmuszone do rezygnacji z zajmowanych terenów lęgowych również z przyczyn ekologicznych (np. choroby lub presja drapieżników) lub morfologicznych. Podczas holocenu brzegi Antarktydy zostały wyniesione kilkadziesiąt metrów w górę w wyniku ruchu glacja-izostatycznego. Tereny dostępne dla gniazdujących pingwinów często stawały się po pewnym czasie niedostępne (np. odcięte stromym klifem), a na nowo utworzonych plażach w innym pobliskim miejscu, warunki do gniazdowania bywały komfortowe. Z przeprowadzonej dyskusji wynika, że rozmieszczenie kolonii pingwinów wprawdzie może, lecz nie musi, być podatne na zmiany klimatyczne (Tatur 2002). Nie była to jedyna porażka. Kolejny prosty wskaźnik biologiczny przeszłych zmian klimatycznych i ekologicznych okazał się niejednoznaczny.

Choć o historii rozwoju krajobrazu antarktycznego, który był zsynchronizowany ze zmianami klimatycznymi w okresie poprzedzającym pojawienie się człowieka wiemy już stosunkowo sporo z badań czysto geologicznych, to o zmianach ekologicznych, które im towarzyszyły wiemy bardzo niewiele. Możliwość uzyskania wiarygodnych informacji ekologicznych z niedalekiej przeszłości została chyba na zawsze stracona, gdyż człowiek dokonał silnej modyfikacji przyrody antarktycznej, zwłaszcza morskiej, zanim zdążył ją poznać. Tak więc obserwowane współcześnie zmiany pozostają bez wiarygodnych wzorców historycznych, z którymi należałoby je skonfrontować.

### **Współczesne ekosystemy morskie podczas zmian klimatycznych**

W morskiej Antarktyce najbardziej spektakularne i jednocześnie szeroko upowszechnione są informacje o zmianach w liczebności ssaków, ptaków, ryb i kryla na przestrzeni ostatnich 230 lat, które wynikają z gospodarczej działalności człowieka. Od końca XVIII wieku ekosystemy morskie Antarktyki modelowane były przez selektywne odławianie określonych gatunków zwierząt, na które był w danym czasie komercyjny popyt (Croxał i Nicol 2004). Liczebności poszczególnych populacji oraz relacje troficzne w całym ekosystemie morskim, zostały już od wielu lat całkowicie zniekształcone (usunięcie jednego elementu, komercyjnie atrakcyjnego w danej chwili, chwycie całym ekosystemem).

Początkowo (w końcu XVIII i w XIX wieku) prawie całkowicie zniszczone zostały kolejno populacja uchatek, słoni morskich (XIX w.), a następnie (głównie w XX wieku) wielorybów, zaczynając od największych, a kończąc na najmniejszych. Stosunkowo niedawno (po roku 1960) przelowane zostały selektywnie ławice ryb, a po intensywnych odłowach kryla w latach 1975–1995 trwają ostatnio dyskusje nad granicami dalszej, bezpiecznej ekologicznie, eksploatacji tego gatunku (Knox 1994, CCAMLR working papers, Antarctic Treaty Conference, Edinburgh 2006). Oprócz zwierząt celowo odławianych chwywane są też, i to niekiedy nawet w dużych ilościach, zwierzęta przypadkowo zaplątane w sieci lub chwytające przynętę na hakach. W ten sposób ginęły i ciągle giną licznie petrele olbrzymie, albatrosy czy uchutki.

W chwili obecnej nie wiemy, jakie były naturalne liczebności populacji poszczególnych gatunków zwierząt morskich w Antarktyce zanim pojawił się tam człowiek i jakie byłyby one w chwili obecnej, gdyby nie było antropopresji i czy zaniechanie odłowów spowodowałoby powrót ekosystemów do stanu pierwotnego (Knox 1994). Z powyższych powodów trudno jest ocenić czy obserwowane w ostatnich latach zmiany ekologiczne w morskiej Antarktyce wynikają ze spontanicznej

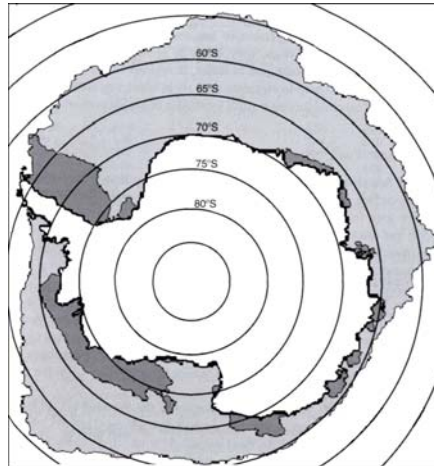
reakcji na selektywną i zmienną w czasie eksploatację zasobów żywych Oceanu Południowego w bliższej i dalszej przeszłości, czy też są odpowiedzią na zmiany środowiskowe, w tym również i na zmiany klimatyczne (Hughes 2000, Weimerskirch i in. 2003).

Jeszcze kilkanaście lat temu obserwowany wyraźny wzrost liczebności pingwinów Adeli (*Pygoscelis adeliae*), a następnie też krabojadów, tłumaczony był nadwyżką pokarmu (kryła) nie zjedzonego przez nadmiernie odłowione wieloryby (Knox 1994). Jednak w następnych latach stwierdzono istotną statystycznie tendencję zmniejszania się liczebności zarówno pingwinów Adeli i pingwinów antarktycznych (Ciaputa i Sierakowski 1999) jak i płetwonogich: fok Weddella i krabojadów (Salwicka i Rakusa-Suszczewski 2002). Tendencja ta obserwowana była zarówno na wyspie Króla Jerzego, gdzie w ostatnich latach przybrała wymiar katastroficzny (dane niepublikowane Zakładu Biologii Antarktyki PAN), jak i w Archipelagu Palmera przy Półwyspie Antarktycznym (Gross 2005), gdzie udokumentowane jest zmniejszenie się na przestrzeni ostatnich 30 lat populacji gniazdujących pingwinów Adeli o 70%, oraz prawie całkowite zniknięcie obecnych tam poprzednio pingwinów cesarskich. Fakty te wymagają rozważenia również wpływu innych czynników komplikujących uproszczone poprzednio zależności ekologiczne, które próbowały powiązać zmiany liczebności tych zwierząt bezpośrednio z działalnością gospodarczą człowieka. Niektóre stwierdzone zmiany w liczebności kręgowców antarktycznych mogą w pewnym stopniu być tłumaczone, oprócz antropopresji, również przez nieprzewidywalne katastroficzne zdarzenia środowiskowe lub biologiczne. Jednakże z przeprowadzanych wieloletnich badań monitoringowych wynika coraz wyraźniejszy związek pomiędzy zmianami ekologicznymi a zmianami klimatycznymi, w tym zwłaszcza z regionalnym ociepleniem w rejonie Półwyspu Antarktycznego.

