

JAKUB GRZESIAK, MAREK K. ZDANOWSKI

*Zakład Biologii Antarktyki
Instytut Biochemii i Biofizyki PAN
Pawińskiego 5a, 02-106 Warszawa
E-mail: jgrzesiak@arctowski.pl
E-mail: mzdanowski@arctowski.pl*

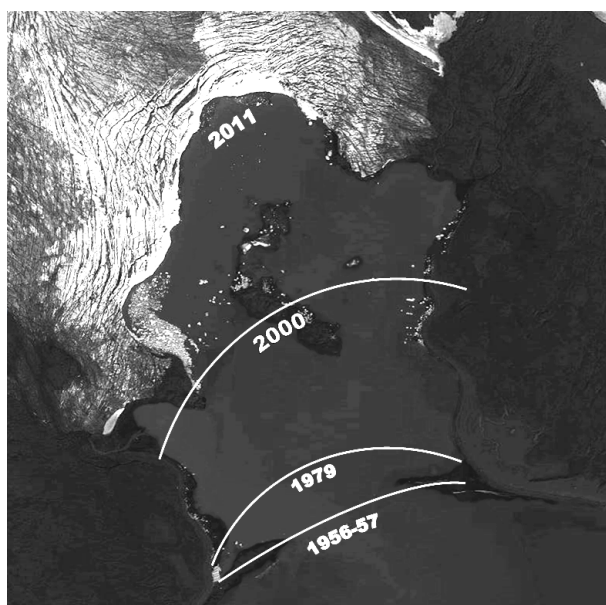
MIKROBIOCENOZY REGIONÓW POLARNYCH W DOBIE GLOBALNEGO OCIEPLENIA

WSTĘP

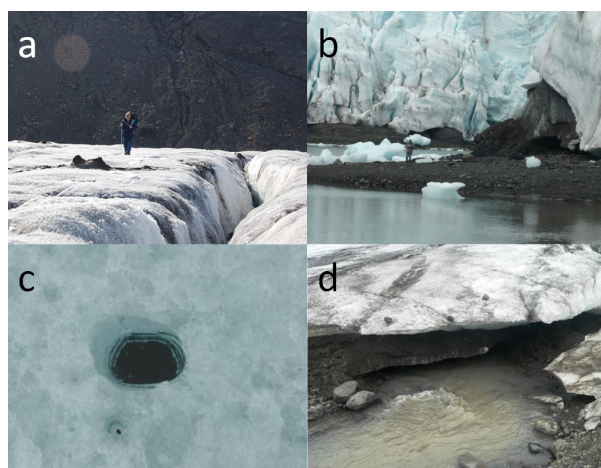
Od czasu, gdy MORITA i HAIGHT (1964) oraz SIEBURTH (1964) napisali o występowaniu psychrofilnych bakterii w morskich środowiskach, wiadomo, że w, uważanych za nieprzyjazne, warunkach niskich temperatur, w morzu i na lądzie, rozwijają się bogate i złożone mikrobiocenozy.

Środowisko życia mikroorganizmów ulega zmianom w wyniku globalnego ocieplenia. Prowadzone od 50 lat w zachodniej An-

tarktyce szczegółowe badania nad tym zjawiskiem pozwoliły na określenie tempa wzrostu temperatury, dochodzącego w niektórych miejscach do $+0,53^{\circ}\text{C}$ na dekadę (TURNER i współaut. 2009). Takie, wydawałoby się, mało znaczące ocieplenie powoduje topnienie lodowców, ich dezintegrację, zmniejszanie ich zasięgu i, co za tym idzie, odsłanianie rozległych terenów wolnych od lodu oraz uwalnianie ogromnych mas wody słodkiej do oceanu. Takie zmiany nie pozostają bez



Fot. 1. Zasięg Lodowca Ekologii w 2011 roku z zaznaczonymi granicami (białe łuki) jego zasięgu w latach poprzednich (Google Maps, zmodyfikowane).



Fot. 2. Lodowiec Ekologii na wyspie King George.

a – powierzchnia lodowca z odkrytymi szczelinami (fot. M. Nieckarz), b – czoło lodowca (fot. J. Grzesiak), c – otwór kriokonitowy na powierzchni lodowca (fot. J. Grzesiak), d – „brama” wypływu wód podlodowcowych (fot. B. Luks).

wpływu na skład gatunkowy, liczebność i funkcjonowanie mikrobiocenoz.

Przykładem lodowca, którego tempo topnienia było rejestrowane od ponad 50 lat, jest Lodowiec Ekologii usytuowany na zachodnim brzegu Zatoki Admiralicji na wyspie King George w Południowych Szetlandach, w pobliżu zbudowanej w 1977 r. Polskiej Stacji Antarktycznej im. Henryka Arctowskiego. W ciągu minionych 35 lat lodowiec „cofnął się” o ponad 400 m, a przed jego czołem powstała rozległa laguna o powierzchni około 16 ha (Ryc. 1) (ŚWIĄTECKI i współaut. 2010). Tem-

po cofania się lodowca wzrastało od 4,5 m/rok między 1956 a 1989 r., do 30 m/rok w latach 1989-1999 (BIRKENMAJER 2002). W rejonie Zatoki Admiralicji obserwuje się dalsze przyspieszanie procesu deglacji (Ryc. 1). Zmienił się obraz powierzchni lodowca obfitującej obecnie w bardzo liczne szczeliny i kanały (Ryc. 2a). Lodowiec Ekologii, ze strefą akumulacji i oddzieloną od niej strefą równowagi, strefą ablacji oraz z otaczającymi lodowiec terenami polodowcowymi, został wytypowany do badań struktury i funkcji zasiedlających je mikrobiocenoz.

