

Lodowce Arktyki szybko reagują na warunki klimatyczne, dlatego odgrywają szczególną rolę jako wskaźniki ocieplania klimatu. Wieloletnie ich badania są kluczem do zrozumienia przyszłych globalnych zmian środowiska.

PRZYSZŁOŚĆ CZYTANA Z LODU

prof. dr hab. Jacek Jania

Centrum Studiów Polarnych,
Uniwersytet Śląski, Katowice
Komitet Badań Polarnych,
Polska Akademia Nauk

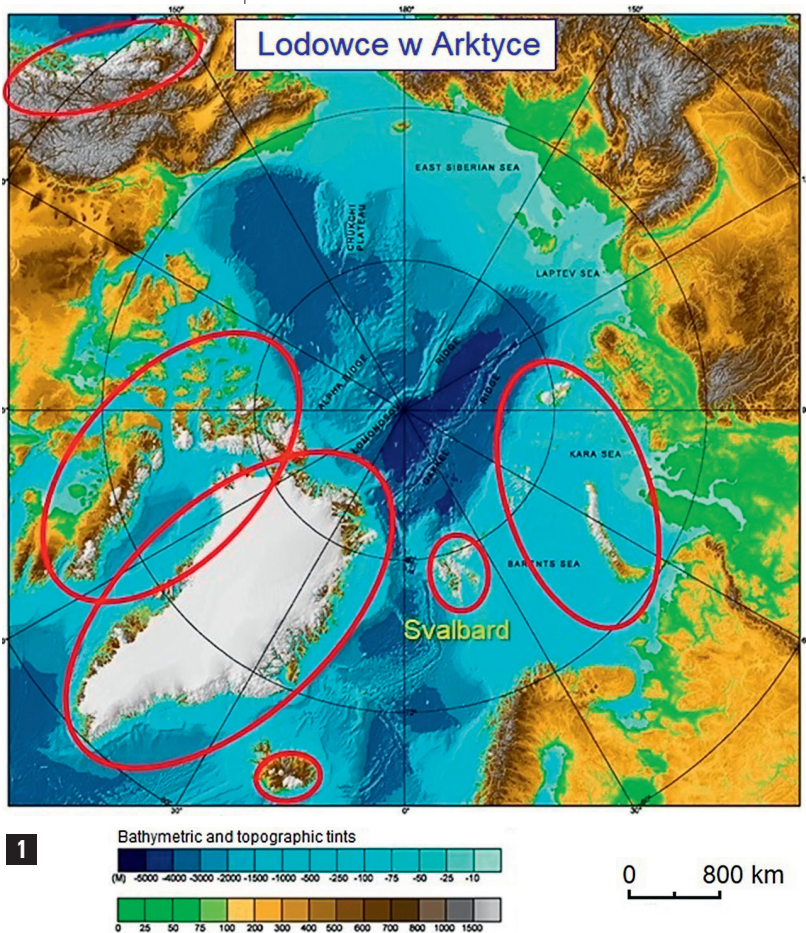
Lodowce to masy lodu utworzone na lądzie z gromadzonych corocznie opadów śnieżnych. Należą do nich wielkie lądolody na Antarktydzie i Grenlandii, czapy lodowe w wielu regionach Arktyki oraz mniejsze lodowce górskie i dolinne na całym świecie. Znajdują się w stałym, zazwyczaj powolnym, ruchu pod wpływem siły grawitacji. Mają różną wielkość, kształt i grubość oraz strukturę termiczną. Bardzo ważnym czynnikiem różnicującym jest zakończenie ich jęzorów. Większa liczba lodowców (zwykle mniejszych) kończy się na lądzie. Natomiast jęzory lodowcowe uchodzące do morza odprowadzają lód z największych obszarów zlodowaconych.

