

## KRIKONITY I KRIJAMY W PRZYLEPIE LODOWEJ ANTARKTYKI

### CRYOCONITE HOLES AND CRYOCAVERNES ON FAST ICE IN ANTARCTICA

Stanisław Rakusa-Suszczewski

rakusa.suszczewski@gmail.com

**Zarys treści.** Krikonity są cylindrycznymi otworami powstałymi w wyniku topnienia na lodowcu w otoczeniu ziarn mineralnych. Takie formy obserwowano na powierzchni przylepy lodowej powstałej na morzu w sąsiedztwie oazy Thala Hills na Ziemi Enderby w Antarktydzie Wschodniej. Otwory krikonitów są większe przy brzegu niż dalej od brzegu w wyniku selekcji cząstek mineralnych wynoszonych przez wiatr z oazy. W przylepie lodowej powstają też kriojamy jako efekt topnienia lodu wokół fragmentów makroglonów, które przygłnęły do dna powstającego lodu, często wraz z lodem dennym. Kriojamy i krikonity są więc różnego pochodzenia. Prezentowane są warunki środowiskowe i tworzenie się zespołu podlodowego.

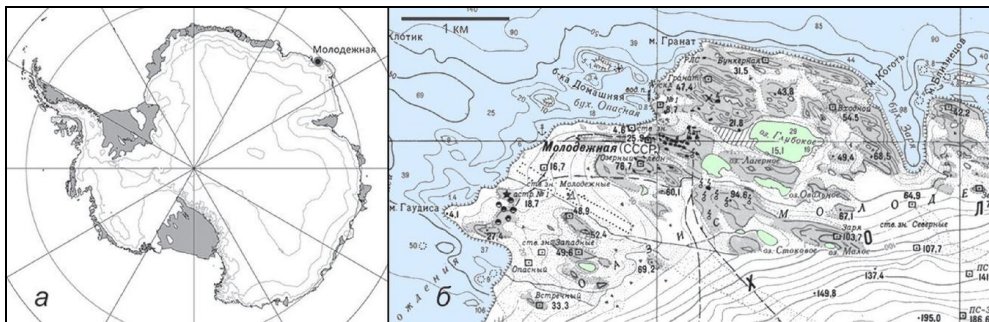
**Słowa kluczowe:** krikonity, kriojamy, stały lód brzegowy, makroglony, Antarktyda.

#### 1. Obszar badań i warunki klimatyczne

W rejonie radzieckiej (rosyjskiej) stacji antarktycznej *Mołodiożnaja* (ros. Молодежная, ang. *Molodezhnaya*; 67°40'S i 45°05'E) zlokalizowanej w oazie Thala Hills, w zachodniej części Ziemi Enderby, we Wschodniej Antarktydzie, polscy biolodzy Stanisław Rakusa-Suszczewski i Krzysztof Opaliński, przebywali zimą 1969 roku, będąc członkami 14 Radzieckiej Wyprawy Antarktycznej. Trwający cały rok pobyt pozwolił im zaznajomić się z wieloma zjawiskami charakterystycznymi dla tego obszaru. W czasie ponownego pobytu S. Rakusy-Suszczewskiego na tym obszarze, w ramach 17 Radzieckiej Wyprawy Antarktycznej (Rakusa-Suszczewski 1973) uzupełniono niektóre z obserwacji lodu morskiego i jego zespołu wewnątrz i podlodowego.