EKOSYSTEMY LODOWCÓW

Współczesne badania (HODSON i współaut. 2008) wskazują, że lodowce mogą być traktowane jako samodzielne ekosystemy. Na podstawie fizycznych, biogeochemicznych i mikrobiologicznych wartości wyodrębniono w obrębie lodowca trzy odrębne siedliska. Są to przede wszystkim powierzchnia lodowca oraz jego spód. Trzecie, to siedlisko litego lodu (HODSON i współaut. 2008).

Podstawą życia w każdym ekosystemie jest woda. W siedliskach lodowcowych woda w postaci płynnej powstaje w wyniku topnienia lodu ogrzanego promieniami słońca oraz wiatrem o temperaturze powyżej 0°C (MIGAŁA i współaut. 2006) lub na skutek wysokiego ciśnienia panującego u podstawy lodowca (PATERSON 1994). Na powierzchni woda krąży w postaci mniejszych lub większych cieków lub żył wodnych, w drobnych kanalikach wewnątrz ażurowej struktury lodu oraz zbiera się w postaci studzienek kriokonitowych (Ryc. 2c). Wodzie tej często towarzyszy zawiesina, głównie mineralna, transportowana wiatrem z pobliskich moren i plaż. Kombinacja chropowatego lodu, pyłu i wody w stanie płynnym umożliwia powstanie złożonej mikrobiocenozy, składającej się głównie z heterotroficznych bakterii, sinic, okrzemek, grzybów i pierwotniaków (PORAZIŃSKA i współaut. 2002).

Najwyższą produktywnością i różnorodnością gatunkową odznaczają się otwory kriokonitowe (Ryc. 2c) powstałe wskutek wtapiania się w lód ciemnego pyłu ogrzanego promieniami słonecznymi (TAKEUCHI i współaut. 2000, CHRISTNER i współaut. 2003). Są one jednymi z niewielu rezerwuarów wody w stanie ciekłym na lodowcu,

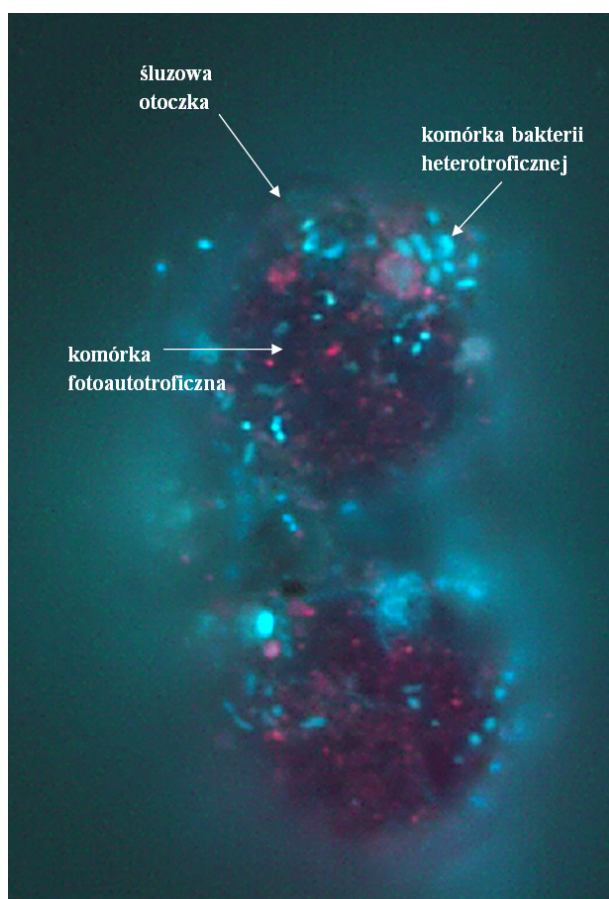
które nocą, w okresie letnim, nie zamarzają całkowicie, a jedynie na powierzchni. Żyjącym tam mikroorganizmom zapewnia to zachowanie stałej, wysokiej aktywności. Liczebność drobnoustrojów związanych z osadami zalegającymi na dnie otworów, badana przez obu autorów, osiągała nawet 10^9 komórek na gram suchej masy sedimentu, podczas gdy w otaczającym go lodzie rzadko przekraczała 10^4 w 1 ml. Czynnikiem napędzającym cały ekosystem powierzchni lodowca jest fotosynteza mikrobialna (PORAZIŃSKA i współaut. 2002). Aby fotoautotrofy mogły skutecznie spełniać swoje funkcje życiowe, potrzebują rozpuszczalnych związków mineralnych, o które trudno w wodach roztopowych lodowca. Dlatego wchodzą one w ścisłą współpracę z heterotroficznymi mikroorganizmami, potrafiącymi wypłukiwać związki biogenne z mineralnych drobin zalegających na lodowcu (KANZLER i współaut. 2005, FREY i współaut. 2010). Właściwości takie posiadają m.in. drobnoustroje zdolne do wydzielania kwasów organicznych, które są efektem procesów niepełnego utleniania. Uwolnione w ten sposób jony są pobierane przez fotoautotrofy produkujące substancje organiczne i związki azotu. Część tych substancji „ucieka” z ich komórek i staje się dostępna dla ich heterotroficznych partnerów. W skład takich zespołów wchodzi m.in. bakterie z rodzaju *Polaromonas*, które zasiedlają polarne i wysokogórskie lodowce na całym świecie (DARCY i współaut. 2011). Na przykłady takich koegzystencji, gdzie śluz spajający agregaty komórek fotosyntetyzujących mikroorganizmów był skolonizowany przez heterotroficzne komórki prokariotyczne, napotykalismy badając mi-

robiocenozy lodowcowe (Ryc. 3). Badania przeprowadzone przez MIECZANA i współaut. (2012) w otworach wytopiskowych Lodowca Ekologii wykazały także obecność bogatego zespołu orzęsków, stanowiących ostatnie ogniwo łańcucha pokarmowego tej mikrobiocenozy. Wśród osiemnastu zidentyfikowanych taksonów Ciliata najczęściej spotykane były gatunki bakteriożerne i wszystkożerne.