W ostatnich latach utrwala się przekonanie, że za istotne zmiany ekologiczne zachodzące w rejonie Półwyspu Antarktycznego odpowiedzialne jest połączone oceaniczno-atmosferyczne zjawisko El Niño/Southern Oscillation (ENSO), które powoduje globalne zaburzenia klimatyczne, w tym także w Antarktyce, gdzie sprzężone jest z quasi-stacjonarnym Dipolem Antarktycznym zlokalizowanym w atlantyckiej i pacyficznej części Antarktyki (Yuan 2004, Parkinson 2004). Podczas występowania ciepłego zdarzenia ENSO inicjowanego przez El Niño, Antarktyczny Dipol (ADP) trwający przez 3–4 sezony po uruchomieniu przez siły zjawiska El Niño/ENSO, charakteryzuje się wysoką temperaturą i niewielkim zalodzeniem oceanu w sektorze pacyficznym oraz niską temperaturą i wysokim zalodzeniem w sektorze atlantyckim. Natomiast podczas zimnego, normalnego stanu ENSO stabilizowanego przez zjawisko La Niña, rozkład temperatury i zalodzenia układu się w Dipolu Antarktycznym odwrotnie. Opisana zależność komplikowana jest przez „Antarctic Circumpolar Wave”, hipotetyczny system zablokowanych anomalii w ciśnieniu atmosferycznym na poziomie morza, z „Circumpolar Deep Water”, który uruchamiany Prądem Wokółantarktycznym przemieszcza „falę anomalii” wokół Antarktydy w cyklu 8–10 letnim (Warren White, [http://jedac.ucsd.edu/ACW/index\\_research.html](http://jedac.ucsd.edu/ACW/index_research.html)). Sekwencja opisanych zjawisk powoduje globalne konsekwencje klimatyczne i kształtuje również klimat Antarktyki, a w ostatnich latach prowadzi do mniejszego zalodzenia indyjskiego sektora Oceanu Południowego (Weimerskirch i in. 2003), a także Oceanu Południowego po zachodniej stronie Półwyspu Antarktycznego (Cook i in. 2005, Gross 2005), czemu towarzyszy wzrost temperatury sięgający blisko 0.3°C w ciągu ostatnich 20 lat, podczas gdy poza strefą konwergencji w tym samym okresie temperatura nie uległa prawie żadnym zmianom (Comiso 2003).

Sezonowo zmienny zasięg pokrywy wieloletnich, jednorocznych lodów morskich, lodu pako-owego i otwartego morza (rys. 2), wyznacza strefy występowania charakterystycznych ekosystemów. Pod wpływem systematycznego kurczenia się pokrywy lodów morskich na przestrzeni ostatnich

kilkudziesięciu lat, następuje na terenie morskiej Antarktyki przemieszczenie się w kierunku południowym wszystkich wymienionych środowisk wraz z charakterystycznymi dla nich ekosystemami (Weimarskirch i in. 2003).



Rys. 2. Zasięg pokrywy lodu morskiego wokół Antarktydy latem (ciemnoszary) i zimą (jasnoszary). Uproszczony wykres Arrigo (2003)

Odmienność ekosystemów związanych ze środowiskiem otwartego oceanu w porównaniu z tymi, które przywiązane są do środowiska lodowego, zaznacza się zarówno na niższych poziomach troficznych jak i w składzie kręgowców (Knox 1994). Strefa lodu pakowego będąca zarazem strefą frontu oceanograficznego (marginal ice edge zone) jest środowiskiem bardzo żyznym, zapewniającym komfort pokarmowy dla wszystkich organizmów, które w efekcie adaptacji i ewolucji potrafią wykorzystać jej walory. Jest to strefa charakteryzująca się podwyższoną produktywnością i to z wielu powodów zarówno biotycznych jak i abiotycznych (Knox 1994). Występują w tej strefie znaczne ilości fitoplanktonu, zarówno wnoszonego wraz z topniejącym latem lodem pakowym jak i tworzącego się z zakwitów *in situ*. (Grose i McMinn 2003, Arrigo i Thomas 2004). Fitoplankton uwolniony z topniejącego lodu inicjuje w nowym sezonie letnim produkcję pierwotną w wodach powierzchniowych oceanu, wysłodzonych wodami pochodzącymi z topniejącej latem i zanikającej w kierunku południowym pokrywy lodów morskich (Myung i in. 1999).

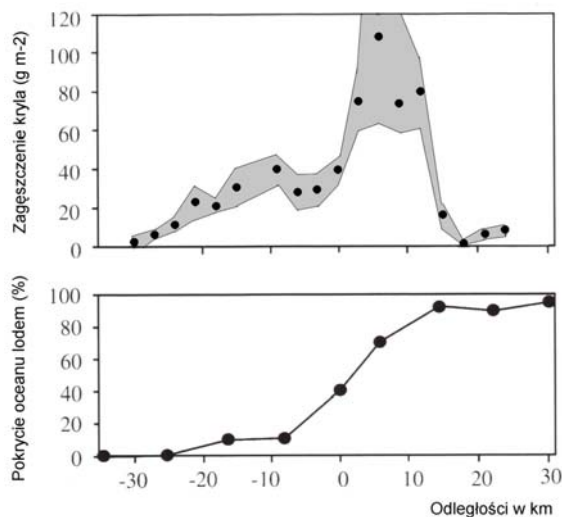
W tej właśnie strefie oceanu, w pasie o szerokości około 250 km od krawędzi pokrywy lodów morskich, biomasę fitoplanktonu szacuje się na 33–40% całkowitej produkcji Oceanu Południowego (za Ligowskim 1998). Wiadomo również, że zakwity te rozwijają się ze zmiennym nasileniem w kolejnych latach i z bliżej niewyjaśnionych przyczyn, rozkład biomasy fitoplanktonu w kolumnie wody bywa nieporównywalny pomiędzy poszczególnymi latami (Basterretxea i Aristegui 1999), a wyraźnie niższe od spodziewanych stany biomasy fitoplanktonu pojawiają się w tej strefie 2–3 krotnie w dekadzie (Knox 1994).

