

XXIX Seminarium Meteorologii i Klimatologii Polarnej

Wrocław 9-10 maja 2019



KSIĄŻKA ABSTRAKTÓW



Uniwersytet
Wrocławski

KOMITET BADAŃ POLARNYCH
POLSKIEJ AKADEMII NAUK



Stowarzyszenie
Klimatologów
Polskich

Redakcja:

Krzysztof Migala
Natalia Pilgaj

ISBN 978-83-62673-66-7

© Copyright by Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego, Uniwersytet Wrocławski,
Wrocław 2019

Fot. na okładce T. Sawiński

Niniejsze materiały konferencyjne zostały przygotowane na podstawie abstraktów nadesłanych przez Uczestników wydarzenia XXIX Seminarium Meteorologii i Klimatologii Polarnej. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za ich treść.

SPIS TREŚCI

Zmienność czasowa i przestrzenna bodźcowości warunków termiczno-wilgotnościowych w regionie Hornsundu (Svalbard, Arktyka)	
Andrzej Arażny	5
Lokalne pole wiatru fragmentu archipelagu Svalbard z wykorzystaniem technik numerycznego modelowania mechaniki płynów (CFD, WindSim)	
Bartosz Czernecki, Natalia Pilgaj, Maciej Kryza, Leszek Kolendowicz, Krzysztof Migąła	7
Wpływ mezoskalowej cyrkulacji atmosferycznej na transport oceaniczny	
Małgorzata Kitowska, Tomasz Petelski, Przemysław Makuch, Jacek Piskozub, Piotr Markuszewski.....	8
Sezonowa i wieloletnia zmienność odpływu wód ze zlewni Lodowca Werenskiolda (SW Spitsbergen)	
Elżbieta Łepkowska, Dariusz Ignatiuk, Krzysztof Migąła, Łukasz Stachnik	9
Prawdopodobieństwo wystąpienia opadów śniegu i deszczu w Atlantyckim sektorze Arktyki na tle współczesnych zmian klimatu	
Ewa Łupikasza, Katarzyna Cielecka-Nowak	11
Pomiary własności fizycznych aerozolu w rejsie AREX 2018	
Piotr Markuszewski, Tomasz Petelski, Jacek Piskozub, Przemysław Makuch, Anna Rozwadowska, Iwona Niedźwiecka, Małgorzata Kitowska, Violetta Drozdowska, Luca Ferrero, Marco Cataldi, Radovan Krejci.....	13
Badania atmosfery na pokładzie r/v Oceanii w rejonach polarnych	
Piotr Markuszewski, Tomasz Petelski, Jacek Piskozub, Przemysław Makuch, Anna Rozwadowska, Chrystian Wojowski, Klaudia Tomaszewska, Iwona Niedźwiecka, Małgorzata Kitowska, Violetta Drozdowska, Luca Ferrero, Marco Cataldi, Radovan Krejci	15
Cyrkulacja termohalinowa na Atlantyku Północnym, a zmiany klimatu w Arktyce	
Andrzej A. Marsz, Anna Styszyńska.....	17
Wpływ wskaźników cyrkulacji na kształtowanie temperatury powietrza na Spitsbergenie	
Tadeusz Niedźwiedź, Ewa Łupikasza, Rajmund Przybylak, Øyvind Nordli.....	21
Chronologia przyrostów rocznych wierzby polarnej (<i>Salix polaris</i>) z Wyspy Niedźwiedziej (Bjørnøya) i jej potencjał w badaniach dendroklimatycznych	
Magdalena Opała-Owczarek, Piotr Owczarek, Krzysztof Migąła	23
Analiza zmienności warunków klimatycznych Archipelagu Svalbard na podstawie symulacji Arctic-CORDEX	
Marzena Osuch, Tomasz Wawrzyniak i grupa Arctic-CORDEX.....	26
Modelowanie wartości elementów meteorologicznych dla archipelagu Svalbard z wykorzystaniem mezoskalowego modelu WRF	
Natalia Pilgaj, Maciej Kryza, Bartosz Czernecki, Krzysztof Migąła, Leszek Kolendowicz	27
Zastosowanie danych z reanaliz do analizy warunków termiczno-wilgotnościowych na obszarze Arktyki	
Piotr Piotrowski.....	28

Wpływ makroskalowych typów cyrkulacji atmosferycznej na pole wiatru w przyziemnej warstwie atmosfery w północno-zachodniej części Zatoki Petunia (Spitsbergen)	
Marek Półrolniczak, Sebastian Kendzierski, Leszek Kolendowicz	29
Czy składniki odżywcze z lodowców wpływają na obieg CO₂?	
Łukasz Stachnik, Krzysztof Janik, Elżbieta Łepkowska, Dariusz Ignatiuk, Sławomir Sitek, Katarzyna Stachniak.....	30
W jaki sposób środowiska wybrzeży Spitsbergenu zareagowały na zmiany klimatu, które zaszły od zakończenia małej epoki lodowej – przyczynek do teorii paraglacjału litoralnego w warunkach polarnych	
Mateusz C. Strzelecki.....	32
Wpływ zmian miąższości warstwy czynnej na funkcjonowanie arktycznej zlewni niezlodowaczonej	
Tomasz Wawrzyniak, Marzena Osuch.....	34
Wpływ wielkości i rozmieszczenia kier lodowych na procesy atmosferyczne w warstwie granicznej atmosfery	
Marta Wenta.....	35
Zmienność temperatury powietrza w NE Grenlandii w okresie 1927-2017	
Przemysław Wyszyński, Øyvind Nordli, Rajmund Przybylak.....	38

ZMIENNOŚĆ CZASOWA I PRZESTRZENNA BODŹCOWOŚCI WARUNKÓW TERMICZNO-WILGOTNOŚCIOWYCH W REGIONIE HORNSUNDU (SVALBARD, ARKTYKA)

Andrzej Arażny¹

¹ Katedra Meteorologii i Klimatologii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

W opracowaniu przedstawiono zagadnienie bodźcowości warunków termicznych i wilgotnościowych w regionie Hornsundu (Svalbard, Arktyka). Określono ją na podstawie wartości dobowej amplitudy temperatury powietrza (DTR), międzydobowej zmienności średniej dobowej temperatury powietrza (ΔT) oraz średnich dobowych wartości wilgotności względnej (f). Zbadano zmienność czasową bodźców termicznych i wilgotnościowych w Hornsundzie w okresie 1.11.1978-31.12.2017 r. Do analizy zmienności przestrzennej bodźców wokół fiordu Hornsund użyto danych z siedmiu całorocznych stanowisk pomiarowych z okresu 1.07.2014 – 31.06.2015 r. W pracy przedstawiono rolę wpływu cyrkulacji atmosferycznej (AC) na bodźce termiczno-wilgotnościowe. Do charakterystyki cyrkulacji atmosfery w badanym regionie wykorzystano dobowe typy AC sporządzone dla obszaru Spitsbergenu przez T. Niedźwiedzia.