Także wewnątrz litego lodu lodowcowego znaleźć można żywe organizmy. W tzw. ciepłym Lodowcu Ekologii obserwowaliśmy liczne komórki mikroorganizmów (średnio $3 \times 10^5/\text{ml}$) w odwiertach z głębokości 3 m. Miejscem ich bytowania jest nie tylko lód, ale także szczeliny, głębokie kanały i pionowe studnie zasilające dno lodowca w wodę, w gazy atmosferyczne i przede wszystkim w składniki odżywcze i w żywe

organizmy. Wysokie ciśnienie, niska temperatura, brak światła, silne zakwaszenie oraz słaba przepuszczalność zwartego lodu sprawiają, że jest to jedno z najsurowszych siedlisk, jakie można spotkać w obrębie lodowca (PRICE 2007). Aktywność bytujących tam mikroorganizmów jest wciąż mało poznana. Ich liczebność jest największa w mikroskopijnych kanalikach wypełnionych wodą i w pęcherzykach uwiecznionych w lodzie powietrza. Kanaliki te powstają wskutek spontanicznego oczyszczania się lodu podczas jego krystalizacji. Usunięte zanieczyszczenia (związki mineralne i organiczne) krążą między kryształami lodu sprawiając, że woda, w której są rozpuszczone ma niższą temperaturę zamarzania i utrzymuje się w stanie płynnym. Mikroorganizmy dzielą los zanieczyszczeń i są gromadzone w tych międzylodowych przestrzeniach (MADER i współaut. 2006). Mimo to, panujące tam warunki, zwłaszcza w lodowcach typu zimnego, wciąż są skrajnie trudne dla organizmów. Ocenia się, że zamieszkujące tam mikroorganizmy mają bardzo wolne tempo metabolizmu, korzystając z ubogich źródeł biogenów i energii jedynie w celu naprawy uszkodzeń na poziomie cząsteczkowym. Ta strategia zapewniła im przeżycie milionów lat. Opisane tu mikroorganizmy odgrywają znikomą rolę w biogeochemicznych cyklach lodowcowych, zwłaszcza w porównaniu z bardzo aktywnymi biologicznie zespołami na- i podlodowcowymi (PRICE 2007).

Środowisko podlodowcowe składa się z lodu podstawy lodowca (lód podstawny), skały, na który napiera, i warstwy wody wypełniającej przestrzeń między lodem a podłożem. Lód taki zawiera znaczące ilości szczątków organicznych i mineralnych. Wraz z bogatym zespołem mikroorganizmów tworzy ekologiczny system, zasilany z powierzchni lodowca poprzez system kanałów w gazy atmosferyczne, w substancje odżywcze oraz allochtoniczne drobnoustroje (HUBBARD i współaut. 2009). Tlen jest szybko konsumowany, zarówno w procesach oddechowych, jak i w procesach wietrzenia chemicznego. Dlatego środowisko to jest na ogół uważane za beztlenowe (SHARP i współaut. 1999). Gruba warstwa lodu (dochodząca do kilkudziesięciu, a czasem kilkuset metrów) nie pozwala, by docierało tam światło i czyni niemożliwym przebieg procesu fotosyntezy.



Fot. 3. Duże komórki fotoautotrofów i drobne komórki bakterii heterotroficznych zamknięte w śluzowej otoczce, pochodzące z powierzchniowej warstwy lodu Lodowca Ekologii.

Obraz obserwowany w promieniach UV z zastosowaniem filtra 330–380 nm (fot. M. K. Zdanowski).

Liczebność mikroorganizmów w podlodowcowym sedymentcie może dochodzić nawet do 10^{11} komórek na gram jego suchej masy (TUNG i współaut. 2006). Zgrupowanie bytujących tam bakterii odznacza się znaczącą taksonomiczną i biologiczną różnorodnością. W omawianym siedlisku wykryto m.in. drobnoustroje tlenowe, mikroaerofilne oraz zdolne do fermentacji beztlenowej, redukujące azotany, siarczany, żelazo oraz dwutlenek węgla (mikroorganizmy wytwarzające metan) (YDE i PAASCHE 2010). Sprawiają one, że stężenie metanu pod lodowcem jest 1000 razy wyższe niż w atmosferze (PRICE i SOWERS 2004). Mimo braku światła i aktywnej fotosyntezy, sedymenty podlodowcowe są dość bogate w węgiel organiczny. Rosnący lodowiec przykrył bowiem tereny tundry pokryte roślin-

nością oraz jeziora wypełnione osadami. Nawet po kilkuset tysiącach lat związki organiczne są wciąż wykrywalne w miejscach, z których wycofał się lodowiec. Obecność tych związków przyspiesza metabolizm mikroorganizmów, nasilając biogeochemiczne procesy wietrzenia i produkcji gazów cieplarnianych takich jak dwutlenek węgla czy metan. Pośrednio świadczą o tym wpływy podlodowcowe, często o rdzawym kolorze, spowodowanym wietrzeniem skał bogatych w żelazo (Ryc. 2d). Jednak nie tylko drobnoustroje utleniające związki organiczne zasiedlają to środowisko. Były tam również znajdowane chemolitoautotroficzne mikroorganizmy, takie jak np. utleniający żelazo przedstawiciele rodzaju *Gallionella* (YDE i PAASCHE 2010).