Zespół kręgowców charakteryzujący strefę lodu pakowego posiada wprawdzie wysoką liczebność, lecz stosunkowo małe zróżnicowanie gatunkowe. Wśród ptaków najliczniejszymi są pingwiny Adeli i petrele śnieżne, a wśród ssaków krabojady, lamparty morskie, foki Rossa, foki Weddella

oraz płetwale karłowate. Ekosystemy morskie otwartego oceanu są bardziej urozmaicone gatunkowo i są spowinowacone z fauną subantarktyczną z charakterystycznym pingwinem złotoczubym, gołębiem przylądkowym, uchatką, słoniami morskimi i wielkimi waleniami.

Z pokrywą lodu morskiego związane są nierozdzielnie juvenilne formy kryla żerujące pod nią co najmniej przez 6 lat aż do osiągnięcia formy ostatecznej (imago). Natomiast dorosłe osobniki skupiają się powszechnie także w ławicach poza strefą lodu pakowego, na wolnym od lodu oceanie. O rozmieszczeniu w Oceanie Południowym dojrzałego kryla (kluczowego pokarmu dla ekosystemów Antarktyki) decyduje według wielu badaczy przede wszystkim bierne przemieszczanie z Prądem Wokółantarktycznym, a związek przestrzenny występowania kryla z pokrywą lodów morskich, jak również z pakiem lodowym, zostaje zerwany (Godlewska i Rakusa-Suszczewski 1998, Knox 1994, Hofmann i Murphy 2004). Lokalne skupiska spotykane w strefie lodu pakowego są przez ptaki bezbłędnie rozpoznawane, odróżniają one fizyczne cechy tych partii paku lodowego (gruby, wieloletni lód), z którym związana jest zwykle obfitość pokarmu (Knox 1994).

Nie wszyscy badacze zgadzają się jednak z poglądami przyjmującymi jedynie bierne przemieszczanie się dorosłych osobników kryla. Wzrasta ilość dowodów pozwalających twierdzić, że populacja kryla zachowuje się również według mądrości ekologicznej pozwalającej jej pozostać w strefie dostępnego pokarmu i w środowisku pozwalającym zmniejszyć szanse żerujących na nim drapieżników (Schnack-Schiel 2003). Podczas zimy dorosłe osobniki kryla występują rozproszone w kolumnie wody wyłącznie na obszarach pokrytych lodem, koncentrując się w większej ilości na skraju pokrywy lodowej. Natomiast latem, wyraźna jego koncentracja występuje pod lodem, w wąskim paśmie (do 13 km) na skraju pokrywy lodowej i na bezpośrednim jej przedpolu, w strefie zalodzenia powyżej 40% pokrycia oceanu (rys. 3). Z rozpadającej się i topniejącej pokrywy lodowej uwalniane są wówczas olbrzymie ilości fitoplanktonowego pokarmu kryla. Taki właśnie model rozkładu kryla uzyskano na morzu Weddella przy monitoringu akustycznym uzyskanym przy zastosowaniu autonomicznego pojazdu podwodnego Autosub-2 (Brierley i in. 2002). Kryl nie gromadzi się bezpośrednio pod lodem jednorocznym, ponieważ lód ten nie zawiera jeszcze zasobów



Rys. 3. Rozmieszczenie kryla latem na brzegu pokrywy lodowej Morza Weddella (za: Brierley i in. 2002)

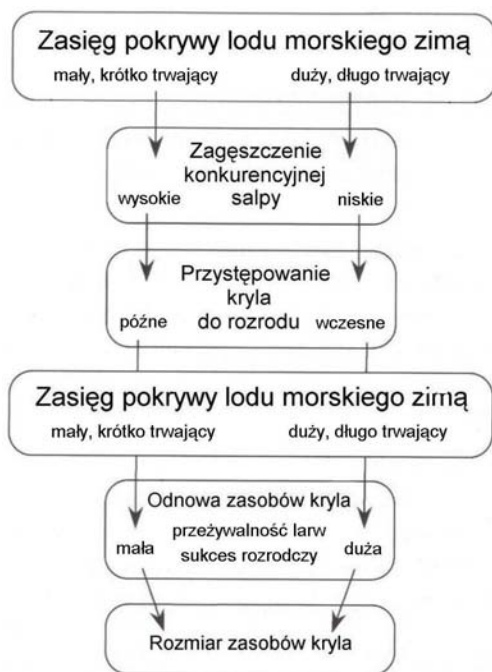
pokarmowych lub są one niedostępne pod nowo narastającym lodem, nie posiada też rozwiniętej powierzchni spodniej pozwalającej ukryć się przed drapieżnikami. Kryl preferuje spękany lód wieloletni posiadający te walory środowiskowe.

Tak więc choć zasięg pokrywy lodów morskich i paku lodowego ma trudny do sprecyzowania związek ilościowy z rozmieszczeniem dorosłego kryla w Oceanie Południowym, to i tak całkowita jego produkcja, tworząca zasoby pokarmowe dla całego ekosystemu morskiej Antarktyki, wynika bezpośrednio z istnienia, kontrolowanej przez klimat, pokrywy lodu morskiego. Pod nią muszą dojrzeć jego formy juvenilne, i z której walorów środowiskowych korzysta także, przynajmniej częściowo, kryl dorosły (Loeb i in. 1997, Schnack-Schiel 2003). Populacja kryla jest przy tym wrażliwa nie tylko na zmiany zasięgu pokrywy lodu morskiego, lecz także na rytm jej tworzenia i zanikania (Quetin i Ross 2001).

Populacja kryla (głównego pokarmu w ekosystemach antarktycznych) jest więc silnie uzależniona od rozprzestrzenienia lodu morskiego i w pełni uzasadnione jest stwierdzenie, które wypowiedział Fraser (za Gross 2005), że „*sea ice is the engine that drives Antarctic ecosystems*”. Należy tu zaznaczyć, że według Atkinsona i in. (2004), populacja kryla zmniejszyła się w ostatnich 30 latach o 80%, podobne zmiany zaobserwowano również w rejonie półwyspu Antarktycznego (Siegel i Loeb 1995, Loeb i in. 1997). Tak duża redukcja populacji kryla tylko częściowo może być tłumaczona zwiększonym nasileniem połowów. Według obu wymienionych badaczy (za Gross 2005) tak drastyczne zmiany liczebności mają bez wątpienia związek z dynamiką zalodzenia oceanu, a zwłaszcza z kurczeniem się strefy zalodzonej związanej z ociepleniem regionu.