Oddziaływanie klimatu na lodowce odbywa się przez główne składowe bilansu masy lodowej: wielkość zimowych opadów śniegu (akumulację) oraz topnienie, czyli ablację powierzchniową. W klasycznym ujęciu bilansu masy lodowców nie uwzględnia się utraty masy na czole lodowca uchodzącego do morza. Ablacja frontalna to powiązane ze sobą pro-

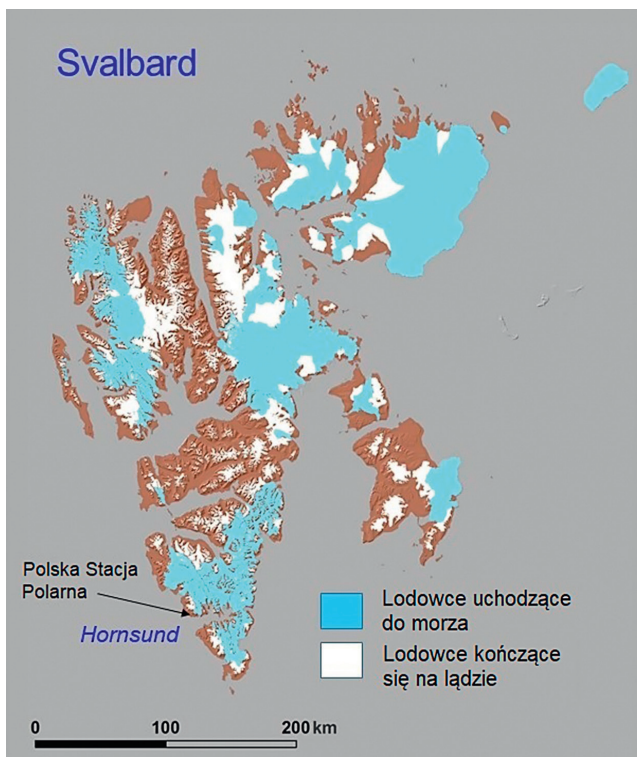
cesy topnienia na kontakcie z wodą morską i mechanicznego obłamywania się gór lodowych (cielenie się lodowców).

Ocieplenie klimatu skutkuje zwiększonym topnieniem, ale także większą produkcją gór lodowych. Monitoring bilansu masy lodowców pozwala precyzyjnie określać ich reakcję na zmiany klimatyczne. Takimi wieloletnimi badaniami objęta jest bardzo niewielka liczba z prawie 200 tys. lodowców na świecie. Podobnie jest w Arktyce. Natomiast zbadanie ablacji frontalnej, w odróżnieniu od ablacji powierzchniowej, jest bardzo trudne. Tylko kilka lodowców uchodzących do morza objętych jest systematycznymi pomiarami bilansu masy, z uwzględnieniem cielenia. Dla innych dokonywane są estymacje z wykorzystaniem różnych danych satelitarnych. Zespół z Uniwersytetu Śląskiego należy, obok badaczy z United States Geological Survey, do pionierów badań lodowców uchodzących do morza. Na przełomie lat 70. i 80. XX w. rozpoczęto badania lodowca Columbia i innych lodowców na Alasce, a kilka lat później lodowca Hans na południowym Svalbardzie. Jest on położony w pobliżu Polskiej Stacji Polarnej nad fiordem Hornsund.

Celem niniejszej publikacji jest przedstawienie reakcji lodowców Arktyki jako indykatorów ocieplania klimatu i wskazanie szczególnej roli mas lodowych uchodzących do morza. Te ostatnie są nadal słabo zbadane. Polskie studia oraz inicjatywy badawcze mają zatem istotne znaczenie dla lepszego zrozumienia globalnych zmian środowiska.



Obszary pokryte lodem w Arktyce (fot. 1) oraz lodowce uchodzące do morza na archipelagu Svalbard (fot. 2). Zaznaczono położenie Polskiej Stacji Polarnej na północnym wybrzeżu fiordu Horsund.



ZRÓDŁO: INTERNATIONAL BATHYMETRIC CHART OF THE ARCTIC OCEAN (IBCAO)
 HTTPS://WWW.NGDC.NOAA.GOV/MGG/BATHYMETRY/ARCTIC/ARCTIC.HTML
 ORAZ MAPA PRZYGOTOWANA PRZEZ M. BEASZCZYK, KATEDRA GEOMORFOLOGII, UNIWERSYTET ŚLĄSKI

W ruchu

W arktycznej części półkuli północnej, poza wielkim Łądolodem Grenlandzkim (ok. 1,71 mln km²) i jego otoczeniem, lodowce występują na Svalbardzie, na archipelagach Arktyki Rosyjskiej, w Arktyce Kanaadyjskiej, a także w Subarktyce na Islandii, Alasce południowej i Skandynawii. Z wyjątkiem Islandii i Skandynawii lodowce uchodzące do morza stanowią większość ze względu na ich powierzchnię. Na Svalbardzie, który jest głównym obszarem polskich badań, ogólna powierzchnia lodowców wynosi ok. 33,8 tys. km², z czego 68% to lodowce uchodzące do morza.