EKOSYSTEMY POŁODOWCOWE

Wskutek topnienia lodu spowodowanego globalnym ociepleniem lodowce cofają się niekiedy w szybkim tempie. Odsłaniany w ten sposób postglacjalny krajobraz składa się zwykle z równin powstałych wskutek odpływu wód lodowcowych, z systemu moren, z martwego lodu, odkrytych skał oraz z podlodowcowych rzek i jezior (Ryc. 4). Stopniowo odsłaniane spod lodu grunty są unikalnym terenem badań nad sukcesją (MATTHEWS 1992). Piaszczyste pokłady zalegające u czoła lodowca są pozbawione szaty roślinnej. Dalej tworzą się gleby inicjalne, stopniowo coraz bardziej zróżnicowane, zasiedlane roślinnością tundrową, przekształcającą się w próchnicę w okolicy mszarników, oraz gleby ornitogenne na dawnych miejscach lęgowych ptaków morskich (TATUR 2007). Jednak nie każdy skrawek nowo odsłoniętego terenu zostaje skolonizowany przez organizmy roślinne. Moreny wielu lodowców w regionach polarnych są pod wpływem procesów krioturbacji i soliflukcji. Zjawiska te, polegające na cyklicznym zamarzaniu i rozmarzaniu wody zawartej w gruncie, występują głównie latem, gdy nie ma pokrywy śnieżnej. Intensywna erozja sprawia, że gleba uzyskuje ilasto-gliniasty charakter i może się osunąć w dół moreny (soliflukcja). Takie podłoże jest trudne do zasiedlenia przez rośliny i porosty, a co za tym idzie, nie może być przez nie ustabilizowane. Tam, gdzie krioturbacja ma znikomy wpływ na podłoże, mchy, trawy

i porosty mogą tworzyć bogate niekiedy formacje, występujące często obok całkowicie nagich fragmentów terenu (BLUME i współaut. 2002).

Świeżo odkryte grunty postglacjalne są, jako środowisko życia mikroorganizmów, nową jakością powstałą z połączenia trzech wyżej opisanych ekosystemów lodowcowych.

Szacuje się, że na całym świecie, rocznie od 10^{17} do 10^{21} żywych komórek różnego rodzaju drobnoustrojów jest uwalnianych w wyniku topnienia lodowców (CASTELLO i ROGERS 2005). Drastyczna zmiana warunków sprawia, że przeżywają tylko te mikroorganizmy, które są najbardziej odporne na związany z tym stres. Takimi okazują się być bakterie podlodowcowe, np. wyizolowane przez autorów bakterie z rodzaju *Leifsonia*, wolno rosnące, ale odporne na szereg czynników fizycznych i chemicznych. Jednak i one nie rozwijają się poza wąskim pasem świeżo odsłoniętych przez lodowiec gruntów (ZDANOWSKI i współaut. 2012).

Nowo odsłonięte obszary, na których przebiega ekologiczna sukcesja, są zasiedlane przez allochtoniczne mikroorganizmy, konkurujące z wyżej wspomnianymi drobnoustrojami podlodowcowymi, korzystającymi z substancji biogenych zmagazynowanych pod lodem. Zasoby te wyczerpują się jednak dość szybko, a zespół, aby się rozwijać, musi być zaopatrywany w użyteczne biologicznie formy węgla i azotu. Dzieje się tak za spr-



Fot. 4. System moren na przedpolu Lodowca Ekologii (fot. M. K. Zdanowski).

wą sinic (Cyanobacteria), które wiążąc azot atmosferyczny i dwutlenek węgla, użyźniają jałowe grunty i pozwalają osiedlić się tam innym organizmom (YDE i współaut. 2011). Ciekawym zjawiskiem obserwowanym na przedpolu lodowca jest zmiana składu konsorcjum mikroorganizmów z metanogenennego (wytworzącego metan w warunkach beztlenowych) do metanotroficznego (konsumującego metan w warunkach tlenowych), w miarę oddalania się od czoła lodowca (BÁRCENA i współaut. 2010, 2011). Los gleb odsłanianych wskutek deglacjacji obszarów może być dwojaki, pokryje się roślinnością lub pozostanie nagi, co ma kluczowe znaczenie dla sposobu rozwoju mikrobiocenoz. Klasycznym, dość dobrze poznanym przykładem jest mikrobialna sukcesja na terenach, gdzie osiedliły się rośliny. Różnorodność i liczebność mikroorganizmów wzrastają, osiągając swoje maksima w dobrze ukształtowanych glebach bogatych w humus. Można tu spotkać znane ze swoich zdolności symbiotycznych bakterie i grzyby, które wchodzą w skład mikroflore korzeniowej. Mogą one spełniać wiele korzystnych dla roślin funkcji, jak wiązanie azotu cząsteczkowego czy rozkład szczątków roślinnych i przywracanie substancji biogenych do ekologicznego obiegu. Rodzajem

bakterii zdolnym do asymilacji azotu atmosferycznego jest *Sphingomonas*. Badania ZDANOWSKIEGO i współaut. (2012) ujawniają, iż bakteria ta pojawia się w skąpo porośniętej glebie, na obszarach odsłoniętych w ciągu ostatnich 10 lat, czyli tam, gdzie jest duże zapotrzebowanie na przyswajalne związki azotu. Bakterie i grzyby odpowiedzialne za rozkład materiału pochodzenia roślinnego występują natomiast w poziomie próchnicznym gleb bardzo starych moren. Grzyby oraz tworzące przetrwalniki rodzaje bakterii *Sporosarcina* i *Bacillus* odpowiedzialne są tam za rozkład celulozy. Rośliny zapewniają tym samym stały dopływ związków organicznych. Zwarty dywan mchów i trawy dodatkowo chroni mikroorganizmy przed zgubnymi zmianami temperatury i przed wysychaniem (ZDANOWSKI i współaut. 2012).