Przeprowadzone badania pozwoliły sformułować następujące wnioski:

- W okresie 1978-2017 stwierdzono ocieplenie się regionu Hornsundu we wszystkich porach roku (zmiany te są istotne statystycznie). Dodatni trend średniej rocznej temperatury powietrza wyniósł $1.1^{\circ}\text{C}/10$ lat, a najwyższy wzrost notowano zimą ($1.7^{\circ}\text{C}/10$ lat). W badanym wieloletnim okresie zanotowano nieznaczny wzrost ($0.3\%/10$ lat) wilgotności względnej.
- Ocena bodźcowości warunków termicznych wyznaczonych na podstawie międzydobowych zmian średniej dobowej temperatury powietrza oraz wartości amplitudy temperatury dobowej powietrza wykazała zmniejszenie bodźcowości termicznej dla człowieka. Uzyskano istotny statystycznie dodatni trend bodźców obojętnych wg DTR (ok 15 dni/ 10 lat), a ubyło m.in. znacząco bodźców silnie i ostro odczuwalnych. Podobną sytuację stwierdzono w przypadku analizy bodźców termicznych wg ΔT . Wzrosła znacząco istotnie statystycznie liczba dni obojętnych (o ok. 8 dni/ 10 lat), a zmalała liczba dni o odczuciach znacznych i ostrych.
- W przypadku oceny bodźcowości warunków wilgotnościowych w latach 1978-2017 stwierdzono wzrost częstości napływu powietrza bardzo wilgotnego i wilgotnego (odpowiednio o 2.4 i 3.5 dnia/ 10 lat), kosztem zmniejszania się występowania liczby dni powietrza suchego i umiarkowanie suchego.
- Stwierdzono znaczne zróżnicowanie przestrzenne bodźców termicznych i wilgotnościowych w okresie 2014-2015. Bodźcowość termiczna oceniona wg DTR i ΔT najbardziej korzystana dla organizmu człowieka była w zachodniej części fiordu Hornsund. Natomiast stwierdzono bardziej obciążające odczucia termiczne organizmu człowieka na stanowiskach lodowcowych, w głębi fiordu i górskich. Natomiast pod względem bodźcowości warunków wilgotnościowych w skali roku zdecydowanie przeważa powietrze wilgotne i bardzo wilgotne. W regionie Hornsundu stanowiska pomiarowe z najwyższą średnią roczną wilgotnością (szczyt górski Fugleberget oraz półwysep Treskelen) charakteryzowały się np. częstością $> 50\%$ powietrza bardzo wilgotnego we wszystkich sezonach.

- W kształtowaniu odczuwalności temperatury i f przez AC w regionie Hornsundu najważniejszą rolę odgrywa kierunek napływających mas powietrza. Podczas adwekcji mas powietrza z sektora północno-wschodniego, niezależnie od rodzaju układu barycznego obserwowano pogorszenie bodźcowości termicznej. Natomiast powietrze bardzo wilgotne ($f > 85\%$) napływało nad Hornsund praktycznie przez cały rok z kierunku S-SW przy układach cyklonalnych i antycyklonalnych. Największy zakres występowania badanych bodźców termicznych i wilgotnościowych stwierdzono w zimie i na wiosnę, a najmniejszy w lecie.

LOKALNE POLE WIATRU FRAGMENTU ARCHIPELAGU SVALBARD Z WYKORZYSTANIEM TECHNIK NUMERYCZNEGO MODELOWANIA MECHANIKI PŁYNÓW (CFD, WINDSIM)

*Bartosz Czernecki¹, Natalia Pilgaj², Maciej Kryża², Leszek Kolendowicz¹,
Krzysztof Migala²*

¹ Zakład Klimatologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

² Zakład Klimatologii i Ochrony Atmosfery, Uniwersytet Wrocławski

Aplikacje mezo- i mikroskalowych modeli meteorologicznych (np. WRF, WindSim) dla obszarów polarnych są coraz częściej istotnym źródłem informacji o warunkach anemologicznych. Wyniki modelowania numerycznego uzupełniają tym samym rzadką sieć pomiarową i pozwalają na pełniejsze zrozumienie funkcjonowania lokalnych mechanizmów pola wiatru. Są także istotnym zbiorem danych wejściowych na potrzeby modelowania innych procesów zachodzących w geosystemach polarnych ze względu na jednorodną i regularną strukturę czasowo-przestrzenną uzyskiwanych wyników.

W prezentacji przedstawiono znaczenie skali rozpatrywanych procesów i jakości reprezentowanych pól geofizycznych dla wielkoskalowego pola wymuszenia (reanalizy), symulacji mezoskalowej (WRF) i symulacji mikroskalowej (WindSim). Zastosowanie metod obliczeniowej mechaniki płynów (ang. *Computation Fluid Dynamics*, CFD) pozwoliło na rozpoznanie lokalnych cel pola wiatru w rozdzielczości procesów zachodzących w skali do ok. 10-100 m, tj. w skali ok. 10-krotnie lepszej od najlepszych obecnie stosowanych modeli mezoskalowych.

Zdecydowanie największą *wartość dodaną* jakości przeprowadzonego *downscalingu* można zauważyć na obszarach o urozmaiconej rzeźbie terenu. Wykonana symulacja z użyciem modeli WRF i WindSim, pozwoliła na bardziej wiarygodne przedstawienie zróżnicowania pola wiatru w otoczeniu Zatoki Petunia. Walidację symulacji przeprowadzono w oparciu o dostępne serie danych obserwacyjnych z zachodniego brzegu Zatoki Petunia oraz z lodowca Sven, które wykonano latem 2018 roku.

WPLYW MEZOSKALOWEJ CYRKULACJI ATMOSFERYCZNEJ NA TRANSPORT OCEANICZNY

Małgorzata Kitowska¹, Tomasz Petelski¹, Przemysław Makuch¹, Jacek Piskozub¹, Piotr Markuszewski¹

¹ Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk

Napływ ciepłej i słonej wody na północ Oceanu Atlantyckiego i do Oceanu Arktycznego ma ogromny wpływ na kształtowanie klimatu w rejonach polarnych. Jednym z obszarów dokładnych badań jest szelf wzdłuż zachodniego wybrzeża Spitsbergenu, wzdłuż którego przepływa Prąd Zachodniospitsbergeński. Opierając się na modelach, danych pomiarowych oraz wynikach z reanalizy, można postulować, że wpływ na wielkość i kierunek przepływu mają mezoskalowe zjawiska atmosferyczne (wiatr).

W oparciu o wzory na strumienie ciepła utajonego i ciepła właściwego (Piechura i in. 2002) zostały opracowane równania transportu ciepła oraz transportu masy wody w obszarze Prądu Zachodniospitsbergeńskiego. Korzystając z danych hydrograficznych zebranych podczas rejsów arktycznych r/v „Oceania” w rejonach polarnych oraz danych pochodzących z reanalizy NCEP/NCAR z lat 2004-2017, wyliczono prędkość, z jaką przemieszcza się woda w kierunku północnym wzdłuż zachodniego wybrzeża Spitsbergenu w kolejnych latach. Zauważono, że prędkość przepływu najsilniej skorelowana jest z wiatrem geostroficznym z kierunków południowo wschodnich (ujemna korelacja), kiedy to rzeczywisty wiatr w stacjach pomiarowych jest najsilniejszy i ma charakter wiatru bryzowego.