Jednak sama redukcja powierzchni lodu morskiego, nie mogłaby spowodować zasadniczej zmiany w liczebności populacji kryla, który występuje w plamście rozłożonych skupieniach wzdłuż skraju lodu. Oceniano, że 25% redukcji pokrywy lodowej, towarzyszy zaledwie 9% zmniejszenie się jej linii brzegowej. Wydaje się, że dopiero zrozumienie wpływu ocieplenia i kurczenia się pokrywy lodowej na funkcjonowanie całego ekosystemu morskiego prowadzi do przekonywującego wyjaśnienia problemu (Loeb i in. 1997, Siegel 2000). Zależności w ekosystemach rządzą się ściśle określonymi prawami i akcelerację zmian liczebności kryla w porównaniu do konkurującej z nim o pokarm salpy (galaretowatego bezkręgowca otwartego oceanu), następuje nie tyle w wyniku bezpośredniej odpowiedzi na zmianę temperatury lub zalodzenia, lecz w efekcie zależności ekologicznych, które można zaobserwować dopiero po kilku kolejnych latach utrzymywania się określonej tendencji klimatycznej (rys. 4). Mniej rozległe i trwające krócej zalodzenie oceanu sprzyja ekspansji salpy, natomiast dłuższe i bardziej rozległe zalodzenie, ekspansji kryla (Ainley i in. 2003).

Mniejsze zalodzenie oceanu sprzyja też pojawieniu się w pewnych rejonach Szetlandów Południowych oraz Półwyspu Antarktycznego stosunkowo większej ilości gniazdujących pingwinów maskowych (*Pygoscelis antarctica*) i białobrewych (*Pygoscelis papua*), które lepiej radzą sobie w oceanie wolnym od lodu niż pingwiny Adeli (*Pygoscelis adelliae*). Pingwiny Adeli żerują zwykle w lodzie pakowym lub na jego skraju (Fraser i in. 1992) i są mocno przywiązane do krylowego pożywienia, które zanika ostatecznie na koszt masowo pojawiającej się w jego miejsce salpy, omijanej przez nie przy konsumpcji (Loeb i in. 1997, Siegel za Gross 2005). Pingwiny maskowe i białobrewe nie posiadają tak wąskiej wybiórczości pokarmowej i przy braku innego pożywienia konsumują także salpę. Stosunki liczebności pomiędzy pingwinami Adeli a maskowymi i białobrewymi rozważane są więc jako proste wskaźniki ekologiczne ściśle powiązane ze zmianami klimatu (Fraser i in. 1992). Wskaźniki te w rejonie amerykańskiej stacji Palmer potwierdzają obserwowane ocieplenie. Przy stacji Arctowskiego układają się one jednak odwrotnie od oczekiwań (Ciaputa i Sierakowski 1999).



Rys. 4. Ekologiczne skutki zmiennego zalodzenia oceanu dla populacji kryla.  
Zmodyfikowany wykres Siegela (2000)

Być może udokumentowana w ostatnich sezonach zmniejszona liczebność pingwinów z gatunku *P. adeliae* i niektórych fok na terenach lęgowych wyspy King George i Archipelagu Palmera jest już sygnałem nasilonej migracji określonych gatunków w kierunku południowym, sterowanej zmianami klimatu (Hughes 2000, Weimerskirch i in. 2003). Należałoby oczekiwać, że gatunki te skolonizują nowe tereny położone bliżej kontynentu antarktycznego, o warunkach pokarmowych i środowiskowych, korzystniejszych dla przemieszczających się populacji. Jak dotąd sygnałów takich nie ma, a więc można się raczej spodziewać, w konsekwencji dłużej trwających zmian, raczej redukcji populacji rozpatrywanych gatunków, a nie przemieszczenia.

Analizując wpływ zmieniającego się klimatu na dynamikę liczebności populacji kręgowców należy zwrócić także uwagę na proste zależności bezpośrednio wynikające z praw fizycznych. Wysokie zalodzenie, poprzedzające sezon lęgowy pingwinów, może ograniczyć ilość osobników przystępujących do gniazdowania (Trathan i in. 1996). W inicjalnym momencie cyklu rozrodczego tereny lęgowe były niedostępne. Natomiast zbyt szeroka strefa lodów morskich w okresie najintensywniejszego karmienia piskląt ogranicza sukces lęgowy pingwinów Adeli (Ainley i in. 1998), a zimowe zalodzenie może zmniejszyć przeżywalność dorosłych osobników np. wąskodziobego priona (*Pachyptila belcheri*) w Subantarktyce (Nevoux i Barbraud 2006). Rozległa pokrywa lodowa we wschodniej Antarktyce sprzyja zwiększeniu populacji pingwinów cesarskich, podczas gdy zwiększona strefa paku lodowego faworyzuje pingwiny Adeli.

Istnieje też wiele obserwacji, które nie doczekały się zadawalającego wyjaśnienia. Nie wiadomo dlaczego podczas zjawiska El Nino ilość rodzących się fok Weddella nad morzem Rossa jest mniejsza, niższa jest też masa odstawianych od karmienia słoni morskich na wyspie Króla Jerzego.



Niektóre gatunki typowe dla paku lodowego morskiej Antarktyki (krabojady, lamparty morskie) mają swój cykl biologiczny w bliżej nieokreślony sposób związany z wokółantarktyczną falą (ACW) przesuwająca się w kierunku wschodnim wokół Antarktydy w cyklu 4–5 letnim (Ainley i in. 2003). Kurczenie się strefy zalodzonej Oceanu Południowego może też, według niektórych badaczy, spowodować przemieszczenie się produkcji pierwotnej z zanikającej pokrywy lodu morskiego na dno oceanu. Przemieszczenie takie naruszyłoby jednocześnie równowagę ekologiczną istniejącą pomiędzy głównymi producentami: fitoplanktonem, makro-algami i mikro-algami bentosowymi co w konsekwencji mogłoby zaburzyć równowagę w całym ekosystemie morskiej Antarktyki (McMinn 2005).

Wszystkie przedstawione rozważania, dotyczące wpływu klimatu na strukturę populacyjną ekosystemów morskich Antarktyki dokonywane są jak do tej pory w oparciu o badania lokalne, prowadzone w ograniczonej przestrzeni i czasie. Wieloletnie dane ekologiczne o charakterze regionalnym, uzyskiwane są w Antarktyce z dużym trudem. Tylko systematyczne i wieloletnie badania typu monitoringowego pozwolą w przyszłości zweryfikować wiele przedstawionych hipotez dotyczących związków ekosystemów morskich Antarktyki z klimatem.

Dość oczywistym efektem deglacjacji nasilającej się w ostatnich latach w rejonie Półwyspu Antarktycznego, jest powstawanie środowiska o łatwych do przewidzenia cechach odmiennych od dotychczasowych. Ten fakt inspiruje wielu badaczy, którzy w oparciu o badania ekologiczne i fizjologiczne są w stanie prognozować zachowanie się poszczególnych gatunków, oraz całych ekosystemów w środowisku zmienionym w wyniku ocieplenia.