Zespoły mikroorganizmów, zasiedlające tereny, które z powodu krioturbacji nie są pokryte szatą roślinną, przystosowały się do szeregu niekorzystnych czynników: do dużych wahań temperatury, do suszy oraz do ubogich zasobów substancji biogenych. Przykładów dostarczyły nasze badania przeprowadzone w ramach międzynarodowego projektu CLICOPEN podczas Międzynarodowego Roku Polarnego 2007-2008. Zespoły bakterii w transekcie pozbawionym roślinności z powodu występujących zjawisk krioturbacji wykazywały znacznie większą aktywność związaną z asymilacją węglowodanów jako jedyne źródła węgla niż zespoły pochodzące ze stabilnego transektu porośniętego roślinnością (ZDANOWSKI i współaut. 2012). Takie zespoły bakterii odznaczają się zazwyczaj niską różnorodnością taksonomiczną, ale dysponują szerokim wachlarzem enzymów litycznych, by móc wykorzystać każde dostępne w tym środowisku źródło węgla. Najczęściej izolowanym drobnoustrojem był tu pionierski, jak się wydaje, rodzaj *Arthrobacter* (ZDANOWSKI i współaut. 2012). Jego rezerwuarem jest zapewne opisane niżej pingwinisko, będące miejscem intensywnego rozkładu ptasiego guana.

ŁĄDOWE SIEDLISKA PRZYBRZEŻNE

Tereny styku lądu i morza należą do najżyźniejszych siedlisk w polarnych ekosystemach. Zasilane są materią organiczną w postaci odchodów ptaków i ssaków przebywających na lądzie w okresie letnim oraz plech makroskopowych glonów i szczątków zwie-

rząt wyrzucanych na brzeg morza. Przeważającą część tej materii stanowi guano ptaków, odkładane w rejonach ich kolonii lęgowych. W regionach morskiej Antarktyki największy udział w deponowaniu guana mają pingwiny, odżywiające się głównie krylem. Niestrawio-



Fot. 5. Młode i dorosłe pingwiny Adeli na warstwie guana (fot. M. K. Zdanowski).

ne resztki tego skorupiaka, którego istotną część stanowi chityna, są wydalone na teren pingwiniska (Ryc. 5). Szacuje się, że podczas okresu lęgowego na powierzchni jednego metra kwadratowego lęgowiska odkładanych jest około 10 kg suchej masy guana (TATUR i MYRCHA 1984).

Innym ważnym, pochodzącym z morza elementem użyźniającym przybrzeżne obszary lądu są duże glony. Ich transport na ląd możliwy jest dzięki pływom i sztormom, które wyrzucają na ląd wyrwane plechy glonów przez szorujący po dnie pak lodowy. Wynieszone na plażę szczątki transportowane są w głąb lądu przez huraganowe wiatry. Ilość glonów wyrzucanych na zachodni brzeg Zatoki Admiralicji oszacowano na 280 ton rocznie na powierzchni 0,3 km² wybrzeża (RAKUSA-SUSZCZEWSKI 1995).

Wyniesiona w ten sposób na ląd materia organiczna podlega rozkładowi przez mikroorganizmy. Guano pingwinie jest bogate w różnorodne składniki odżywcze i pierwiastki biogenne. Większość tych substancji ma postać złożonych związków organicznych i polimerów, takich jak np. chityna. W dekompozycję guana zaangażowane są głównie bakterie. Proces rozkładu zapoczątkowany

jest już w jelicie ptaków przez ich enzymy trawienne i jelitową mikroflorę. Rozkład tych związków jest jeszcze przez pewien czas kontynuowany po opuszczeniu ciała zwierzęcia. Wtedy też odczyn guana jest najniższy, a zawartość takich związków jak białka i tłuszcze jest najwyższa. W miarę ekspozycji guana na warunki atmosferyczne zasiedlane jest ono przez drobnoustroje glebowe. Wtedy też odczyn guana wzrasta i stabilizuje się na poziomie neutralnym lub lekko zasadowym. Związki organiczne guana są wówczas intensywnie hydrolizowane przez pozakomórkowe enzymy licznych proteo-, lipo- i chitynolitycznych mikroorganizmów. Wielkocząsteczkowe związki są przez nie „cięte” na monomery, wchłaniane przez błonę komórkową i wykorzystywane jako źródło energii oraz materiał budulcowy. Liczebność mikroorganizmów szybko wzrasta, gdy dostępna jest bogata baza pokarmowa (świeże guano). Wraz ze wzrostem liczby komórek rośnie również zapotrzebowanie na tlen. Dostępność tlenu staje się czynnikiem ograniczającym dla zespołów drobnoustrojów, które wskutek ciągłego gromadzenia i nakładania się warstw odchodów mogą zostać odcięte od dopływu powietrza. W obrębie takiego zespołu dochodzi do wyselekcjonowania grup drobnoustrojów mogących funkcjonować w warunkach zmniejszonego stężenia tlenu (mikroorganizmy mikroaerofilne), zwiększonego stężenia dwutlenku węgla (mikroorganizmy kapnofilne) bądź też braku tlenu (mikroorganizmy beztlenowe) (ZDANOWSKI i współaut. 2005, ŻMUDA-BARANOWSKA 2010). Proces mikrobiального rozkładu guana ptasiego prowadzi do powstania gleby ornitogennej (TATUR i MYRCHA 1984, ZDANOWSKI i WĘGLEŃSKI 2001).