Pomiary prędkości i kierunku wiatru z arktycznych stacji pomiarowych rzadko są reprezentatywne dla większych obszarów otaczających te stacje. Jednym z najistotniejszych czynników deformujących pole wiatru w fiordach zachodniego Spitzbergenu jest różnica temperatur lodowców znajdujących się w głębi fiordu i wód niesionych przez ciepły Prąd Zachodniospitsbergeński. Różnica ta wywołuje powstawanie cyrkulacji analogicznej do bryzy nocnej w niższych szerokościach geograficznych. Innym ważnym zjawiskiem, które zachodzi pod wpływem orografii, jest tunelowanie wiatru wzdłuż osi fiordów. Oprócz tego na lokalny klimat wiatru każdej stacji wpływają takie zjawiska związane z ukształtowaniem terenu jak wiatry fenowe i spadowe. W celu opisanego zjawiska przeanalizowane zostały dane pomiarowe (wiatr lokalny) ze stacji Ny-Alesund i Hornsund z lat 1992-2013, a także dane z reanalizy (wiatr wynikający z globalnego pola ciśnienia) dla punktów siatki najbliższej położonych do tych stacji.

Bibliografia:

Piechura, J., Osiński, R., Petelski, T., Woźniak, S.B., 2002. Heat and Salt Fluxes in the West Spitsbergen Current Area in Summer. *Oceanologia* 44 (3): 307-321.

SEZONOWA I WIELOLETNIA ZMIENNOŚĆ ODPLYWU WÓD ZE ZLEWNI LODOWCA WERENSKIOLDA (SW SPITSBERGEN)

Elżbieta Łepkowska¹, Dariusz Ignatiuk¹, Krzysztof Migala², Łukasz Stachnik²

¹Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski / Centrum Studiów Polarnych

²Wydział Nauk i Ziemi i Kształtowania Środowiska, Uniwersytet Wrocławski

Ocieplenie klimatyczne wpływa na obieg wody w zlodowaconych zlewniach. Zmiany w procesach hydrologicznych w Arktyce powodują szereg istotnych zmian m.in. związanych z dostawami wody słodkiej oraz materiału mineralnego do morza, a w konsekwencji zmiany w morskich i lądowych ekosystemach. Obieg wody i zawiesiny stanowiąca medium dla transportu substancji rozpuszczonej i składników pokarmowych (nutrientów) wpływa zatem na cykl biogeochemiczny w środowisku polarnym.

W celu lepszego zrozumienia funkcjonowania systemu zlodowaconego w Arktyce poddano analizie zmienność odpływu w zlewni Lodowca Werenskiolda (SW Spitsbergen). Zlewnia charakteryzuje się powierzchnią 44 km², pokrytą w około 60% przez lodowiec. Obserwacje dotyczyły skali sezonowej i międzyrocznej, ze szczególnym uwzględnieniem 6-cio letniej serii pomiarowej: 2007-2012.

Zmienność odpływu wód z badanej zlewni związana była z ablacją lodowcową oraz z parametrami meteorologicznymi, w tym z typami cyrkulacji atmosferycznej. W pierwszej części hydrologicznie aktywnego sezonu wezbrania generowane były przez wzmożone topnienie pokrywy śnieżnej i lodu lodowcowego (wezbrania ablacyjne). Duże znaczenie w kulminacji odpływu w tej części sezonu miało oddziaływanie wiatru typu fenowego.

Druga część hydrologicznie aktywnego sezonu przypadająca zazwyczaj na miesiące jesienne charakteryzowała się reżimem opadowym. Odpływ w tym czasie jest z reguły kilkakrotnie wyższy niż w przypadku wezbrań ablacyjnych. Zaobserwowane częstsze występowanie takich nietypowych i kulminacyjnych zdarzeń na skutek ocieplania klimatu, wpływa m.in. na intensyfikację procesów denudacji mechanicznej i chemicznej w polarnych zlewniach zlodowaconych.

Stwierdzono, iż południowa część Spitsbergenu charakteryzuje się najwyższymi wartościami odpływu: średnio $80 \pm 14 \times 10^6$ m³, co stanowi 1800 mm warstwy wody i wahając się w zakresie 1281–2243 mm.

Powodów stosunkowo dużego odpływu upatruje się w korzystnych topograficznych warunkach dla akumulacji śniegu, ale także w większej regionalnej ablacji powierzchniowej dla tej części wyspy. Orientacja lodowca w kierunku zachodnim oraz otwarty dostęp do zachodnich i południowych mas powietrza sprzyjają dużemu udziałowi wód opadowych pomimo stosunkowo dużej części pokrycia zlewni przez lodowiec. W konsekwencji, sezonowa i wieloletnia zmienność odpływu wód ze zlewni zlodowaconej charakteryzuje się wzrostem znaczenia ciekłych opadów atmosferycznych. Ponadto, wpływ cieplejszej wody

morskiej Atlantyku i mniejsze zlodzenie morza na Oceanie Arktycznym może wpływać na kierunki cyrkulacji powietrza, a tym samym prowadzić do częstszych zdarzeń opadowych również w okresie jesieni i zimy.

PRAWDOPODOBIENSTWO WYSTĄPIENIA OPADÓW ŚNIEGU I DESZCZU W ATLANTYCKIM SEKTORZE ARKTYKI NA TLE WSPÓLCZESNYCH ZMIAN KLIMATU

Ewa Łupikasz¹, Katarzyna Cielecka-Nowak²

¹ Katedra Klimatologii, Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski w Katowicach

² Centrum Studiów Polarnych

Opady atmosferyczne będące ogniwem cyklu hydrologicznego odgrywają istotną rolę w przebiegu wielu procesów środowiskowych (np. odpływ rzeczny, powódzie, osuwiska, transport sedymentów, dynamika oraz bilans masy lodowców). Wpływu opadów na środowisko zależy od postaci w jakiej występują. Częstość oraz wysokość występowania opadów śniegu determinują powstanie pokrywy śnieżnej, która jest elementem ważnego z punktu widzenia zmian klimatu, zwłaszcza w Arktyce, mechanizmu zwrotnego.

Celem opracowania jest określenie zmian prawdopodobieństwa wystąpienia opadów deszczu, śniegu i opadów mieszanych na tle zmian temperatury powietrza w Atlantyckim sektorze Arktyki reprezentowanym przez 6 stacji meteorologicznych zlokalizowanych pomiędzy 71°00' i 78°55'N stopniem szerokości geograficznej. Informację o wystąpieniu i postaci opadów atmosferycznych oraz dobowe wartości temperatury powietrza zaczerpnięto z bazy danych Norweskiego Instytutu Meteorologicznego e-klima. Ponadto wykorzystano dane synoptyczne z bazy OGIMET oraz dane udostępnione przez IGF PAN. Ciągi chronologiczne obejmują różne lata w zależności od dostępności danych o postaci opadów. Najdłuższe serie rozpoczynają się w 1956 roku.

Zmiany prawdopodobieństwa postaci opadów badano dla całego roku oraz w przebiegu rocznym dla miesięcy i dekad. Stosując metodę Mann-Kendalla obliczono trendy średniej rocznej temperatury powietrza oraz prawdopodobieństwa występowania opadów ciekłych, mieszanych i stałych w okresie dostępnych danych meteorologicznych (różny okres w zależności od stacji) oraz w okresach wspólnych dla wszystkich stacji, czyli 1979-2018, 1988-2017, 1993-2019, 1998-2017. Tendencje w przebiegu rocznym oceniono poprzez obliczenie różnic średniej temperatury oraz średniego prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych postaci pomiędzy 19-leciami 1979-1997 i 1999-2017. Istotność statystyczną różnic obliczono testem Man-Whitneya. Ponadto obliczono korelacje (współczynnik Spearmana) pomiędzy średnią roczną temperaturą powietrza i rocznym prawdopodobieństwem opadów ciekłych stałych i mieszanych oraz porównano częstość poszczególnych postaci opadów w przedziałach dobowej temperatury powietrza dla rozpatrywanych 19-leci.