Arktyka ociepla się szybciej niż klimat w średnich szerokościach geograficznych i całego globu – to tzw. przyspieszenie arktyczne. Przykładowo, w Katowicach w ciągu ostatnich trzech dekad średnia roczna temperatura powietrza rosła w tempie 0,4 °C/10 lat, a w tym samym okresie na Svalbardzie o 1,1°C/10 lat w Hornsundzie (77° N) i o 1,4°C/10 lat w Longyearbyen (stolica, 78° N). Zatem ocieplenie Arktyki jest blisko trzykrotnie intensywniejsze. Powoduje to wzmożone topnienie lodowców, wpływając na bilans masy na ich powierzchni. Powstające wody roztopowe wnikają w głąb lodowców poprzez szczeliny i jaskinie w lodzie, docierając do podłoża. Wzrost ilości, a tym samym ciśnienia wód podlodowcowych redukuje tarcie i ułatwia poślizg lodowców po podłożu. Płyną one więc szybciej. Jest to dynamiczna reakcja lodowców na ocieplenie klimatu. Czoła lodowców uchodzących do morza podlegają wyporowi hydrostatycznemu wody morskiej, zgodnie z prawem Archimidesa. Ten czynnik także redukuje tarcie o podłoże i powoduje przyspieszenie ruchu lodowców w stronę czoła. Następuje rozciąganie dolnej części jezior lodowych, co skutkuje powstawaniem licznych szczelin równoległych do klifu lodowego. Szczeliny powodują rozluźnienie struktury ich czoł, co ułatwia odłamywanie się gór lodowych. Na proces cielenia ma wpływ spłot wielu czynników – ogólne „prawo cielenia” nie jest jeszcze określone. Jednakże wiadomo, że do najważniejszych czynników sterujących intensywnością cielenia należą: głębokość wody morskiej w stosunku do grubości lodu, szybkość ruchu lodowców oraz temperatura wody morskiej omywającej klif lodowy (wpływa na intensywność topnienia podwodnego, a tym samym stabilność czoła).

Z wyjątkiem pierwszego czynnika, który zależy głównie od topografii podłoża lodowców, pozostałe mają związek ze zmieniającym się klimatem. W uproszczeniu można powiedzieć, że im cieplejszy klimat, tym intensywniejsze cielenie, zwłaszcza jeśli zachodzi w kontakcie z głęboką wodą przed czołem lodowca.

Lodowce uchodzące do morza są przestrzennie dominujące w Arktyce, a jednocześnie są bardziej wrażliwe na ocieplenie klimatu.

PROF. JACEK JANIA



JAKUB OSTAŁOWSKI

Prof. dr hab. Jacek Jania

jest geografem, od roku 1972 zajmuje się badaniem obszarów polarnych i ich reakcją na zmiany klimatyczne. Specjalizuje się w arktycznych lodowcach pływających. Jest członkiem Europejskiej Rady Polarnej (EPB), przewodniczącym Komitetu Badań Polarnych Polskiej Akademii Nauk, kierownikiem Centrum Studiów Polarnych. Na Uniwersytecie Śląskim prowadzi wykłady na temat geodezji, kartografii, glaciologii oraz problemów związanych ze zmianami klimatycznymi. Jest autorem licznych publikacji oraz trzech książek.