Plechy dużych morskich glonów wyrzuconych na ląd i zalegających w postaci gnijących zwałów (Ryc. 6) to ważne źródło związków mineralnych i organicznych dla ekosystemów przybrzeżnych. Dekompozycja takiego materiału jest procesem złożonym. Szereg czynników sprawia, że szybki rozkład jest niemożliwy. Glony, jako materiał roślinny, cechuje niekorzystny dla mikroorganizmów wysoki stosunek ilości węgla względem azotu i fosforu. Węgiel jest dodatkowo związany w postaci dość trudno rozkładalnych polimerów takich jak celuloza, laminarany i fukoidany. Morskie glony wydzielają także substancje antybakteryjne, mające na celu uniemożliwienie kolonizacji ich powierzchni przez bakterie. Związki te działają także na lądzie po wyrzuceniu



Fot. 6. Wyrzucone na plażę Zatoki Admiralicji, rozkładające się szczątki dużych glonów (fot. M. J. Żmuda-Baranowska).

glonów na brzeg. Zarówno glony, jak i zasiedlająca je słonolubna mikroflora morska, ulegają wpływowi czynników lądowych takich jak susza czy słodka woda opadowa. W takich odmiennych niż morskie warunkach komórki glonów ulegają dezintegracji, ułatwiając tym samym ich rozkład przez mikro- i makroorganizmy lądowe. Rozpuszczalne związki mineralne i organiczne zasilały podłoże, a materiał trudniej rozkładalny podlega dalszym etapom dekompozycji. Końcowym produktem tego procesu jest bogaty w humus detrytus, rozwiewany po okolicy i będący zaczątkiem bardziej rozwiniętych gleb (ŻMUDA-BARANOWSKA 2010).

Liczebność mikroorganizmów zaangażowanych w dekompozycję guana i glonów może dochodzić do 10^{11} komórek na gram suchej masy tych materiałów. W rozkładzie obydwu biorą udział bakterie z rodzaju *Ar-*

throbacter. Jest to powszechnie występujący rodzaj bakterii glebowych, metabolicznie bardzo różnorodny i odporny na szereg niekorzystnych czynników abiotycznych takich jak: wysuszenie, zamarzanie, obecność toksycznych związków lub/i promieniowanie. Czuje się on dobrze w warunkach obniżonej ilości tlenu, dlatego wygrywa w takich okolicznościach z innymi mikroskopijnymi destruentami w konkurencji o substraty pokarmowe. Wiele izolatów tego rodzaju pochodzących z guana jest blisko ze sobą spokrewnionych, różnią się jednak znacznie pod względem fizjologicznym. Może to sugerować możliwość poziomego transferu genów między komórkami, szczególnie efektywnego przy dużym ich zagęszczeniu i bogatej bazie pokarmowej. Inną grupą uczestniczącą w rozkładzie materii pochodzenia morskiego były bakterie z rodzaju *Psychrobacter*, charakterystyczny przedstawiciel mikroflory regionów polarnych. Cechuje je szereg przystosowań do biodegradacji materiału pochodzenia morskiego. Preferują one siedliska o stosunkowo wysokim zasoleniu, wydzielają lipazy i utylizują kwas moczowy wydalany przez ptaki. Bakterie z rodzaju *Psychrobacter* nie hydrolizują polisacharydów i innych organicznych polimerów. W guanie rolę tę spełniają bakterie z rodziny *Flavobacteriaceae*, zdolne do syntetyzowania enzymów chitynolitycznych. W zalegających na plażach zwalach rozkładających się glonów za dekompozycję tego typu związków mogą odpowiadać gatunki z rodzajów *Sporosarcina* i *Bacillus*, wydzielające enzymy amylo- i celulolityczne (ZDANOWSKI i współaut. 2004, 2005; ŻMUDA-BARANOWSKA 2010).

ZAKOŃCZENIE

Mikrobiocenozy lądowych środowisk polarnych tworzą, dzięki swojej aktywności metabolicznej, fundament zarówno prostych jak i bardzo złożonych zależności troficznych. Mikroorganizmy siedlisk lodowcowych uwalniają sole mineralne z nierozpuszczalnych skał w procesie wietrzenia biologicznego (bioługowania), natomiast drobnoustroje środowisk przybrzeżnych przyczyniają się do wytworzenia żyznych gleb na jałowych morenach postgla-

cialnych, rozkładając materiał pochodzenia morskiego (guano, makroglony, szczątki zwierząt). Taka ich aktywność umożliwia powstanie tundry złożonej z porostów, mchów i roślin naczyniowych. W dobie globalnego ocieplenia, cofających się lodowców i zmniejszenia ilości odkładanego guana (RAKUSA-SUSZCZEWSKI 2012) dalsze losy i wpływ mikrobiocenoz na ekosystemy regionów polarnych pozostają nieznane.

MIKROBIOCENOZY REGIONÓW POLARNYCH W DOBIE GLOBALNEGO OCIEPLENIA.

Streszczenie

Ekosystemy regionów polarnych obejmują wiele lądowych i morskich habitatów zasiedlonych przez interesujące i złożone zespoły mikroorganizmów. W artykule omówione zostały trzy środowiska lądowe: lodowcowe, polodowcowe i przybrzeżne. W obrębie lodowca można wyróżnić trzy siedliska życia drobnoustrojów: powierzchnia lodowca, jego wnętrze i strefa podlodowcowa. Na powierzchni lodowca występuje zespół zarówno fotoautotroficznych producentów materii organicznej, jak i heterotroficznych mikroorganizmów współpracujących ze sobą w konsorcjach. W warstwie podlodowcowej mikroorganizmy korzystają zarówno z puli materii organicznej tam występującej, jak i spływającej szczelinami a wytwarzanej na jego powierzchni.

Wskutek ocieplenia klimatu lodowce cofają się, stopniowo odsłaniając tereny pod nimi. Odsłonięte wskutek kurczenia się lodowców grunty są początkowo zasiedlone jedynie przez mikroorganizmy, które przeżyły topnienie lodowca. Podlegają one

intensywnym i złożonym procesom sukcesji. Porosty, mchy i trawy zaczynają zajmować obszary, niebędące pod silnym wpływem procesów krioturbacji (cyklicznego zamarzania i rozmarzania). Wraz z nimi pojawiają się bakterie symbiotyczne, pomagające w zasiedlaniu jałowych terenów postglacialnych. Tam, gdzie grunt podlega procesom erozyjnym i brak jest szaty roślinnej, wykształcają się zespoły mikroorganizmów bardzo odporne na czynniki środowiskowe. Ich rezerwuarem są żyzne tereny przybrzeżne, gdzie zalegają ogromne ilości materii pochodzenia morskiego, głównie pod postacią guana ptasiego oraz plech makroglonów. Bakteryjny rozkład tego materiału zachodzi w kilku etapach, zaczynając od wchłaniania najprostszych związków, kończąc na enzymatycznym rozkładzie złożonych polimerów takich jak chityna czy celuloza. Składniki odżywcze powstające w wyniku biodegradacji wspomagają rozwój ekosystemów tundrowych w obszarach przybrzeżnych i na polodowcowych morenach.