Stacja *Mołodiożnaja* zlokalizowana jest w małej oazie Thala Hills (холмы Тала) leżącej na południowym brzegu Zalewu Alasheyeva (ros. Залив Алашеева, ang. *Alasheyev Bight*) nad Morzem Kosmonautów (ryc. 1). Andreev (2013) podaje, że całkowita powierzchnia oazy wynosi 41 km<sup>2</sup>. Morze Kosmonautów przez większą część roku pokryte jest lodem. Pod koniec zimy krawędź stałego lodu morskiego oddalona jest od wybrzeża na prawie 100 km. Jedynie czasami bardzo silne, sztormowe wiatry występujące jesienią łamią go i odpychają od brzegu. Oaza otoczona jest przez dwa lodowce wyprowadzające – od zachodu *Campbella* i od wschodu – *Hayesa*. Z tego względu w Zalewie Alasheyeva obserwuje się bardzo dużo gór lodowych. Oazę Thala Hills tworzą trzy pasma wzgórz i przybrzeżnych grzbietów skalnych wolnych od lodu i śniegu o powierzchni około 2 km<sup>2</sup>, na których gnejsy, łupki i kwarcyty wychodzą na powierzchnię. Grzbiety te osiągają wysokości do 30-50 m, maksymalnie do 110 m n.p.m. i ciągną się w kierunku NW, równoległe do linii brzegowej (ryc. 1). Część wzgórz pokrywają gleby strukturalne w formie kamiennych wielokątów (Andreev 2013). Rozdzielają je doliny wypełnione śniegiem. W skalnych dolinkach występuje kilkadziesiąt jezior słodkowodnych (Rakusa-

Suszczewski 2015). Na południe, w odległości 1-2 km od stacji, wznosi się kopuła lodowa kontynentu. W odległości 10 km od brzegu wysokość kopuły lodowej sięga już około 500 m.



Ryc. 1. Położenie obszaru badań na Antarktydzie (a) i mapa okolic stacji Molodozhnaya (b) według Andreeva (2013)

Fig. 1. Location area of research in Antarctica (a) and map the surrounding area Molodezhnaya station (b) by Andreev (2013).

Klimat w rejonie stacji Molodozhnaya uwarunkowany jest położeniem na krawędzi kontynentu pokrytego przez kopułę lądolodu i dopływem promieniowania słonecznego. Andreev (2013) podaje, że bezpośrednie promieniowanie słoneczne wynosi 45 kcal/cm<sup>2</sup>, całkowite promieniowanie słoneczne – 100,6 kcal/cm<sup>2</sup>, promieniowanie pochłonięte – 70,5 kcal/cm<sup>2</sup>, a bilans promieniowania osiąga 30,5 kcal/cm<sup>2</sup>. W ciągu całego roku występują ujemne temperatury powietrza oraz silne i huraganowe wiatry. Średnia roczna temperatura powietrza w tym rejonie wynosi około –11°C, wartości średnie miesięczne wahają się od –0,7°C w styczniu do –18,7°C w lipcu, a wartości absolutne od 9°C do –42°C. W miesiącach letnich przeważają wiatry wschodnie, a w pozostałym okresie wiatry południowo-wschodnie. Liczba dni z wiatrem sztormowym (> 17 m/s) przekracza 221 dni w roku. Średnia roczna prędkość wiatru wynosi 10,6 m/s. Wiatry katabatyczne rozwijające się na stromych zboczach kopuły lądolodu (w odległości 350 km od brzegu wysokość lądolodu osiąga już 2500 m n.p.m.) wieją nocą z dużą prędkością, osiągającą w okresie lata 25-30 m/s, a w kwietniu-październiku nawet do 54 m/s. Tak duże prędkości wiatru występują w sytuacjach, gdy dochodzi do zbieżności wiatrów katabatycznych i wiatrów wiejących w tylnej części cyklonów występujących w strefie wybrzeża Antarktydy. Latem, zwłaszcza w ciągu dnia, wiatr na ogół wieje nieco słabiej. W okresie zimowym, w związku z ochłodzeniem powietrza nad pokrywą lodu morskiego, na wybrzeżu wiatr katabatyczny staje się nieregularny. Czasami spada tylko u podnóża kopuły, co powoduje, że na wybrzeżu utrzymuje się bezwietrzna pogoda ([http://www.aari.aq/stations/mol/mol\\_en.html](http://www.aari.aq/stations/mol/mol_en.html)).

## 2. Erozja eoliczna

Wiatry wiejące nad oazą Thala Hills sprzyjają procesom wywiewania materiału (deflacji) i erozji eolicznej (korozji). W dominujących tu gnejsach i łupkach, na skutek dużych dobowych zmian temperatury w okresie letnim i silnego nagrzewania się podłoża w bezchmurne dni następuje eksfoliacja – powierzchnia skał „linieje” płytami podcinanymi u podstawy, a w zagłębieniach skał rozwijają się kotły. W wyniku korozji tworzą się też niewielkie otwory w blokach skalnych eksponowanych na wiatr.