W efekcie deglacjacji odsłaniają się nowe obszary dna na przedpolu cofających się setki metrów czoł lodowców. Obszary te gotowe są na zasiedlenie przez wkraczającą z otoczenia faunę bentosu morskiego, której bioróżnorodność i liczebność jest często wyższa niż w innych częściach oceanu światowego, uważanych za żyzne i urozmaicone przyrodniczo (Clarke i in. 2004). Można więc przewidywać, że kolonizacja nowo odsłoniętego dna morskiego w strefach przybrzeżnych będzie kontynuacją procesu powtarzającego się w kolejnych interglacjalach podczas Czwartorzędu (Clarke i Crame 1992) i kontynuowanego w holocenie od 10 tysięcy lat.

Trudniejsze do przewidzenia są jednak w szczegółach skutki ekologiczne jakie mogą zostać spowodowane nagłym pojawieniem się w przybrzeżnym środowisku morskim znacznej, większej niż kiedykolwiek przedtem, ilości słodkich i ciepłych wód roztopowych zasobnych w zawiesinę mineralną (Rakusa-Suszczewski 1996). Większość bezkręgowców Oceanu Południowego to organizmy wrażliwe na wszelkie zmiany temperatury i zasolenia. Nawet niewielkie zmiany tych parametrów powodują zaburzenia w funkcjach fizjologicznych i/lub śmierć tych organizmów. Również zawiesina mineralna źle tolerowana jest przez organizmy morskie, zwłaszcza przez filtratory i makrofity. Szczegółowe badania polowe i laboratoryjne nad granicami tolerancji organizmów morskich na wpływ wymienionych czynników stresowych, oraz przeniesienie tych doświadczeń na prognozy dotyczące zmian w strukturze ekosystemów morskich pod wpływem przewidywanego ocieplenia, planowane są przez polski zespół w nadchodzącym IV Międzynarodowym Roku Polarnym.

Charakterystycznym geomorfologicznym i ekologicznym obiektem tworzącym się przy deglacjacji sprzężonej z glacjiostatycznym wynoszeniem łądu, są brakiczne laguny powstające na przedpolu lodowców (Marsz 1987, Rakusa-Suszczewski 1995, Siciński i in. 1996). Od morza oddziela je częściowo morena czołowa cofniętego lodowca lub kosa plażowa. Od strony łądu podparte są lodowcem wprowadzającym do lagun wody roztopowe bogate w zawiesinę mineralną. Laguny te często zasilane są przez olbrzymie ilości makroglonów wrzucanych do nich podczas silnych sztormów. To źródło intensywnie rozkładającej się materii organicznej stwarza specyficzne warunki

troficzne i w konsekwencji ekologiczne (Siciński i in. 1996), których odmienność może być prawdopodobnie niekiedy wzmacniana meromiksją (odtlenione słone wody denne i natlenione słodkie wody powierzchniowe). Podobne laguny występowały również podczas przeszłych holoceńskich deglacjacji i zostały w ciągu kilku tysięcy lat przekształcone w jeziora zlokalizowane na wyniesionych do 16 m plażach, za dawnymi wałami burzowymi (Tatur 1886, Martinez-Macchiavello i in. 1996).

### **Współczesne ekosystemy lądowe podczas zmian klimatycznych**

Ekosystemy lądowe w morskiej Antarktyce pokrywa miejscami uboga flora tundry antarktycznej z dominacją porostów w suchych miejscach, a mchów, wątrobowców oraz glonów na wilgotniejszych stanowiskach. Występują też, na stanowiskach o najwyższych walorach środowiskowych, dwie rodzime rośliny kwitnące: *Colobanthus quitensis* i *Deschampsia antarctica*. Zbiorowiska tworzące tundrę antarktyczną scharakteryzowane zostały przez Olech (2002) w gradiencie wilgotnościowo-troficznym. Flora i fauna tworząca ekosystemy tundry antarktycznej może dostarczyć licznych czułych wskaźników ekologicznych waloryzujących zachodzące zmiany środowiskowe, zarówno klimatyczne jak i fluktuacje natężenia promieniowania UV-B (Convey 2003, Gerighausen i in. 2003, Karentz 2003). Jednak aby wskaźniki wytypować i aby nabrały one wartości ilościowych, konieczne jest prowadzenie żmudnych, wieloletnich badań monitoringowych kontrolujących dynamiczne procesy kolonizacji w nowo powstających ekosystemach (Cannone i Guglielmin 2003).

Deglacjacja powszechnie obserwowana w archipelagu Szetlandów Południowych odsłania spod lodu nowe „abiotyczne” tereny. Na przedpolu lodowca, na nowo utworzone i pozostawione moreny czołowe i brzeżne cofających się lodowców, oraz na nowo wyniesione plaże morskie w efekcie ruchów glacio-izostacyjnych, stopniowo wkraczają zbiorowiska tundry. Powszechnie obserwowana kolonizacja nowo utworzonych środowisk jest najbardziej charakterystyczną cechą współczesnych ekosystemów lądowych morskiej Antarktyki i jest to bez wątpienia efekt regionalnego (globalnego?) ocieplenia. Tempo sukcesji poszczególnych gatunków i stopniowe kształtowanie się ekosystemu tundry może być tu śledzone *in vivo*, dostarczając klucza do rekonstrukcji zmian ekologicznych jakie miały miejsc w przeszłości (Convey 2003, Gerighausen i in. 2003). Pojawia się w tym momencie również pytanie łączące się z klimatem: czy nowo powstałe zespoły będą tożsame z tymi, które poprzednio w analogicznych miejscach się kształtowały, czy też będą to zespoły o zdefiniowanych cechach charakterystycznych, być może związanych ze zmianami klimatycznymi?

Ekosystemy lądowe w morskiej Antarktyce kształtowane są przy silnym oddziaływaniu kręgowców (ssaków i ptaków) morskich okresowo wychodzących na ląd w czasie rozmnażania, linienia i odpoczynku. Zmniejszenie się liczebności tych zwierząt na terenach lądowych, jeśli będzie trwałe, spowoduje również stopniowe przekształcanie zasobnych w nutrieny ekosystemów pozostających pod wpływem silnego nawożenia w ubogie ekosystemy typowej tundry antarktycznej (Tatur i in. 2002).