W Atlantyckim sektorze Arktyki prawdopodobieństwo opadów deszczu i śniegu podlega istotnym zmianom przestrzennym wynikającym ze zmian szerokości geograficznej, a tym samym średniej temperatury powietrza i wilgotności oraz zmianom wieloletnim w reakcji na ocieplenie klimatu. Stopień i kierunek tych zmian jest zależny od postaci opadów, warunków klimatycznych, sezonu/miesiąca/dekady i warunków lokalnych.

W okresie 1979-2017 roczne prawdopodobieństwo opadów ciekłych istotnie wzrosło (o około +1 do +3% na 10 lat), zaś opadów stałych zmalało (od -1,5 do 2,4% na 10 lat). Tendencje opadów ciekłych związane były z istotnym wzrostem temperatury powietrza. Współczynniki korelacji pomiędzy roczną temperaturą powietrza i prawdopodobieństwem opadów ciekłych były statystycznie istotne zarówno dla ciągów przed jak i po usunięciu trendów. Współczynniki determinacji wskazują, że temperatura powietrza wyjaśnia około 36% (max 54%) zmienności prawdopodobieństwa opadów deszczu, przy czym po usunięciu trendów współczynnik ten obniżył się do 16% (max 29%), co wskazuje na intensyfikację trendów przez ocieplenie. W przebiegu rocznym najsilniejszy wzrost opadów ciekłych stwierdzono we wrześniu oraz w październiku i listopadzie.

Prawdopodobieństwo opadów stałych istotnie zmalało w okresie 1979-2017, przy czym korelacje tego wskaźnika z roczną temperaturą powietrza były istotne jedynie na stacjach w południowej części obszaru badań (Brn JM) zarówno po jak i przed usunięciem trendów. Brak korelacji z temperaturą powietrza i równocześnie istotne tendencje spadkowe prawdopodobieństwa opadów śniegu na pozostałych stacjach wskazują na wpływ czynników lokalnych lub cyrkulacyjnych na występowanie opadów śniegu. W przebiegu rocznym na stacjach w środkowej i N części Spitsbergenu prawdopodobieństwo opadów śniegu malało w sierpniu oraz październiku i/lub maju, czyli w tych częściach roku, w których temperatura miesięczna osiągała około 0°C. Na pozostałych stacjach tendencje spadkowe prawdopodobieństwa opadów śniegu stwierdzono w listopadzie, styczniu oraz lutym.

Tendencje opadów mieszanych były nieistotne na większości stacji w okresie 1979-2017; istotne tendencje spadkowe stwierdzono jedynie na stacji Bjørnøya i Jan Mayen dla okresów krótszych od 1988r. Korelacje pomiędzy prawdopodobieństwem opadów mieszanych i roczną temperaturą powietrza były statystycznie istotne jednak jedynie po usunięciu trendów. Wzrost temperatury powietrza wywołał przeciwne tendencje w różnych okresach roku – wzrost prawdopodobieństwa w okresie od listopada do stycznia i spadek w okresie od czerwca do września, co w efekcie spowodowało brak istotnych zmian prawdopodobieństwa wystąpienia opadów mieszanych w okresie rocznym.

Badania były realizowane w ramach projektu nr. 2017/27/B/ST10/00923 „Reakcja opadów śniegu i deszczu na współczesne zmiany klimatu i cyrkulację atmosfery w Europie” finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

POMIARY WŁASNOŚCI FIZYCZNYCH AEROZOLU W REJSIE AREX 2018

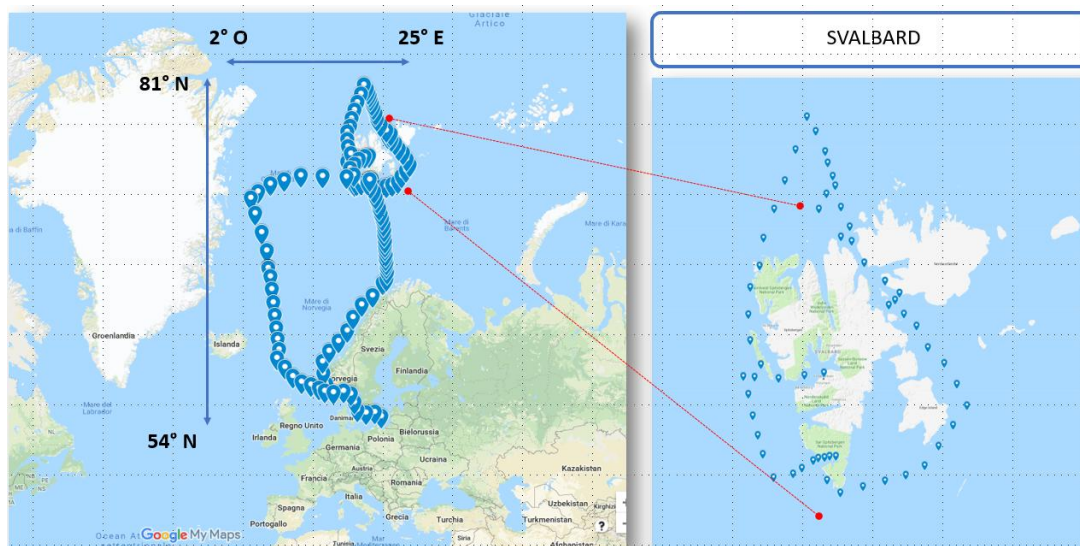
Piotr Markuszewski¹, Tomasz Petelski¹, Jacek Piskozub¹, Przemysław Makuch¹, Anna Rozwadowska¹, Iwona Niedźwiecka¹, Małgorzata Kitowska¹, Violetta Drozdowska¹, Luca Ferrero², Marco Cataldi², Radovan Krejci³

¹ Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk

² GEMMA Centre, Department of Earth and Environmental Sciences, University of Milano-Bicocca

³ Department of Environmental Science and Analytical Chemistry, Stockholm University

Celem wystąpienia jest zaprezentowanie wstępnych wyników pomiarowych wykonanych podczas rejsu AREX 2018 (12.06 – 30.08.2018 r). Rejon pomiarów objął Morze Bałtyckie, Morze Północne, Morze Norweskie, północną część Oceanu Atlantyckiego oraz tzw. Arktykę Europejską (rys. 1). Wyniki zostaną porównane z rezultatami pomiarów wykonanych we fiordach Kongsfiord oraz Hornsund podczas kampanii AREX 2014 oraz 2015 (Markuszewski i in. 2017). Współpraca zainicjowana została wspólnymi pomiarami podczas kampanii w latach 2011/2012 (Ferrero i in. 2019).



Rycina 1. Rejon badań objęty pomiarami podczas rejsu AREX 2018.