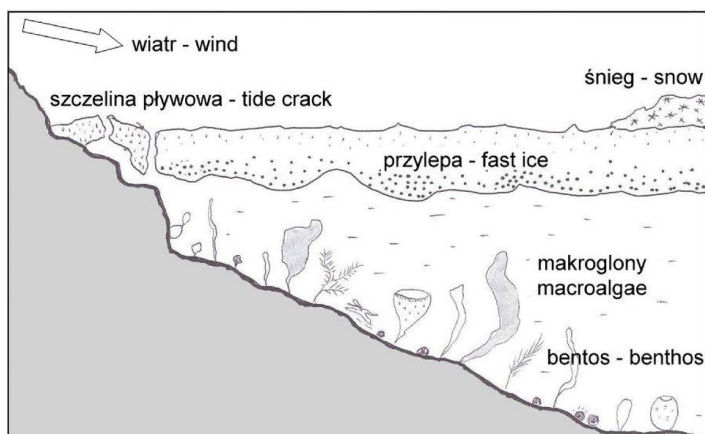
W otworach tych, ale i w większych kottach, zbiera się żwir, piasek i śnieg będący źródłem wody, czemu towarzyszy rozwój ubogich zielonkawych glonów (patrz fotografie ze stron 114-119 w pracy Rakusy-Suszczewskiego (1973)). W kottach i po zawietrznej stronie bloków skalnych, w cieniu wiatrowym, również akumuluje się piasek, żwir oraz śnieg i tworzą się zaczątki gleby. Na postawionej w roku 1909 przez ekspedycję Mawsona piramidzie skalnej na górze Gaussa pojawiły się otwory korazyjne, co pozwoliło obliczyć, że tempo ich powstawania wynosiło 1,0-1,5 mm na rok. Erozja eoliczna powoduje wywiewanie żwiru, piasku i pyłu ze wzgórz oazy Thala Hills na przylepę lodową. W wyniku działania silnych wiatrów katabatycznych w strefie przybrzeżnej przylepa lodowa nie jest pokryta śniegiem. Jest on przewiewany po lodzie na większe odległości od linii brzegowej. Jednak powierzchnia przylepy w pobliżu brzegu nie jest czysta – wywiewane z mineralnej powierzchni oazy ziarna skalne trafiają na lód. Największe ziarna żwiru osadzone są najbliżej brzegu oazy. Czym dalej od brzegu, tym na powierzchni lodu osiada piasek drobniejszy, a na górach lodowych stojących jeszcze dalej w morzu osiada pył skalny barwiąc góry i przyczyniając się do ich intensywnego topnienia w okresie lata.

### 3. Przylepa lodowa

W 1969 roku, w Zatoce Opasnaja (niewielka zatoczka poboczna Zalewu Alasheyeva; ryc. 1b) graniczącej z oazą Thala Hills początkowe postaci lodu morskiego, to jest lepa śnieżna (śnieg przepojony wodą morską) i śrzyć pojawiły się w pierwszych dniach maja. W strefie brzegowej widać było lód denny (anchor ice), do którego przyczepiona była roślinność porastająca dno morskie (Rakusa-Suszczewski 1973). Jeśli przyczepność lodu dennego do gruntu jest mniejsza niż siła wyporu lodu, do którego przymarzała roślinność, lód denny odrywa się i wypływa pod powierzchnię istniejącego już na powierzchni wody lodu. Wtedy lód denny zmarza z lodem tworzącym się na powierzchni morza, tworząc jednolitą pokrywę lodu morskiego. Powoduje to podnoszenie z dna, fragmentów makroglonów i pokrywającą je florę okrzemek peryfitonowych, jak również i wielu bezkręgowców dennych, np. obunogów *Paramoera walkeri* (Rakusa-Suszczewski 1972, 1973). W ten sposób podniesione z dna fragmenty makroglonów wmarzają w lód. W rezultacie grubość przylepy wzrasta, lód nie jest „czysty”, gdyż zawiera wewnątrz liczne fragmenty ciemnej materii organicznej.