Mniej eksponowanym w literaturze, choć wysoce prawdopodobnym w praktyce, efektem ocieplenia klimatu może być zjawisko osuszania obszarów podmokłych (lokalnych mszarów), głównie w efekcie zniknięcia strumieni zasilających te ekosystemy. Strumienie te czerpały wody z intensywnie topniejących w ostatnim czasie odnóg lodowców, lokalnych płatów martwego lodu i śniegu. Wiele lokalnych źródeł wód roztopowych całkowicie zniknęło i mszary takie, podobnie jak ten w bezpośrednim sąsiedztwie stacji Arctowskiego, dramatycznie wysychają. Należy też zauważyć, że o ile zmiany temperatury powietrza na terenie morskiej Antarktyki doczekały się wielu wiary-

godnych opracowań, to badania dotyczące pomiarów opadów są ciągle uważane za kłopotliwe metodycznie, a ich wyniki jako mało wiarygodne. Dlatego też nie wiemy do końca, czy regionalnemu ociepleniu Półwyspu Antarktycznego nie towarzyszy czasem regionalne stepowanie. Na taki kierunek procesów wskazywałyby obserwacje poczynione na wolnych od lodu fragmentach lądu w Zatoce Admiralicji na wyspie Króla Jerzego (Szetlandy Południowe).

Wraz ze zmianami klimatycznymi, udokumentowanymi w rejonie Półwyspu Antarktycznego, można się spodziewać wystąpienia w tundrze antarktycznej nowych gatunków inwazyjnych, które są w stanie przetrwać, i co jeszcze ważniejsze, rozmnażać się i rozszerzać zakres swojego występowania w nowych warunkach środowiskowych. Są to cechy charakteryzujące gatunki wskaźnikowe, które mogą informować o postępujących zmianach klimatycznych. W środowisku antarktycznym, a zwłaszcza subantarktycznym, zidentyfikowano szereg takich gatunków (Olech 1996, Lewis-Smith 2003), lecz ich wskaźnikowa rola nie do końca jest przekonywująca. Są to najczęściej gatunki, które zostały na teren Antarktyki zawleczone przez człowieka i rozprzestrzeniają się tam zwykle od miejsca pierwszej introdukcji. Pozostaje niewyjaśniona kwestia: czy rozprzestrzeniałyby się równie skutecznie, gdyby dostały się do Antarktyki w strefę pozostającą poza bezpośrednim wpływem działalności człowieka, no i dalsze pytanie: czy w ogóle miałyby szansę się tu dostać naturalną drogą?

Izolacja Antarktyki jest jednak dość skuteczna, ale skoro zarówno *Deschampsia antarctica* jak i *Colobanthus quitensis*, rośliny nie posiadające żadnych specyficznych mechanizmów adaptacyjnych do zimnego klimatu, dostały się do niej i to co najmniej w środkowym holocenie, to dlaczego przez kilka następnych tysięcy lat nie miałyby dotrzeć również nasiona innych powszechnych gatunków. Jednakże docierające gatunki nie były prawdopodobnie w stanie, z bliżej niesprecyzowanych przyczyn, utrzymać się w nowym środowisku (Lewis-Smith 2003). Próby introdukcji gatunków antarktycznych poza granice naturalnych zasięgów skończyły się także niepowodzeniem (Kappen i Schroeter 2002). Do gatunków, które wydawałoby się, że mogą skolonizować również morską Antarktykę należą np. *Cerastrium fontanum* występujące obecnie przy stacji chińskiej Great Wall, *Poa annua* zawleczona na stację Arctowskiego przed rokiem 1985 (Olech 1996) oraz *Poa annua* i *Poa pratensis* na wyspie Deception (Kappen i Schroeter 2002). Przykłady te świadczą, że kolonizacja jest możliwa, pozostaje jednak pytanie na jak długo? Próbę odpowiedzi na to pytanie komplikuje dodatkowo fakt, że zawleczenie „obcych” gatunków przez człowieka zbiegło się z postępującym w tym rejonie ociepleniem, co również mogło przyczynić się według Olech (2006) do ich względnego sukcesu kolonizacyjnego. Pytania powyższe prowokują podjęcie badań fizjologicznych, genetycznych i ekologicznych nad tymi zagadnieniami, w ścisłym powiązaniu ze zmianami klimatycznymi.

Na kontynencie antarktycznym, w warunkach suchego i zimnego klimatu kontynentalnego, tundra praktycznie nie występuje. Życie skupione jest przy wodzie (strumieniach, wysiękach wodnych ze zwierzelin i w jeziorach), gdzie tworzy maty mikrobialne. Na lądzie można spotkać jedynie kilku gatunków mchów oraz nieco większą ilość rozproszonych porostów. Cechą typową dla kontynentu jest występowanie zespołów glonów i grzybów endolitycznych. Wokół kolonii ptasich występują efemeryczne nagromadzenia koproflagicznego glonu *Prasiola crispa*.

Póki co, efekt zmian klimatycznych jest trudny do oceny w środowisku Antarktydy, przede wszystkim dlatego, że kierunku tych zmian na samym kontynencie (poza rejonem Półwyspu Antarktycznego) jeszcze nie udokumentowano. Jeśli jednak zmiany takie wystąpią, i będzie to ocieplenie klimatu ze wzmożoną deglacją, to najbardziej zagrożone będą chyba bardzo wrażliwe na

wszelkie zmiany środowiskowe maty mikrobialne występujące na dnie wielu jezior pokrytych lodem. Stopienie lodu jeziernego i destrukcja trwałej, choć odwróconej, stratyfikacji termicznej, mogłaby doprowadzić do bezpowrotnego zniszczenia tych wrażliwych ekosystemów. Należy też spodziewać się wzmożonej kolonizacji terenów Antarktyki przez roślinność, która obecnie występuje dopiero w morskiej Antarktyce. Możliwe do realizacji scenariusze przebiegu zmian ekologicznych w ekosystemach lądowych kontynentu antarktycznego pod wpływem ocieplenia klimatu mogą więc być co najwyżej przedmiotem inspirujących dywagacji teoretycznych (Hogg i Stevens 2002, Tatur 2002).

## Podsumowanie

Wydaje się, że posiadamy więcej wiarygodnych informacji o przeszłych, geologicznych, niż o obecnych relacjach pomiędzy zmianami klimatu a przyrodą Antarktyki. Wynikać to może z większych kontrastów klimatycznych i przyrodniczych stwierdzanych jak dotąd w zapisach geologicznych utwalonych w skałach oraz z faktu, że obecne relacje pomiędzy przyrodą a klimatem zakłóca trudna do waloryzacji presja człowieka, oraz duża ilość innych mniej lub bardziej poznanych czynników mogących modulować oddziaływanie klimatu. Należy też mieć na uwadze fakt, że zmiany klimatu i zalodzenia nie tylko bezpośrednio wpływają na liczebność populacji ryb, ptaków i ssaków. Najgroźniejsze dla przyszłości ekosystemów antarktycznych mogą okazać się, zainicjowane przez zmiany klimatu, lecz trudne do przewidzenia, zasadnicze zmiany ekologiczne zwłaszcza te na najniższych poziomach piramidy troficznej. Wymienione problemy staną się przedmiotem badań Zakładu Biologii Antarktyki realizowanych w projektach międzynarodowych zbliżającego się IV Międzynarodowego Roku Polarnego.