W odwrócie

Dłuższe serie obserwacji bilansu masy lodowców arktycznych są rzadkością i koncentrują się na Svalbardzie. Obejmują łatwiejsze do bezpośrednich pomiarów lodowce zakończone na lądzie. Polskie badania lodowca Hans (od 1989) należą do nielicznych dla lodowców uchodzących do morza. Powierzchniowy bilans masy tego lodowca jest nieznacznie negatywny. Pomiar utraty masy w wyniku cielenia wymagają danych trudnych do uzyskania, a mianowicie: powierzchnia przekroju poprzecznego przez jeziora lodowe na jego czole, średnia roczna prędkość lodowca przy czole oraz zmiany położenia frontu lodowca (wielkość recesji, ewentualnie awansu). Niezbędne są pomiary topografii czoła i grubości lodu (bardzo trudne przy samym klifie lodowym ze względu na szczeliny) oraz głębokości morza przed frontem, średniej prędkości ruchu lodowca, a także śledzenie zmian położenia klifu w ciągu roku. Wyniki dla okresu 2009–2014 wykazały, że cielenie odpowiada średnio za 38% ogólnej utraty masy lodowca Hans (pozostała część to topnienie powierzchniowe). Przy czym obserwowana jest znaczna zmienność międzyroczna znaczenia ablacji frontальной (25–54%). Uwzględnienie utraty gór lodowych w bilansie masy lodowca sprawia, że skumulowana suma tego bilansu ma dramatycznie negatywny trend, który jest ponad 4 × bardziej ujemny niż dla lodowców lądowych. Oznacza to, że cielenie jest niezwykle istotnym procesem współczesnej, przyspieszonej deglacjacji Arktyki. Dokumentuje to trwale długoterminowe ocieplenie klimatu regionu.

Przykładem przyspieszenia deglacjacji Arktyki jest basen fiordu Hornsund na południu Svalbardu. Był on badany przez M. Błaszczyk z zespołem z Uniwersytetu Śląskiego. Na podstawie historycznych map, zdjęć lotniczych oraz obrazów satelitarnych prześledzono recesję zasięgu lodowców od początku XX w. W pierwszych czterech dekadach powierzchnia lodowców zmniejszała się w tempie $0,8 \pm 0,2 \text{ km}^2/\text{rok}$. W okresie 1936–1976 tempo recesji powierzchniowej wzrosło do ok. $1,6 \text{ km}^2/\text{rok}$, a po roku 2000 do $2,6 \text{ km}^2/\text{rok}$ do $3,5 \text{ km}^2/\text{rok}$ w ostatnich latach. Dokumentuje to dramatyczne przyspieszenie deglacjacji w XXI w.

Badania tego samego zespołu z Uniwersytetu Śląskiego (M. Grabiec i inni), dotyczące grubości lodowców z wykorzystaniem sondowania radarowego, wykazały, że podłoże lodowca Horn, który zamyka fiord od wschodu, leży do 40 m poniżej poziomu morza. Oznacza to, że dalsza jego recesja doprowadzi w przyszłości do otwarcia połączenia morskiego pomiędzy Morzem Grenlandzkim i Morzem Barentsa. Fiord Hornsund stanie się cieśniną, prawdopodobnie około połowy XXI w. Zatem południowa część Spitsbergenu – Sørkapp Land będzie nową wyspą w archipelagu Svalbard.

Studia w atlantyckiej części Arktyki (J.R. Carr z zespołem) wykazały, że średnie tempo recesji lodowców uchodzących do morza wzrosło 3,5-krotnie pomiędzy okresem 1992–2000 a okresem 2000–2010 (odpowiednio z $30,5 \text{ m}/\text{rok}$ do prawie $106 \text{ m}/\text{rok}$), jednak przy zróżnicowaniu pomiędzy badanymi regionami. Wyniki te potwierdzają obserwacje ze Svalbardu – szybką i znacznie przyspieszającą deglacjację w przeciągu ostatnich dekad.

W zmianie

Recesja lodowców oddziałuje na otoczenie. Odślaniany jest ląd, ale przede wszystkim powiększane są wodne powierzchnie fiordów. W obu przypadkach zmniejsza się średnie albedo regionu. Powierzchnie lądu i morza odbijają mniej promieniowania słonecznego niż lodowce (odpowiednio z 50% dla lodowców do ok. 30% dla lądu i 10% dla wody). Większe pochłanianie promieniowania słonecznego powoduje lokalne i regionalne przyspieszenie ocieplania klimatu i topnienia lodu. Jest to dodatnie sprzężenie zwrotne intensyfikujące ocieplenie zlodowaconych regionów Arktyki. Wprawdzie dominującym dodatnim sprzężeniem zwrotnym jest zanik pokrywy lodu morskiego na wielkich przestrzeniach Oceanu Arktycznego, ale zanikanie lodowców ma istotne znaczenie regionalne.