W 1969 roku ostatecznie stały lód (przylepa, pripaj) na Zatoce Opasnaja utworzył się 18 maja. Przy samym brzegu powstała szczelina pływowa (ryc. 2). Różne warunki zamarzania lodu w różnych miejscach powodowały, że ostatecznie grubość lodu w zatoce wahała się od 125 do 132 cm, a w niektórych miejscach osiągała 151 cm. Dla porównania w rejonie chińskiej stacji Zhongshan (69°38'S i 76°4'E) leżącej na wybrzeżu Antarktydy nieco dalej na wschód, nad Zatoką Prydza, gdzie średnia temperatura roczna wynosi -9,6°C, grubość lodu stałego w strefie przybrzeżnej sięgała maksymalnie 174 cm.

W rejonie naszych badań przyrost lodu wynosił od 0,4 do 0,7 cm/dobę, a temperatura powierzchni przylepy (lodu stałego) wahała się od -23°C w lipcu-sierpniu do -3°C w listopadzie. Zimą temperatura wody morskiej w strefie litoralu i przylepy lodowej pozostawała na tym samym poziomie -1,8°C, przy zawartości tlenu 7,4 ml/l i zasoleniu około 34,4 PSU. W połowie listopada temperatura lodu wyrównała się i rozpoczęło się jego wewnętrzne topnienie. Topnienie to rozpoczyna się od przybrzeżnej warstwy przylepy, gdyż promieniowanie słoneczne bezpośrednio dociera tam do czystej powierzchni lodu. Dalej od brzegu występowanie na lodzie pokrywy śnieżnej ogranicza dostęp promieniowania słonecznego do wnętrza przylepy i wody znajdującej się poniżej, co opóźnia rozpoczęcie procesów topnienia.



Ryc. 2. Fragment przylepy lodowej w rejonie Thala Hills

Fig. 2. Fragment of fast ice in the area of Thala Hills.

Obserwowane latem przy pękającej przylepie zmiany temperatury wody, zasolenia i zawartości tlenu miały charakter krótkotrwały. Zmiany te w rejonie naszych obserwacji zachodziły od połowy stycznia do połowy lutego i dotyczyły dużych wahań zasolenia – od 26-29 PSU do poniżej 8 PSU w trzecim tygodniu stycznia, oraz zawartości tlenu – od 7 do 9 ml/l pod lodem (Rakusa-Suszczewski i Klekowski 1973). Temperatura wody wahała się od  $-1,6^{\circ}\text{C}$  w dniu 24 grudnia 1971 roku do  $-0,05^{\circ}\text{C}$  24 stycznia 1972 roku. 21 lutego 1972 r., wraz z ochłodzeniem i tworzącym się przy spadku temperatury powietrza lodem, spadła do  $-1,6^{\circ}\text{C}$ . Drugim ważnym parametrem lodu przylepy jest jego zasolenie. Pomiar wykonywane w rejonie chińskiej stacji Zhongshan (Lei i in. 2011) wykazały, że na powierzchni zasolenie lodu wahało się od 3 PSU, a w warstwie dennej lodu – do 8 PSU. Zasolenie lodu zależy od historii zamrażania, struktury lodu i od penetracji wody morskiej w murszejącej lod.