Wszelkie hipotezy ekologiczne dotyczące współczesnych relacji pomiędzy jakością i liczebnością roślin oraz zwierząt w Antarktyce a zmianami klimatu, obarczone są jednak dużą niepewnością. Zmniejszyć tę niepewność mogą tylko dalsze systematycznie prowadzone badania ekosystemów morskiej Antarktyki, w których przez większą część roku temperatura oscyluje około magicznej wartości zera stopni Celsjusza. Są to ekosystemy szczególnie wrażliwe na zmiany klimatyczne i dlatego wieloletni monitoring klimatyczno-ekologiczny powinien być i będzie prowadzony na tych właśnie obszarach, w tym również na Stacji Polskiej Akademii Nauk im. Henryka Arctowskiego

## Literatura

- Ainley D.G., Tynan C.T., Stirling I., 2003, Sea ice: a critical habitat for polar marine mammals and birds. [w:] Thomas`D.N., Dieckmann G.S. (red.), Sea ice. An Introduction to its Physics, Chemistry, Biology and Geology. Blackwell, Berlin: 240–266.
- Ainley D.G., Wilson P.R., Barton K.J., Ballad G., Nadav Nur, Karl B., 1998, Diet and foraging effort of Adelie penguins in relation to pack-ice conditions in the southern Ross Sea. *Polar Biology*, 20: 311–319.
- Atkinson A., Siegel V., Pakhomow E., Rothery P., 2004, Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature*, 432: 100–103.
- Arrigo K.R., 2003, Primary production of sea ice. [w:] Thomas`D.N., Dieckmann G.S. (red.), Sea ice. An Introduction to its Physics, Chemistry, Biology and Geology. Blackwell, Berlin: 143–183.
- Arrigo K.R., Thomas D.N., 2004, Large scale importance of sea ice biology in the Southern Ocean. *Antarctic Science*, 16 (4): 471–486.
- Baroni C., Orbelli G., 1994, Abandoned penguin rookeries as Holocene indicators in Antarctica. *Geology*, 22: 23-26.

- Basterretxea G., Aristegui J., 1999, Phytoplankton biomass and production during late austral spring (1991) and summer (1993) in the Bransfield Strait. *Polar Biology*, 21: 11–22.
- Birkenmajer K., 2002, Retreat of Ecology glacier, Admiralty Bay, King George Island (South Shetlands, West Antarctica), 1956-2001. *Bulletin of Polish Academy of Science, Earth Science*, 50 (1): 15–29.
- Braun M., Gossmann H., 2002, Glacial changes in the area of Admiralty Bay, Potter Cove, King George Island, maritime Antarctica. [w:] Beyer L. i Bölter M. (red.), *Geoecology of Antarctic ice-free coastal landscapes*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York. *Ecological Studies* 154: 75–90.
- Brierley A.S., Fernandes P.G., Brandon M.A., Armstrong N.W., McPhail S.D., Stevenson P., Pebody M., Perrett J., Squires M., Bone D.G., Griffiths G. 2002, Antarctic krill under sea ice: elevated abundance in a narrow band just south of ice edge. *Science* 295: 1890–1892.
- Cannone N., Guglielmin M., 2003, Vegetation and permafrost: sensitive system for the development of a monitoring program of climate change along an Antarctic transect. [w:] Huiskes A.H.L., Gieskes W.W.C., Rozema J., Schorno R.M.L., van der Vies S.M., Wolff W.J. (red.), *Antarctic Biology in a Polar Context*. Backhuys Publishers, Leiden: 31–36.
- Ciaputa P., Sierakowski K., 1999, Long-term population changes of Adeliae, chinstrap and gentoo penguins in the regions of SSSI No 8 and SSSI No 34, King George Island, Antarctica. *Polish Polar Research*, 20: 355–365.
- Clarke A., Aronson R.B., Crame J.A., Gill J.-M., Blake D., 2004, Evolution and diversity of the benthic fauna of the Southern Ocean continental shelf. *Antarctic Science*, 16 (4): 559–568.
- Clarke A., Crame J.A., 1992, The Southern Ocean benthic fauna and climate changes: a historical perspective. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London*, B338: 299–309.
- Comiso J.C., 2003, Large-scale characteristics and variability of the global sea ice cover. [w:] Thomas D.N., Dieckmann G.S. (red.). *Sea ice. An Introduction to its Physics, Chemistry, Biology and Geology*. Blackwell, Berlin: 112–142.
- Convey P., 2003, Soil faunal community response to environmental manipulation on Alexander Island, southern maritime Antarctic. [w:] Huiskes A.H.L., Gieskes W.W.C., Rozema J., Schorno R.M.L., van der Vies S.M., Wolff W.J. (red.), *Antarctic Biology in a Polar Context*. Backhuys Publishers, Leiden: 74–78.
- Cook A.J., Fox A.J., Vaughan D.G., Ferrigno J.G., 2005, Retreating glacier fronts on the Antarctic Peninsula over the past half – century. *Science*, 308: 541–544.
- Croxal J.P., Nicol S., 2004, Management of Southern Ocean fisheries: global forces and future sustainability. *Antarctic Science*, 16 (4): 569–584.
- Fraser F.W., Trivelpiece W.Z., Ainley D.G., Trivelpiece S.G., 1992, Increases in Antarctic penguin populations: reduced competition with whalers or a loss of sea-ice due to environmental warming? *Polar Biology*, 11: 525–531.
- Gerighausen U., Brautigam K., Mustafa O., Peter H.-U., 2003, Expansion of vascular plants on an Antarctic island - a consequence of climate change? [w:] Huiskes A.H.L., Gieskes W.W.C., Rozema J., Schorno R.M.L., van der Vies S.M., Wolff W.J. (red.), *Antarctic Biology in a Polar Context*. Backhuys Publishers, Leiden: 79–83.
- Godlewska M., Rakusa-Suszczewski S., 1998, Variability of krill, *Euphasia superba* Dana 1852 (Crustacea, Euphausiacea), distribution and biomass In the Western Antarctic (Bransfield Strait, Drake Passage, Elephant Island during 1976-1987. *Investigacion Pesquera*, 52: 575–586.
- Hofmann E.E., Murphy E.J., 2004, Advection, krill, and Antarctic marine ecosystems. *Antarctic Science*, 16 (4): 487–499.
- Hogg I.D., Stevens M.I., 2002, Soil fauna of Antarctic coastal landscapes. [w:] Beyer L., Bölter M. (red.), *Geoecology of Antarctic ice-free coastal landscapes*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York. *Ecological Studies*, 154: 265–280.