POLAR MICROBIOCENOSES IN THE AGE OF GLOBAL WARMING

Summary

Polar ecosystems host diverse terrestrial and marine microbial communities. Three terrestrial microbial habitats explored here are glacier, glacier foreland and marine coast. Three sites within the bounds of the glacier were distinguished, specifically supraglacial (glacier surface), englacial (in the glacier), and subglacial (glacier bed). Microbial cells in the supraglacial environment thrive through photosynthesis, and cooperate with each other to create microbial consortia. In subglacial sites, microorganisms use organic matter incorporated earlier into the glacier bed or derived more recently from the surface through crevasses and sink holes. As glaciers recede in response to the warming climate, the ground below them is gradually exposed. This ground, initially inhabited by microbes that survive the melting, undergoes a succession process. Li-

chens, mosses and grasses begin to occupy stable areas unaffected by cryoturbation (freeze-thaw), with bacteria aiding colonization of the arid post-glacial soil. In places subject to erosion and where plant coverage is lacking, bacterial communities resistant to the harsh abiotic conditions develop. A source of such microorganisms is the fertile coast, where significant amounts of marine-derived material in the form of guano and macroalgae debris accumulate. Bacterial decomposition of this matter proceeds through several stages, initially by direct absorption of simple compounds, and subsequently by enzymatic breakdown of complex biopolymers such as chitin or cellulose. Such nutrients aid tundra ecosystem development not only in the vicinity of the coast, but also on postglacial moraines.

LITERATURA

- BÁRCENA T. G., YDE J. C., FINSTER K. W., 2010. *Methane flux and high-affinity methanotrophic diversity along the chronosequence of a receding glacier in Greenland*. Ann. Glaciol. 51, 23–31.
- BÁRCENA T. G., FINSTER K. W., YDE J. C., 2011. *Spatial patterns of soil development, methane oxidation and methanotrophic diversity along a receding glacier forefield, Southeast Greenland*. Arct. Antarct. Alp. Res. 43, 178–188.
- BIRKENMAJER K., 2002. *Retreat of Ecology Glacier, Admiralty Bay, King George Island (South Shetland Island, West Antarctica) 1956–2001*. B. Pol. Acad. Sci-Earth 50, 5–19.
- BLUME H. P., BEYER L., KALK E., KUHN D., 2002. *Weathering and Soil Formation*. [W:] *Geocology of Antarctic Ice-Free Coastal Landscapes*. Ecological Studies. BEYER L., BÖLTER M. (red.). Springer Verlag, Berlin, 115–137.
- CASTELLO J. D., ROGERS S. O., 2005. *Life in ancient ice*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA, 227–239.
- CHRISTNER B. C., KVIKTO B. H., REEVE J. N., 2003. *Molecular identification of bacteria and eukarya inhabiting an Antarctic cryoconite hole*. Extremophiles 7, 177–183.
- DARCY J. L., LYNCH R. C., KING A. J., ROBESON M. S., SCHMIDT S. K., 2011. *Global distribution of polaromonas phylotypes – evidence for a highly successful dispersal capacity*. PLoS ONE 6 (8), e23742.
- FREY B., RIEDER S. R., BRUNNER I., PLOTZE M., KÖTZSCH S., LAPANJE A., BRANDL H., FURRER G., 2010. *Weathering-associated bacteria from the*