Wykonane pomiary własności aerozolu z pokładu statku r/v Oceania są owocem współpracy Instytutu Oceanologii PAN z zagranicznymi partnerami: Uniwersytetem Mediolańskim oraz Uniwersytetem Sztokholmskim. Badania prowadzone były za pomocą następujących urządzeń pomiarowych:

1. Zestaw optycznych liczników cząstek (TSI 3340, OPC N2),
2. Kondensacyjny licznik cząstek (TSI 3010),
3. Przetwornik pogodowy (Vaisala WXT536),
4. Bezwładnościowy System Wykrywania Ruchu (Inertial Measurement Unit, Ellipse N, SGB Systems),
5. Aethalometer (AE-33, Magee Scientific, 7-λ),

6. Zestaw radiometrów (Multiplexer-Radiometer-Irradiometer ROX, pomiar światła dyfuzyjnego, wektorowego oraz odbiciowego: 350-1000 nm, 1 nm rozdzielczości),
7. Wysokoprzepływowy system do poboru próbek chemicznych aerozolu (High volume sampler, TSP ECHO-PUF Tecora).
8. DMPS (Differential Mobility Particle Sizer), zakres mierzonych cząstek 10 nm – 20 000 nm, jednoczesny pomiar rozkładu rozmiarów aerozolu z otoczenia oraz suchej frakcji (wygrzewanie w 300 °C).

Wstępne opracowanie danych pomiarowych wykazało dużą różnicę w pomiarach stężenia sadzy pomiędzy średnimi szerokościami geograficznymi, a rejonami arktycznymi (Gdańsk $948 \pm 57 \text{ ng/m}^3$ - $1507 \pm 75 \text{ ng/m}^3$), Ocean Arktyczny ($13 \pm 1 \text{ ng/m}^3$ – $31 \pm 2 \text{ ng/m}^3$). Obliczony na podstawie pomiarów stopień ogrzewania (Heating Rate, Ferrero i in. 2018) również wykazał silną zależność równoleżnikową (Gdańsk: $0.29 \pm 0.01 \text{ K/dzień}$, Morze Bałtyckie $0.04 \pm 0.01 \text{ K/dzień}$, Morze Norweskie $0.01 \pm 0.01 \text{ K/dzień}$ oraz rejon Oceanu Arktycznego $0.003 \pm 0.001 \text{ K/dzień}$). Analiza zmienności czasowej i przestrzennej rozkładu koncentracji aerozolu pozwoliła na identyfikację zjawiska nukleacji podczas pomiarów oceanicznych.

Bibliografia:

- Ferrero, L., Sangiorgi, G., Perrone, M. G., Rizzi, C., Cataldi, M., Markuszewski, P., ..., Traversi, R., 2019. Chemical Composition of Aerosol over the Arctic Ocean from Summer ARctic EXpedition (AREX) 2011–2012 Cruises: Ions, Amines, Elemental Carbon, Organic Matter, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, n-Alkanes, Metals, and Rare Earth Elements. *Atmosphere*, 10(2): 54.
- Ferrero, L., Močnik, G., Cogliati, S., Gregorič, A., Colombo, R., Bolzacchini, E., 2018. Heating Rate of Light Absorbing Aerosols: Time-Resolved Measurements, the Role of Clouds, and Source Identification. *Environmental science & technology*, 52(6): 3546-3555.
- Markuszewski, P., Rozwadowska, A., Cisek, M., Makuch, P., Petelski, T., 2017. Aerosol physical properties in Spitsbergen's fjords: Hornsund and Kongsfjorden during AREX campaigns in 2014 and 2015. *Oceanologia*, 59(4): 460-472.

BADANIA ATMOSFERY NA POKŁADZIE R/V OCEANII W REJONACH POLARNYCH

Piotr Markuszewski¹, Tomasz Petelski¹, Jacek Piskozub¹, Przemysław Makuch¹, Anna Rozwadowska¹, Chrystian Wojowski², Klaudia Tomaszewska², Iwona Niedźwiecka¹, Małgorzata Kitowska¹, Violetta Drozdowska¹, Luca Ferrero³, Marco Cataldi³, Radovan Krejci⁴

¹ Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk

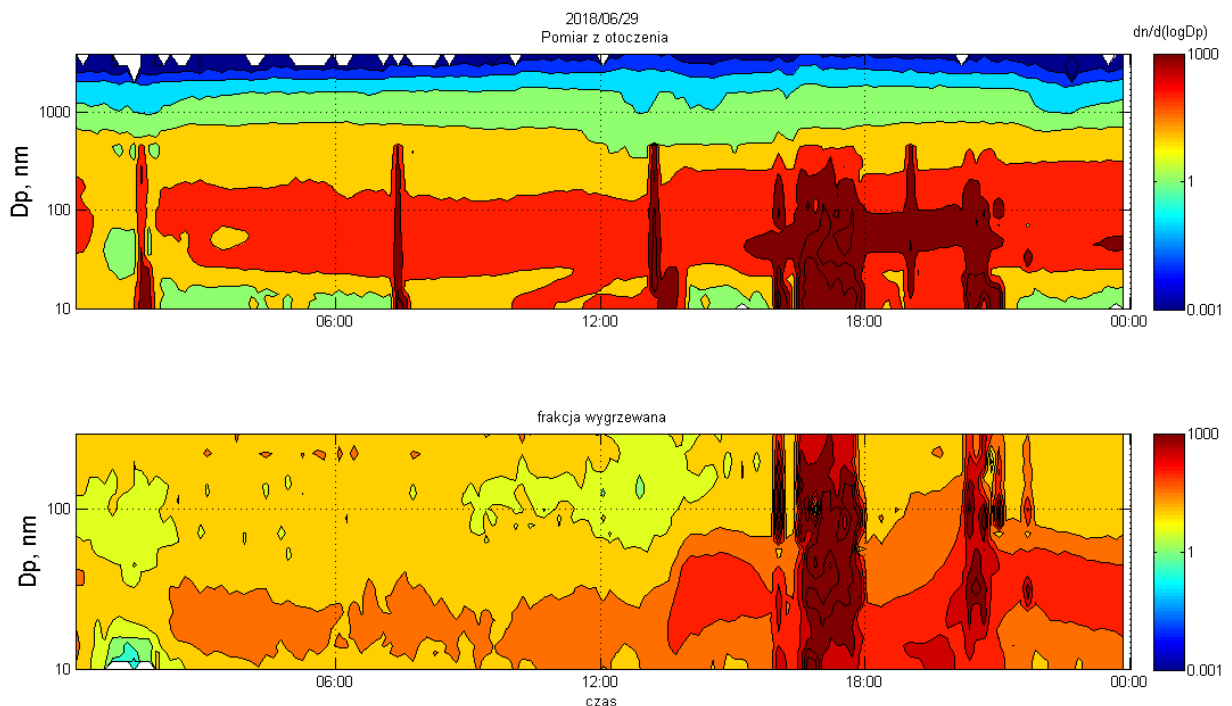
² Instytut Geografii, Uniwersytet Gdański

³ GEMMA Centre, Department of Earth and Environmental Sciences, University of Milano-Bicocca

⁴ Department of Environmental Science and Analytical Chemistry, Stockholm University

Prezentacja ma na celu przedstawienie obserwacji aerozolowych oraz atmosferycznych prowadzonych w ramach kampanii AREX (Arctic Experiment) na pokładzie r/v Oceanii w rejonach polarnych (Morze Północne, Morze Norweskie, północna część Oceanu Atlantyckiego).