- Hughes L., 2000, Biological consequences of global warming, is the signal already apparent? *Trends in Ecology and Evolution*, 15: 56–61.
- Grose M., McMinn A., 2003, Algal biomass in east Antarctic pack ice: how much is in the east? [w:] Huiskes A.H.L., Gieskes W.W.C., Rozema J., Schorno R.M.L., van der Vies S.M., Wolff W.J. (red.), *Antarctic Biology in a Polar Context*. Backhuys Publishers, Leiden: 21–25.
- Gross L., 2005, As the Antarctic ice pack recedes, a fragile ecosystem hangs in the balance. *PLoS Biology*, 3 (4), e127: 557–561.
- Kappen L. I., Schroeter B., 2002, Plants and lichens in the Antarctic, their way of life and their relevance to soil formation. [w:] Beyer L., Bölker M. (red.), *Geoecology of Antarctic ice-free coastal landscapes*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York. *Ecological Studies*, 154: 327–373.
- Karentz D., 2003, Environmental change in Antarctica: ecological impacts and responses. [w:] Huiskes A.H.L., Gieskes W.W.C., Rozema J., Schorno R.M.L., van der Vies S.M., Wolff W.J. (red.), *Antarctic Biology in a Polar Context*. Backhuys Publishers, Leiden: 45–55.
- Knox G.A., 1994, *The biology of the Southern Ocean*. Studies in Polar Research. Cambridge University Press, Cambridge, New York: 444 s.
- Lewis-Smith R.I., 2003, The enigma of *Colobanthus quitensis* and *Deschampsia Antarctica* in Antarctica. [w:] Huiskes A.H.L., Gieskes W.W.C., Rozema J., Schorno R.M.L., van der Vies S.M., Wolff W.J. (red.), *Antarctic Biology in a Polar Context*. Backhuys Publishers, Leiden: 234–239.
- Ligowski R., 1998, Okrzemki w morskim ekosystemie Antarktyki. *Kosmos*, 47 (4): 471–498.
- Loeb V., Siegel V., Holm-Hansen O., Hewitt R., Fraser W., Trivelpiece W., Trivelpiece S., 1997, Effect of sea-ice extent and krill or salp dominance on the Antarctic food web. *Nature*, 387: 897–900.
- Marsz A.A., 1987, *Brzezi lodowe*. Ossolinem, Wrocław Warszawa Kraków Gdańsk Łódź: 115 s.
- Martinez-Macchiavello J.C., Tatur A., Servant-Vildary S., del Valle R., 1996, Holocene environmental changes in marine-estuarine-lacustrine sediment sequence. *Antarctic Science*, 8: 312–322.
- McMinn A., 2005, Production in sea ice could fall. *Australian Antarctic Magazine* 9: 11.
- Myung G.P., Yang S.R., Kang S-H., Chung K.H., Shim J.H., 1999, Phytoplankton biomass and primary production in the marginal ice zone of northwestern Sea during austral summer. *Polar Biology*, 21: 251–261.
- Nevoux M., Barbraud C., 2006, Relationship between sea ice concentrations, sea surface temperature and demographic traits of thin-billed prions. *Polar Biology*, 29: 445–453.
- Olech M., 1996, Human impact on terrestrial ecosystems in West Antarctica. [w:] *Proceedings of the NIPR Symposium on Polar Biology*, National Institute of Polar Research, Tokyo, Japan, 9: 299–306.
- Olech M., 2002, Plant communities on King George Island. [w:] Beyer L., Bölker M. (red.), *Geoecology of Antarctic ice-free coastal landscapes*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York. *Ecological Studies*, 154: 215–248.
- Parkinson C. L., 2004, Southern Ocean sea ice and its wider linkages: insight revealed from models and observations. *Antarctic Science*, 16 (4): 387–400.
- Quetin L.B., Ross R.M., 2001, Environmental variability and its impact on the reproductive cycle of Antarctic krill. *American Zoologist*, 41 (1): 74–89.
- Rakusa-Suszczewski S., 1995, The hydrography of Admiralty Bay and its inlets, coves and lagoons (King George Island, Antarctica). *Polish Polar Research*, 16 (1–2): 61–70.
- Rakusa-Suszczewski S., 1996, Spatial and seasonal variability of temperature and salinity in Bransfield Strait and Admiralty Bay, Antarctica. *Polish Polar Research* 17: 29–42.
- Salwicka K., Rakusa-Suszczewski S., 2002, Long-term monitoring of Antarctic pinnipeds In Admiralty Bay (South Shetlands, Antarctica). *Acta Theriologica*, 47 (4): 443–457.

- Schnack-Schiel S.B., 2003, The macrobiology of sea ice. [w:] Thomas`D.N., Dieckmann G.S. (red.) Sea ice. An Introduction to its Physics, Chemistry, Biology and Geology. Blackwell, Berlin: 211–229.
- Siciński J., Różycki O., Kittel W., 1996, Zoobentos and zooplankton of Herve Cove, King Geore Island, South Shetlands, Antarctic. Polish Polar Research, 17 (3–4): 221–238.
- Siegel V., 2000, Krill (Euphausiacea) life history and aspects of population dynamics. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 57 (Suppl. 3): 130–150.
- Siegel V., Loeb V., 1995, Recruitment of Antarctic krill *Euphasia superba* and possible causes for its variability. Marine Ecology Progress Series 123: 45–56.
- Tatur A., 2002, Ornithogenic ecosystems in the maritime Antarctic: formation, development and disintegration. [w:] Beyer L., Bölter M. (red.), Geocology of Antarctic ice-free coastal landscapes. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York. Ecological Studies, 154: 160–184.
- Trathan P.N., Croxall J.P., Murphy E.J., 1996, Dynamics of Antarctic penguin populations in relation to inter-annual variability in sea ice distribution. Polar Biology, 16: 321–330.
- Weart S.R., 2001, The discovery of global warming (<http://www.aip.org/historyclimate/>).
- Weimerskirch H., Inchausti P., Guinet C., Barbraud C., 2003, Trends in bird and seal populations as indicators of system shift in the Southern Ocean. Antarctic Science, 15: 249–256.
- Yuan X., 2004, ENSO-related impacts on Antarctic sea ice: a synthesis of phenomenon and mechanisms. Antarctic Science, 16 (4): 415–425.