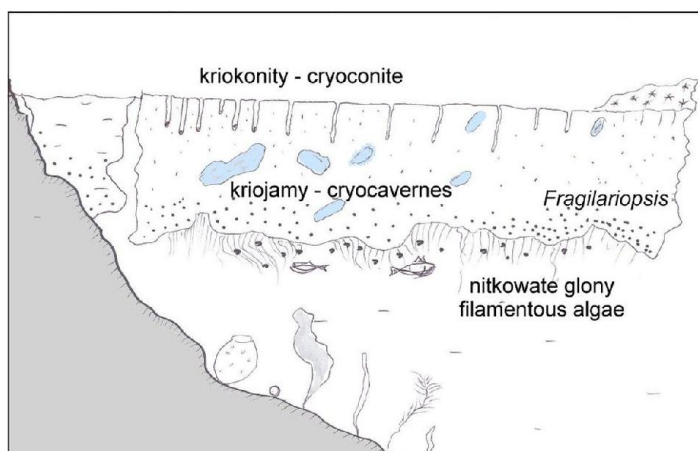
#### 4. Kriokonity i kriojamy

Kriokonity są otworami z wodą powstałe na powierzchni lodu, w wyniku wytapiania go przez osiadające na jego powierzchni cząstki mineralne i mikroorganizmy (Grzesiak i Zdanowski 2013, Langford i in. 2014). Kriokonity znane są z lodowców całego świata, natomiast kriokonity powstające na powierzchni lodu morskiego nie były jak dotychczas szerzej badane. Jak podaje Leslie (1879; za Fountain i in. 2004) kriokonity po raz pierwszy opisał i nadał im nazwę szwedzki badacz A.E. Norden-skjöld obserwując w czasie wyprawy na Grenlandię w 1870 roku występujące na powierzchni lodowca wąskie otwory wypełnione wodą i mające na dnie ciekłą warstwę osadu. Nazwa pochodzi od greckich słów „κρύος” – „lód” i „κουίρα” – „pył, kurz”. Kriokonity w lodzie morskim, powstające w wyniku wytapiania występujących na lodzie, wmarzniętych w lód lub przymarzniętych do dolnej powierzchni lodu glonów (głównie okrzemek) i cząstek mineralnych jako pierwszy opisał Nansen (1906), choć nie użył tej nazwy. W opinii Nansena, latem, w rezultacie intensywnego pochłaniania ciepła słonecznego przez ciemnobrązowe glony lub ciemne cząstki mineralne znajdujące się na powierzchni lodu morskiego lub w jego wnętrzu dochodzi do wytapiania w lodzie wąskich, o średnicy do około cala i głębokich na kilka cali, pionowych otworów (kanalików).

Procesy formowania i ewolucji kriokonitów w lodzie lodowcowym opisane są przez szereg badaczy (szerzej m.in. przez Ishikawę i Kobayashiego 1985, Podgornego i Grenfella 1996), te które tworzą się w lodzie morskim – znacznie rzadziej. Występowanie kriokonitów w lodzie morskim Arktyki omawiają Brinkmeyer i współautorzy (2004), a w przylepie lodowej Antarktyki – Ishikawa i Kobayashi (1985).

Podstawową przyczyną powstawania zagłębień w lodzie (kriokonitów) licznie występujących na przylepie pokrywającej Zalew Alasheyeva (ryc. 3) jest wywiewanie cząstek mineralnych z oazy Thala Hills i silnego ich nagrzewanie w wyniku pochłaniania promieniowania słonecznego. W występowaniu kriokonitów w Zalewie Alasheyeva zaznacza się wyraźna prawidłowość – w wyniku selekcji cząstek mineralnych wnoszonych przez wiatr z oazy, otwory kriokonitów są większe przy brzegu niż dalej od brzegu. Różnią się one od kriokonitów z lodowców, bo powstają w słonawym, stosunkowo ciekim lodzie, pływającym na morzu. Proces powstawania kriokonitów wiosną i latem jest tu szczególnie intensywny ze względu na szerokość geograficzną i odpowiadającą temu wysokość Słońca oraz silne promieniowanie. W związku z niezbyt dużą grubością lodu morskiego (120-130 cm) szybko może dochodzić do „przecinania” lodu przez otwory kriokonitów. W tym momencie słonawa woda wypełniająca kriokonity spływa pod lód, a żwir i piasek opada na dno.