- Damma Glacier forefield: Physiological capabilities and impact on granite dissolution.* Appl. Environ. Microb. 76, 4788-4796.
- HODSON A., ANESIO A. M., TRANTER M., FOUNTAIN A., OSBORN M., PRISCU J., LAYBOURN-PARRY J., SATTLER B., 2008. *Glacial Ecosystems.* Ecol. Monogr. 78, 41-67.
- HUBBARD B. P., COOK S. J., COULSON H., 2009. *Basal ice facies: a review and unifying approach.* Quat. Sci. Rev. 28, 1956-1969.
- KANZLER B. E. M., PFANNES K. R., VOGL K., OVERMANN J., 2005. *Molecular Characterization of the Non-photosynthetic Partner Bacterium in the Consortium "Chlorochromatium aggregatum".* Appl. Environ. Microbiol. 71, 7434-7441.
- MADER H., PETTITT M. E., WADHAM J. L., WOLFF E., PARKES R. J., 2006. *Subsurface ice as a microbial habitat.* Geology 34, 169-172.
- MATTHEWS J. A., 1992. *The ecology of recently-deglaciated terrain: a geoecological approach to glacier forelands and primary succession.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 136-144.
- MIECZAN T., GÓRNIK D., ŚWIĄTECKI A., ZDANOWSKI M. K., TARKOWSKA-KUKURYK M., 2012. *The distribution of ciliates on Ecology Glacier (King George Island, Antarctica): relationships between species assemblages and environmental parameters.* Polar Biol. DOI: 10.1007/s00300-012-1256-6
- MIGAŁA K., PIWOWAR B. A., PUCZKO D., 2006. *A meteorological study of the ablation process on Hans Glacier, SW Spitsbergen.* Pol. Polar Res. 27, 243-258.
- MORITA R. Y., HAIGHT R. D., 1964. *Temperature effects on the growth of an obligate psychrophilic marine bacterium.* Limnol. Oceanogr. 9, 102-106.
- PATERSON W. S. B., 1994. *The physics of glaciers.* Third edition. Pergamon, Oxford, UK.
- PORAZINSKA D. L., FOUNTAIN A. G., NYLEN T. H., TRANTER M., 2002. *The biodiversity and biogeochemistry of cryoconite holes from McMurdo Dry Valley Glaciers, Antarctica.* Arct. Antarct. Alp. Res. 54, 495-505.
- PRICE P. B., 2007. *Microbial life in glacial ice and implications for a cold origin of life.* FEMS Microbiol. Ecol. 59, 217-231.
- PRICE P. B., SOWERS T., 2004. *Temperature dependence of metabolic rates for microbial growth, maintenance, and survival.* Proc. Nat. Acad. Sci. USA 101, 4631-4636.
- RAKUSA-SUSZCZEWSKI S., 1995. *Flow of matter in the Admiralty Bay area, King George Island, Maritime Antarctic.* Proc. NIPR Symp. Polar Biol. 8, 101-113.
- RAKUSA-SUSZCZEWSKI S., 2012. *Zmiany w morskich i lądowych ekosystemach (zachodnia Antarktyka, Szetlandy Południowe, Zatoka Admiralicji).* Nauka 1, 161-172.
- SHARP M., PARKES J., CRAGG B., FAIRCHILD I. J., LAMB H., TRANTER M., 1999. *Widespread bacterial populations at glacier beds and their relationship to rock weathering and carbon cycling.* Geology 27, 107-110.
- SIEBURTH J. MCN., 1964. *Polymorphism of a marine bacterium (Arthrobacter): as a function of multiple temperature optima and nutrition.* Proc. Symp. Exp. Mar. Ecol. Occas. Publ., No. 2, Grad. Sch. Oceanogr., Univ. R. I., Kingston, R. I., 11-16.
- ŚWIĄTECKI A., GÓRNIK D., JANKOWSKA K., ZDANOWSKI M., BORSUK P., ŻMUDA-BARANOWSKA M., GRZESIAK J., 2010. *Effects of global warming on microbial community structure and function in the glacier lagoon (Ecology Lagoon, King George Island, Antarctica).* Global Change IGBP 17, 7-15.
- TAKEUCHI N., KOHSHIMA S., YOSHIMURA Y., SEKO K., FUJITA K., 2000. *Characteristics of cryoconite holes on a Himalayan glacier, Yala Glacier Central Nepal.* Bull. Glaciol. Res. 17, 51-59.
- TATUR A., 2007. *Zmiany ekosystemów morskich i lądowych Antarktyki pod wpływem fluktuacji klimatycznych.* [W:] *Zmiany klimatyczne w Arktyce i Antarktyce w ostatnim pięćdziesięcioleciu XX wieku i ich implikacje środowiskowe.* STYSZYŃSKA A., MARSZ A. A. (red.). Wydawnictwo Uczelniane Akademii Morskiej, Gdynia. 77-91.
- TATUR A., MYRCHA A., 1984. *Ornithogenic soils on King George Island (Maritime Antarctic).* Pol. Polar Res. 5, 31-60.
- TUNG H. C., PRICE P. B., BRAMALL N. E., VRDOLJAK G., 2006. *Microorganisms metabolizing on clay grains in 3-km-deep Greenland basal ice.* Astrobiology 6, 69-86.
- TURNER J., BINDSCHLADLER R., CONVEY P., DI PRISCO G., FAHRBACH E., GUTT J., HODSON D., MAYEWSKI P., SUMMERHAYES C., 2009. *Executive summary* [W:] *Antarctic Climate Change and Environment.* Victoire Press, Cambridge.
- YDE J. C., PAASCHE Ø., 2010. *Reconstructing climate change: Not all glaciers suitable.* EOS 91, 189-190.
- YDE J. C., BÁRCENA T. G., FINSTER K. W., 2011. *Subglacial and Proglacial Ecosystem Responses to Climate Change.* [W:] *Climate Change – Geophysical Foundations and Ecological Effects.* BLANCO J., KHERADMAND H. (red.). InTech, Rijeka, Croatia, 459-478.
- ZDANOWSKI M. K., WĘGLEŃSKI P., 2001. *Ecophysiology of soil bacteria in the vicinity of Henryk Arctowski Station, King George Island, Antarctica.* Soil Biol. Biochem. 33, 819-829.
- ZDANOWSKI M. K., WĘGLEŃSKI P., GOLIK P., SASIN J. M., BORSUK P., ŻMUDA M. J., STANKOVIC A., 2004. *Bacterial diversity in Adelie penguin, Pygoscelis adeliae guano: Molecular and morphological approaches.* FEMS Microbiol. Ecol. 50, 163-173.
- ZDANOWSKI M. K., ŻMUDA M. J., ZWOLSKA I., 2005. *Bacterial role in the decomposition of marine-derived material (penguin guano) in the terrestrial maritime Antarctic.* Soil Biol. Biochem. 37, 581-595.
- ZDANOWSKI M. K., ŻMUDA-BARANOWSKA M. J., BORSUK P., ŚWIĄTECKI A., GÓRNIK D., WOLICKA D., JANKOWSKA K. M., GRZESIAK J., 2012. *Culturable bacteria community development in postglacial soils of Ecology Glacier, King George Island, Antarctica.* Polar Biol. DOI: 10.1007/s00300-012-1278-0.
- ŻMUDA-BARANOWSKA M. J., 2010. *Bioróżnorodność bakterii biorących udział w degradacji materii organicznej pochodzenia morskiego w przybrzeżnych środowiskach lądowych Antarktyki i Arktyki.* Rozprawa Doktorska, Zakład Biologii Antarktyki PAN.