Prace różnych autorów, w tym badania zespołu holendersko-polskiego dla lodowca Hans (J. Oerlemans, J. Jania i L. Kolondra), wskazują, że przyspie-

Lodowiec Hansbreen
 spływający do fiordu
 Hornsund.



M. MICHAŁSKI

szona deglacjacja lodowców uchodzących do morza ma charakter nieodwracalny w perspektywie wielu stuleci. Z modelu wynika, że w zależności od przyjętych scenariuszy zmian warunków klimatycznych, ze względu na przegłębienie dna doliny lodowcowej do 60–100 m poniżej poziomu morza, do końca tego stulecia lodowiec zmniejszy swoją długość do 10–12 km, a objętość odpowiednio o 45–65%.

W przypadku znacznej redukcji lub zatrzymania emisji antropogenicznych gazów szklarniowych recesja nie zostanie powstrzymana ze względu na cienie się lodowca do głębokiej wody. Ponadto, nawet w przypadku ochłodzenia klimatu i znacznego wzrostu opadów śnieżnych (uzyskanie dodatniego bilansu masy lodowca), awans jezora do głębokiej wody morskiej nie będzie możliwy. Ablacja frontalna na głębszej wodzie będzie równoważyła zwiększony napływ lodu. Dopiero znaczne wypłylenie fiordu w efekcie sedimentacji materiału mineralnego z otaczającego lądu pozwoli na awans jezora i jego stabilizację na spiętrzonych osadach dennych. Wskazują na to wyniki datowań metodą C^{14} torfów, które wytopiły się na powierzchni lodowca Hans. Dowodzą one, że dolina Hansbreen była wolna od lodowca w okresie ok. 7,2–5,2 tys. lat temu (okres ciepły w Holocenie

nie z temperaturami wyższymi o 2°C niż obecnie). Obserwowana na Svalbardzie sedimentacja morska w tempie 1 cm na rok jest wysoka. Zatem wypłylenie o ok. 50 m, które musiało trwać około 5 tys. lat, umożliwiło awans tego lodowca w czasie Małej Epoki Lodowcowej.

Biorąc pod uwagę wspomniany już fakt, że duża część lodowców Arktyki uchodzi do przegłębionych dolin fiordowych, należy spodziewać się dalszej przyspieszonej deglacjacji. Potencjalne odbudowanie zasięgu lodowców do stanu współczesnego zajmie zaś tysiąclecia. Wskazuje to na potrzebę uświadomienia sobie, że zahamowanie ocieplenia nie nastąpi w skali dekad lub stuleci po ustaniu antropogenicznej emisji gazów szklarniowych do atmosfery.

Większe topnienie wszystkich lodowców i wzmożona produkcja gór lodowych powoduje globalny wzrost poziomu mórz. Jest on szacowany na ok. $3,0\text{--}3,5 \pm 0,5$ mm/rok (wg różnych autorów). Według najnowszej pracy J. Box i zespołu lodowce Arktyki odpowiadają za ponad 1/3 tego wzrostu, stanowią jego największe regionalne źródło. Grenlandia ma w tym prawie połowę udziału. Ekspansja termiczna wody morskiej jest źródłem ok. 1/3 wzrostu poziomu oceanów, a Antarktyda wraz z pozostałymi lodowca-



mi na Ziemi i zmniejszeniu lądowej retencji wody odpowiada za resztę (niecałe 30%).

Pomiędzy okresami 1986–2005 a 2006–2015 nastąpił trzykrotny wzrost udziału lodowców arktycznych w podnoszeniu poziomu oceanu światowego. Tak więc lodowce arktyczne odgrywają istotną rolę w zmianach środowiska w skali globalnej. Przyspieszona recesja lodowców wyprowadzających Łądolodu Grenlandzkiego mogłaby grozić przyspieszonemu podnoszeniu poziomu oceanu światowego, co ponad dekadę temu szacowano na nawet 2 m do końca XXI w. Analiza W.T. Pfeffera ze współautorami wykazała, że ta wartość jest mało realistyczna, gdyż łądolód ten jest otoczony ze wszystkich stron górami. Lodowce wyprowadzające lód do oceanu przeciskają się przez wąskie bramy fiordów.