Szerzej nie były też badane „kriojamy”, których pochodzenie jest inne niż kriokonitów, i który to termin próbuję wprowadzić. Kriojamy mają dłuższą historię. Powstają w wyniku wewnątrzlodowego topnienia lodu przylepy, wokół wmarzniętych wewnątrz lodu fragmentów makroglonów i zwierząt bentosowych. Kiedy promieniowanie słoneczne wiosną zaczyna penetrować lód, ciemne fragmenty glonów ogrzewają się i wokół nich tworzą się kawerny wypełnione wodą – które można nazwać kriojamami. Objętość wody w takich jamach jest znacznie większa niż w kriokonitach. Kriojamy stwarzają nawet zagrożenie przy chodzeniu po lodzie. Woda w tych powierzchniowych kriokonitach i wewnętrznych kriojamach ma niskie zasolenie, a dynamika zmian temperatury wody wewnątrz kriojam nawet w ciągu doby powoduje zamarzanie i odmarzanie na powierzchni roztopionej w nich wody.



Ryc. 3. Kriokonity i kriojamy w przylepie lodowej w rejonie Thala Hills  
Fig. 3. Cryoconite and cryocavernes on fast ice in the area of Thala Hills.

Obecność kriokonitów i kriojam osłabia spoiwość lodu w strefie przybrzeżnej i powoduje jego szybsze połamanie się wraz z nadchodzącym sezonem letnim. Dynamika tego procesu ma szereg

konsekwencji biologicznych. Kiedy rozpoczyna się topnienie lodu, zespół nitkowatych glonów rozwijających się pod lodem (ryc. 3) odkleja się od przylepy lodowej i opada na dno zatoki stanowiąc część fitobentosu. W ostatniej dekadzie grudnia 1969 roku w strefie przybrzeżnej Zalewu Alasheyeva nie spotykano również pod lodem charakterystycznego dla tego zespołu gatunku przybrzeżnego bokoplawa *Paramoera walkeri* (Rakusa-Suszczewski 1972). W zespole tym, jak wykazały nasze obserwacje, występują również inne bezkręgowce: równonogi i widłonogi, żebroplawy, szczecioszczękie. Bezkręgowcami odżywiają się występujące pod lodem ryby *Pagothenia* i *Trematomus*, nimi zaś foki i wieloryby. Wewnątrz lodu przylepy i paku lodowego rozwijają się też inne glony. Wiosną połamany lód odsuwany jest wiatrami od brzegu, a strefa wolna od lodu stwarza warunki sprzyjające wiosennemu rozwojowi fitoplanktonu. Paradoksalnie wiosna wcześniej może pojawiać się na południu – w pobliżu brzegu kontynentu, niż na północy – gdzie pak lodowy pokryty jest warstwą śniegu. Natomiast procesy rozwoju glonów w lodzie morskim zależą od szerokości geograficznej i wysokości Słońca nad horyzontem oraz przenikania światła pod lód. Wcześniej ten proces odbywa się w rejonie północnym, później w południowym (Rakusa-Suszczewski 1972). Spostrzeżenie to potwierdza Ligowski (1998), który badał glony mikroskopowe w lodzie z Zatoki Admiralicji (Szetlandy Południowe, Antarktyka Zachodnia) i stwierdził w nim 95 taksonów, w większości okrzemek. Dominowały gatunki typowe dla lodu *Nitzschia spp.*, a ich rozwój obserwowano od połowy czerwca do połowy października. W Zatoce Admiralicji kriokonity w lodzie morskim nie były badane, jeśli występują to jedynie w głębi fiordu Ezcurra, w czasie występowania tam przylepy lodowej.

## 5. Wnioski

Można sądzić, że jeśli skalne wybrzeża Antarktydy ciągną się przez 1500 km linii brzegowej, to przy założeniu, że wiatry z tych obszarów wynoszą szczątki mineralne na lód na odległość do kilku kilometrów, powierzchnia występowania kriokonitów na lodzie morskim wynosi kilkadziesiąt tysięcy km<sup>2</sup>. Z taką też powierzchnią występowania specyficznego zespołu podlodowego glonów (patrz ryc. 3), należy się również liczyć wszędzie tam, gdzie linię brzegową Antarktydy tworzą wychodnie skał podłoża podlegające procesom deflacji i korazji.