Zaprezentowana zostanie dodatkowo metodyka pomiarów, opracowania i filtracji danych zebranych za pomocą Dyferencyjnego Selektora Mobilności Cząstek (Differential Mobility Particle Sizer), w zakresie mierzonych cząstek 10 nm – 20 000 nm, z jednoczesnym pomiarem rozkładu rozmiarów aerozolu z otoczenia oraz suchej frakcji (wygrzewanie w 300 °C). Rezultaty kampanii w 2018 roku zestawione zostaną z wynikami pomiarów wykonanymi w latach 2014 – 2015 (Markuszewski i in. 2017).



Rycina 1. Przykładowa seria czasowa z pomiarów rozkładu rozmiarów cząstek zmierzonych za pomocą DMPS. Górny panel przedstawia wyniki pomiarów powietrza z otoczenia (ambient aerosol), dolny panel przedstawia pomiar powietrza wysuszonego w 300°C (volatilized aerosol fraction).

Bibliografia

Markuszewski, P., Rozwadowska, A., Cisek, M., Makuch, P., Petelski, T., 2017. Aerosol physical properties in Spitsbergen's fjords: Hornsund and Kongsfjorden during AREX campaigns in 2014 and 2015. *Oceanologia*, 59(4): 460-472.

Zabori, J., R. Krejci, A.M.L. Ekman, E. M. Mårtnešson, J. Ström, G. de Leeuw, E.D. Nilsson, 2012. Wintertime Arctic Ocean sea water properties and primary marine aerosol concentrations, *Atmos. Chem. Phys*, 12: 10405 - 10421

CYRKULACJA TERMOHALINOWA NA ATLANTYKU PÓŁNOCNYM, A ZMIANY KLIMATU W ARKTYCE

Andrzej A. Marsz, Anna Styszyńska¹

¹ Katedra Urbanistyki i Planowania Regionalnego, Wydział Architektury, Politechnika Gdańska

Klimat Arktyki wykazuje zmiany. Wiadomo o tym już od lat 30. XX w., kiedy zaobserwowano bardzo silny wzrost temperatury powietrza, regresję zasięgu lodów morskich, gwałtowne topnienie lodowców na wyspach arktycznych. Zmiany te były szczególnie silne w Arktyce Atlantyckiej. W latach 60.- 70. XX w. nastąpiło bardzo silne ochłodzenie, które również najsilniej zapisało się w Arktyce, szczególnie jej atlantyckiej części. Na tych samych obszarach, na których doszło do najsilniejszego wzrostu temperatury w latach 30. XX w., w latach 60.-70. XX wieku doszło do najsilniejszego ochłodzenia (rejon Ziemi Franciszka Józefa, północnych części Nowej Ziemi, Spitsbergenu). Kolejne ocieplenie Arktyki rozpoczęło się z końcem lat 80. XX w. i trwa nadal. Arktyka obecnie ociepla się szybciej niż pozostałe strefy szerokościowe półkuli północnej. O ile trend temperatury globalnej w latach 1981-2018 jest równy $0,0226^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$, półkuli północnej $0,0325^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$, to trend temperatury w strefie szerokości między 64°N a 90°N , którą dalej utożsamia się z Arktyką, jest równy $0,0590^{\circ}\text{C}\cdot\text{rok}^{-1}$ ($p \ll 0,001$), a więc nieco ponad 2,5 razy większy od trendu globalnego.

Ten fakt jest przytaczany jako jeden z koronnych argumentów wskazujących na działanie tzw. „antropogenicznego globalnego ocieplenia” (dalej AGW), będącego skutkiem zachwiania globalnego bilansu radiacyjnego w rezultacie bardzo szybkiego wzrostu koncentracji gazów cieplarnianych, zwłaszcza CO_2 , w powietrzu atmosferycznym. Pewien problem jednak stwarza fakt, że Arktyka, pod wpływem wzrostu koncentracji CO_2 ociepla się 2,5 razy szybciej niż „cała” planeta. Dla wyjaśnienia tej niezgodności badacze konstruują bardziej lub mniej wiarygodne hipotezy (np. „wzmocnienia arktycznego”; Arctic Amplification, np. Serreze i Francis 2006, Serreze i Barry 2011), efektu sadzy (Rinke i in., 2004, Flanner 2013), „większej czułości klimatu Arktyki na zmiany klimatu” (Flato i Brown 1996), które jednak w modelowaniu nie dają rezultatów zgodnych z rzeczywistością. Arktyka ociepla się szybciej, lody morskie zmniejszają w sezonie ciepłym swoją powierzchnię silniej, niż wynikałoby to z wyników badań modelowych.

Poza wymienionymi, przyczyn zmian klimatu Arktyki poszukuje się w zmienności cyrkulacji atmosferycznej. Spotyka się w literaturze ze stwierdzeniami, że 95% wzrostu temperatury w Arktyce uwarunkowane jest przez cyrkulację atmosferyczną. Niestety, wzrostu nasilenia przenosu powietrza między strefą szerokości umiarkowanych a Arktyką nie obserwuje się. Pewne mody cyrkulacyjne (Dipol Arktyczny, Dipol Cieśniny Framy) wykazują związki z temperaturą powietrza czy charakterem dryfu lodów. Główne wzorce cyrkulacji (NAO, AO) nie są powiązane ze zmianami elementów klimatycznych czy lodów w Arktyce, mimo tego, że zarówno wyniki badań modelowych, jak i liczni badacze wskazują na NAO lub AO jako przyczynę ich zmian. Dla weryfikacji tych stwierdzeń wystarczy samemu skorelować szeregi wskaźników NAO czy AO i temperatury czy powierzchni lodów.

Syntetyzując poglądy na mechanizmy współczesnych zmian klimatu Arktyki, można je, w wielkim uproszczeniu przedstawić z grubsza zgodnie ze schematem, jaki kreślą Stroeve i in. (2012; ich ryc. 2): *a.* globalne ocieplenie (AGW) powoduje wzrost temperatury we wszystkich sezonach, *b.* wzrost temperatury doprowadza do zmniejszenia grubości lodów morskich, *c.* wiosną lód staje się cieńszy, szybciej topnieje - i w tym momencie włącza się pętla sprzężeń zwrotnych „wzmocnienia arktycznego”, dalej - *d.* zwiększa się powierzchnia wody wolnej od lodu, *e.* zmniejsza się albedo, wody akumulują więcej ciepła słonecznego, wzrasta temperatura powierzchni morza, *f.* wzrasta temperatura powietrza, *g.* otwarte wody jesienią są silniej nagrzane, *h.* proces tworzenia lodu morskiego ulega opóźnieniu, ciepło z wód morskich oddawane jest do atmosfery, *i.* wyższa temperatura jesienią opóźnia tworzenie się lodów, *j.* lody zimowe stają się cieńsze, *k.* wiosną lody szybciej topnieją - i tu następuje powrót do początku pętli sprzężeń, czyli *d.* Wszystko to dzieje się w warunkach postępującego AGW, ale w rezultacie działania „wzmocnienia arktycznego”, Arktyka ociepla się silniej, niż pozostałe strefy szerokościowe półkuli północnej.