Trzeba jednak pamiętać, że wzrost poziomu oceanów oraz temperatury wody morskiej wokół Antarktydy Zachodniej przyczynia się do powolnej dezintegracji lodowców szelfowych i przyspieszenia ruchu lodowców wyprowadzających z Łądolodu Antarktydy Zachodniej. W odróżnieniu od Grenlandii największe z tych lodowców wyprowadzających (Pine Island Glacier, Thwaites Glacier oraz strumienie lodowe zasilające Lodowiec Szelfowy Ronne) mają szerokie bramy

z podłożem znacznie poniżej poziomu morza. Wiele modeli wskazuje, że przy niestabilności dynamicznej Łądolodu Antarktydy Zachodniej może nastąpić wzrost poziomu oceanu światowego o nawet 3,3 m w stosunkowo krótkim czasie, nawet na przestrzeni dekad. Tak więc wyraźny, ale ograniczony wpływ lodowców Arktyki na poziom oceanów może przyczynić się do katastrofalnego podniesienia poziomu mórz spowodowanego lodowcami po przeciwnej stronie Ziemi – w Antarktyce, jak to sugerują stosunkowo liczne scenariusze skutków globalnego ocieplenia.

Powolny wzrost poziomu morza jest obserwowany także na polskim wybrzeżu. Nakładają się na to sztormowe spiętrzenia wód. Jesienne i zimowe spiętrzenia sztormowe (>70 cm) zwiększyły trzykrotnie swoją częstotliwość w ciągu ostatnich 60 lat. Jest to także skutek ocieplania klimatu w postaci intensywniejszej cyrkulacji atmosferycznej z kierunku zachodniego. Niszczenie plaż, erozja wybrzeży klifowych i wydmy oraz uszkodzenia infrastruktury przybrzeżnej są tego konsekwencjami.

Konkluzje

- Lodowce arktyczne podlegają przyspieszonej recesji, potwierdzając długookresowy trend ocieplania klimatu.
- Większe topnienie stymuluje szybszy ruch lodowców uchodzących do morza, a w konsekwencji większe cielenie, które dramatycznie zwiększa ujemny bilans masy lodowców.
- Powoduje to dodatnie sprzężenie zwrotne dla dalszego ocieplania klimatu.
- Ze względu na fakt, że podłoże większości lodowców uchodzących do morza leży wyraźnie poniżej jego poziomu, ich recesja jest nieodwracalna w skali czasowej kilku stuleci, nawet przy zatrzymaniu ocieplania i wyraźnym wzroście opadów śniegu.
- Intensywniejsze topnienie i cielenie lodowców Arktyki jest bardzo ważną składową wzrostu poziomu oceanu światowego. Jego podnoszenie nie ustanie nawet po redukcji antropogenicznej emisji gazów szklarniowych.

Winniśmy więc zredukować emisję gazów szklarniowych, próbując mitygować ocieplenie klimatu. Jednak trzeba pamiętać o tym, że reakcja lodowców jest odłożona w czasie, nawet na tysiąclecia. Zatem szczególną uwagę powinniśmy poświęcić adaptacji do życia w wyraźnie cieplejszym klimacie i przy wzroście poziomu mórz.

Szpecially istotne jest zwiększenie nakładów na intensywniejsze, skoordynowane międzynarodowo badania interakcji atmosfery z oceanami i kriosferą.

JACEK JANIA

Chcesz wiedzieć więcej?

Benn D.I., Evans D.J.A. (2010). *Glaciers and Glaciation*. 2nd edition, Hodder Education, London, 802 pp.

Błaszczak M., Jania J.A., Kolondra L. (2013). Fluctuations of tidewater glaciers in Hornsund Fjord (Southern Svalbard) since the beginning of the 20th century. *Polish Polar Research* 34(4), 327–352.

Carr J.R., Stokes C.R., Vieli A. (2017). Threefold increase in marine-terminating outlet glacier retreat rates across the Atlantic Arctic: 1992–2010. *Annals of Glaciology* 58(74) 2017 doi: 10.1017/aog.2017.3

Oerlemans J., Jania J., and Kolondra L. (2011). Application of a minimal glacier model to Hansbreen, Svalbard. *The Cryosphere*, 5, 1–11.

Pfeffer W.T., Harper J.T., O'Neel S. (2008). Kinematic Constraints on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise. *Science* 321, 1340. DOI: 10.1126/science.1159099.