Występowanie strefy kriokonitów i kriojam w lodzie morskim sprzyja wcześniejszemu rozpadowi przylepy wzdłuż skalistych odcinków brzegu, wszędzie tam gdzie występują wiatry odlądowe sprzyjające łamaniu przylepy, a tym samym wcześniejszemu tworzeniu się przybrzeżnych połygni niż na brzegach, które tworzone są przez lody szelfowe czy lodowce uchodzące do morza.

### Literatura:

- Andreev M.P., 2013. Lichens of the oasis Molodyozhnyi and adjacent areas (Enderby Land, Antarctic). *Novitates Systematicae Plantarum non Vascularium*, 47: 167-178 (in Russian).
- Brinkmeyer R., Glockner F.O., Helmke E., Amann R., 2004. Predominance of b-proteobacteria in summer melt pools on Arctic pack ice. *Limnology and Oceanography*, 49 (4): 1013-1021.
- Fountain A.G., Tranter M., Nylen T.H., Lewis K.J., Mueller D.R., 2004. Evolution of cryoconite holes and their contribution to meltwater runoff from glaciers in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *Journal of Glaciology*, 50 (168): 35-45.
- Grzesiak J., Zdanowski M.K., 2013. Mikrobiocenozy regionów polarnych w dobie globalnego ocieplenia. *Kosmos*, 62 (3): 341-349.

- Ishikawa N., Kobayashi S., 1985. On the internal melting phenomenon (puddle formation) in fast sea ice, East Antarctica. *Annals of Glaciology*, 6: 138-141.
- Langford H.J., Irvine-Fynn T.D.L, Edwards A., Banwart, S.A., Hodson A.J., 2014. A spatial investigation of the environmental controls over cryoconite aggregation on Longyerbreen glacier, Svalbard. *Biogeosciences*, 11: 5365-5380.
- Ligowski R., 1998. Diatoms in different Habitats of Admiralty Bay. Antarctica. Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Diatom Symposium, Perth, Australia, 28 September – 2 October 1998: 173-191.
- Nansen F., 1906. Protozoa on the ice-floes of the North Polar Sea. [w:] Nansen F. (ed.), *The Norwegian North Polar Expedition 1893-1896. Scientific Results*, 5(16). London, Longmans, Green and Co.; Christiania, Jacob Dybwad: 1-22.
- Podgorny I.A., Grenfell T.C., 1996. Absorption of solar energy in a cryoconite hole. *Geophysical Research Letters*, 23 (18): 2465-2468.
- Rakusa-Suszczewski S., 1972. The biology of *Paramoera walkeri* Stebbing (Amphipoda) and the Antarctic sub-fast ice community. *Polskie Archiwum Hydrobiologii*, 19 (1): 11-36.
- Rakusa-Suszczewski S., 1973. *Antarktyda 1968-1972*. Państwowe Wydawnictwa Naukowe. Warszawa: 1-242.
- Rakusa-Suszczewski S., 2015. Polskie badania limnologiczne w oazie Thala hills (Enderby land) w roku 1969. *Kosmos*, 64 (1): 185-190.
- Rakusa-Suszczewski S., Klekowski R.Z., 1973. Biology and respiration of the Antarctic Amphipoda (*Paramoera walkeri* Stebbing) in summer. *Polskie Archiwum Hydrobiologii*, 20 (3): 475-488.
- Ruibo Lei, Zhijun Li, Bin Cheng, Zhanhai Zhang and Petra Heil, 2010. Annual cycle of landfast sea ice in Prydz Bay, east Antarctica. *Journal of Geophysical Research*: 115 CO2006, doi:10.1029/2008JC005223.

Wpłynęło: 29 marca 2015 r., poprawiono: 27 lipca 2015 r., zaakceptowano: 30 lipca 2015 r.

## Summary

Cryoconite are cylindrical melt holes on glacial surface. Such creature were observed on surface of landfast sea ice near Thala Hills oasis in Antarctic. Holes are larger near shore than off shore depend of size of minerals selected by winds. In the land fast ice cryocavernes vere observed as effect of melting water around of macroalge attached bottom of ice. Cryocavernes are different orginate than cryoconites. Subfast ice community and environmental changes are presented.

**Key words:** cryoconite, cryocavernes, fast ice, macroalgae, Antarctica.