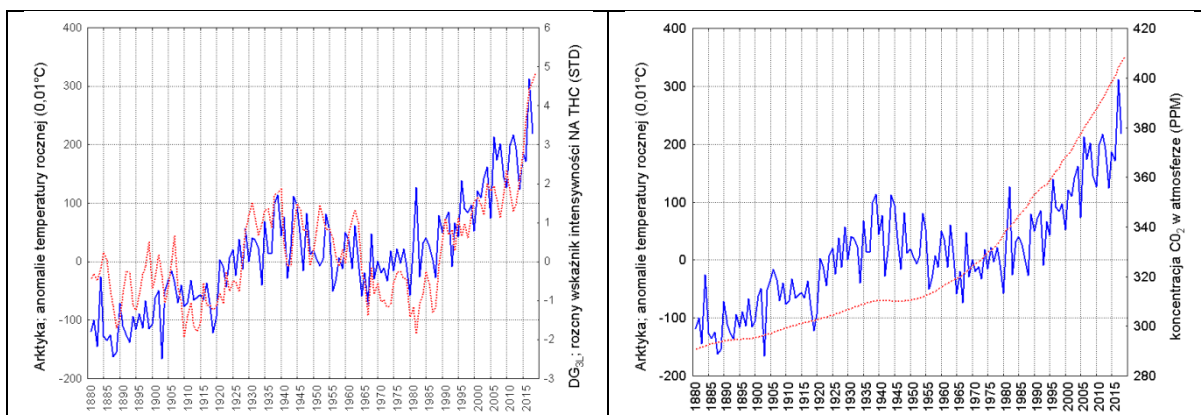
Ta hipoteza ma pewne niedostatki fizyczne, nie bierze pod uwagę przepływów energii. Energia słoneczna wiosną jest zużywana na topnienie lodów (utajone ciepło topnienia). W momencie, kiedy powierzchnia wolna od lodów jest wystarczająco duża (koniec lipca, pierwsza połowa sierpnia), ilość dopływającej do powierzchni energii słonecznej już gwałtownie maleje - wysokość Słońca staje się coraz mniejsza, optyczna masa atmosfery rośnie, przy wysokości Słońca 6° i mniej gwałtownie rośnie albedo powierzchni morza. Ponad 50% pochłoniętego przez morze ciepła jest tracone na wypromieniowanie (wzrost SST). Zakumulowane ciepło jest zużywane na wymianę z atmosferą, i już w połowie października, początku listopada, rozpoczyna się tworzenie nowej pokrywy lodowej.

Nie ulega wątpliwości, że po roku 1988 w atlantyckiej domenie Arktyki powierzchnia lodów i ich grubość maleją, struktura wiekowa lodów się zmienia, temperatura powietrza rośnie (zwłaszcza jesienią i zimą), zachmurzenie ogólne i sumy opadów rosną. Rzeczywiście wiosną pokrywa lodów morskich w Arktyce ma mniejszą grubość. Nie oznacza to, że fakty te dowodzą słuszności hipotezy przedstawionej w akapicie [3]. Prawidłowa ocena zachodzących zmian klimatu wymaga zrozumienia mechanizmów, które do tych zmian prowadzą. Wiadomo, że powietrze w dolnej troposferze ogrzewa się od podłoża, głównym mechanizmem jest wymiana turbulencyjna. Aby w Arktyce powietrze mogło ogrzewać się od podłoża, podłoże musi zawierać wystarczające zasoby ciepła. Powierzchnia lodów, której współczynnik przewodnictwa cieplnego jest niski, stanowi „pokrywę”, przez którą przepływający strumień ciepła z wody można przyrównać do zera. Wolna od lodów (koncentracja ≤ 4) powierzchnia morza może oddać do atmosfery takie ilości ciepła, jakie zawiera w warstwie konwekcji. Jeśli w rezultacie poboru ciepła z wody jej SST spadnie do temperatury krzepnięcia, tworzy się lód i strumienie ciepła z morza do atmosfery ustają. Zachodzą wtedy dogodnie warunki do głębokich spadków temperatury powietrza. Aby strumienie ciepła z morza działały odpowiednio długo i miały odpowiednio duże natężenie, takie, aby kompensowały straty energii z powietrza na wypromieniowanie, zasoby

ciepła w wodach muszą być odpowiednio duże. Dopływ energii słonecznej nie jest wystarczający dla zapewnienia takich warunków.

System prądowy, stanowiący fragment cyrkulacji termohalinowej Atlantyku Północnego (dalej NA THC) wnosi do mórz atlantyckiej domeny Arktyki ciepło, które pochodzi z akumulacji energii słonecznej w niskich szerokościach, a także sole. W przebiegu THC występuje długookresowa zmienność, w rezultacie której ilości ciepła i soli transportowanych wraz z wodami do Arktyki ulegają znacznym zmianom. Autorzy (Marsz i Styszyńska 2009, Marsz 2015) opracowali wskaźnik charakteryzujący intensywność NA THC, oznaczony jako DG_{3L} . Synchroniczna zmienność tego wskaźnika, w okresie od 1880 do 2018 roku (139 lat) objaśnia 53,2% wariacji anomalii temperatury powietrza (dalej *anoSAT*) w Arktyce (strefa 64-90°N, zbiór *ZonAnn.txt*, źródło: NASA GISS, <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>). Szczegółowa analiza wykazała, że działanie systemu klimatycznego Arktyki wykazuje opóźnienia w stosunku do przebiegu NA THC. Równanie regresji wielokrotnej, które jako zmienne objaśniające wykorzystuje wartości wskaźnika sprzed 6 lat i z tego samego roku co anomalie, objaśnia 57% wariacji *anoSAT* w okresie 138 lat. Przebiegi *anoSAT* i wskaźnika DG_{3L} oraz koncentracji CO_2 przedstawia ryc. 1.

Przebieg NA THC dość wiernie odtwarza przebieg rocznych *anoSAT*, oszacowanych przez GISS. W obu przebiegach widoczne są te same długookresowe zmiany - załamanie wzrostu temperatury w latach 1907-1919, ocieplenie Arktyki lat 30.XX w., ochłodzenie lat 60-70. XX w. i wreszcie gwałtowny wzrost temperatury po latach 80. XX w. Zmiany koncentracji CO_2 nie odtwarzają „ocieplenia” Arktyki w latach 30-40. XX w. Taki obraz, oraz stopień objaśnienia wariacji *anoSAT* pozwala na stwierdzenie, że zmienność NA THC jest głównym czynnikiem sterującym zmianami klimatu Arktyki, oraz, że obie fazy ocieplenia Arktyki mają taką samą genezę. Taką tezę odnośnie genezy obu ociepleń Arktyki Atlantyckiej, na podstawie innych materiałów i innych danych, postawiła już wcześniej Styszyńska (2005).



Rycina 1. Przebiegi rocznych anomalii temperatury powietrza w Arktyce (64-90°N; linia ciągła) i wskaźnika DG_{3L} charakteryzującego intensywność NA THC (linia kropkowana, lewy panel) oraz średniej rocznej koncentracji CO_2 w atmosferze (linia kropkowana, prawy panel)

Rzeczywisty mechanizm oddziaływania NA THC na klimat Arktyki jest dość skomplikowany i obejmuje jej cały system hydro-klimatyczny. Wnoszenie do mórz arktycznych

zwiększonych zasobów ciepła i soli w fazach wzmocnienia NA THC zmienia stopniowo strukturę termohaliczną wód, prowadząc do zwiększania zasobów ciepła w wodach i zmniejszania zasięgu wysłodzonych i stabilnych hydrostatycznie Powierzchniowych Wód Arktycznych ograniczających głębokość konwekcji w wodach. Ten czynnik powoduje stopniowe zmniejszanie się powierzchni lodów morskich, zwiększając powierzchnię „czystej wody”, z której mogą przepływać zwiększone strumienie ciepła do atmosfery, co powoduje wzrost temperatury powietrza. Ponieważ rozmiar strumienia ciepła zależy w pierwszym rzędzie od różnicy między SST a temperaturą powietrza, strumienie te są szczególnie silne w okresie jesieni i zimy. Z tego względu najszybszy wzrost temperatury nad akwenami o zredukowanej powierzchni lodów następuje właśnie w tych sezonach. Jeśli co najmniej przez 6 lat wskaźnik DG_{3L} będzie przybierał wartości większe od 1,0 lub w ciągu 10 lat suma wartości tego wskaźnika jest nie mniejsza od 11,0, dochodzi do szybkiej redukcji pokrywy lodowej, wzrasta prędkość dryfu lodów i wynoszenie lodów morskich z Arktyki, co prowadzi do zmiany ich struktury wiekowej i przyspieszenia letniego ich topnienia oraz opóźnienia jesienno-zimowego zamarzania.

Przy zmniejszonej powierzchni lodów i mniejszym ich zwarciu, brak warunków do powstawania zimowych inwersji. Ciśnienie atmosferyczne nad Arktyką spada, cyklony z niższych szerokości wnikają w głąb Arktyki, cyrkulacja przechodzi z fazy cyrkulacji antycyklonalnej do fazy cyrkulacji cyklonalnej. Strefa opadów z peryferii Arktyki przemieszcza się nad obszary jej wnętrza. Jest to scenariusz jednego z dwu reżimów cyrkulacyjnych, opisany przez Polyakova i Johnsona (2000). Wykryte przez nich oscylacje reżimów cyrkulacyjnych w Arktyce (LFO - Long Frequency Oscillation) o okresie 60-80 lat, stanowią proste odbicie około 70-letniej okresowości NA THC występującej w latach 1880-2000, której zmienność steruje tymi procesami. Do objaśnienia zmiany reżimów klimatycznych w Arktyce - z „chłodnego” na „ciepły”, i odwrotnie, nie jest potrzebne ani AGW, ani „wzmocnienie arktyczne”, wystarczą całkowicie procesy naturalne. THC jest procesem naturalnym, nie mającym związków z AGW.

WPLYW WSKAŹNIKÓW CYRKULACJI NA KSZTAŁTOWANIE TEMPERATURY POWIETRZA NA SPITSBERGENIE

Tadeusz Niedźwiedz¹, Ewa Łupikasz¹, Rajmund Przybylak², Øyvind Nordli³

¹Uniwersytet Śląski w Katowicach, Wydział Nauk o Ziemi, Katedra Klimatologii

²Uniwersytet M. Kopernika w Toruniu, Wydział Nauk o Ziemi, Katedra Meteorologii i Klimatologii

³Norweski Instytut Meteorologiczny

Cyrkulacja atmosfery jest jednym z czynników klimatotwórczych silnie determinujących zmienność i zmiany temperatury powietrza. W Arktyce, szczególne znaczenie w kształtowaniu temperatury powietrza przypisuje się przepływowi południkowemu. Dotychczasowe badania wskazują, na wzmożoną adwekcję powietrza z południa w okresach ocieplenia w Arktyce. Problem ilościowego udziału cyrkulacji atmosfery w kształtowaniu temperatury powietrza wciąż wymaga badań podobnie jak ocena wpływu cyrkulacji na temperaturę powietrza w skali regionalnej. Celem niniejszego artykułu jest określenie wpływu regionalnej cyrkulacji atmosfery nad Morzem Grenlandzkim oraz nad Morzem Norweskim na kształtowanie temperatury powietrza na Spitsbergenie, ze szczególnym uwzględnieniem ocieplenia z początku XX wieku (ang. ETCW).

Do jego realizacji wykorzystano skorygowaną serię kompozytową miesięcznej temperatury powietrza ze stacji Svalbard Lufthavn oraz dane gridowe ciśnienia atmosferycznego (NOAA-CIRES Twentieth Century Reanalysis, V2c), na podstawie których obliczono regionalne wskaźniki cyrkulacji atmosfery. Analizie poddano okres 1900-2014 roku, który został podyktowany dostępnością danych dotyczących ciśnienia atmosferycznego w okresie ETCW. Regionalne wskaźniki cyrkulacji południkowej (Si), strefowej (Wi) oraz wskaźnik cykloniczności (Ci) obliczono dla 4 przylegających do siebie obszarów obejmujących Spitsbergen (76°-80°N i 10°-30°E), obszar pomiędzy Spitsbergenem a Półwyspem Skandynawskim nazwany Bjørnøya (72°-76°N i 10-30E), Północną (76°-80°N i 10°W-10°E) oraz Południową (72°-76°N i 10°W-10°E) część Morza Grenlandzkiego (Ryc. 1) stosując zautomatyzowaną i uproszczoną metodę Niedźwiedzia. Dla każdego wskaźnika cyrkulacji rozpatrywano również jego składowe (Wi – WW i EE, Si – SS i NN oraz Ci – CC i AA). Omówiono przebiegi wieloletnie temperatury powietrza w poszczególnych porach roku. W celu określenia obszaru cyrkulacyjnego najsilniej wpływającego na temperaturę powietrza na Spitsbergenie, obliczono współczynniki korelacji (r, współczynnik Pearsona) pomiędzy temperaturą powietrza a wskaźnikami cyrkulacji Wi, Si, Ci oraz ich składowymi. Obliczenia przeprowadzono dla całego okresu 1900-2014 oraz dla ruchowych 30-leci w celu określenia stacjonarności relacji temperatura - cyrkulacja. Następnie dla miesięcy zimowych obliczono różnice średnich wskaźników pomiędzy 30-leciami reprezentującymi okresy: ETCW (1921-1950), chłodny (1961-1990) i współczesny ciepły (uznany jednocześnie za referencyjny, 1981-2010).

Średnia roczna temperatura powietrza w okresie ETCW była o 0,9°C wyższa niż w okresie chłodnym ale o 0,7°C niższa niż w okresie referencyjnym. Ocieplenie to było najsilniejsze zimą, duże jesienią ale słabo widoczne wiosną i latem. W zimie temperatura powietrza

w okresie 1921-1950 była o $2,9^{\circ}\text{C}$ wyższa niż w okresie 1961-1990, zaś jesienią o $0,9^{\circ}\text{C}$. Różnice temperatury pomiędzy analizowanymi dwoma okresami ciepłymi (ETCW i referencyjnym) wyniosły odpowiednio $+0,5^{\circ}\text{C}$ w zimie oraz $-0,2^{\circ}\text{C}$ jesienią.

W większości przypadków korelacje pomiędzy temperaturą powietrza i wskaźnikami cyrkulacji były wyższe po usunięciu trendów z ciągów czasowych. Najsilniejszy wpływ na temperaturę powietrza miał wskaźnik cyrkulacji południkowej (korelacje istotne we wszystkich sezonach), zwłaszcza jego składowa południowa. Siła korelacji była największa w zimie, a nieco niższa jesienią. W zimie oraz jesienią najwyższa temperatura powietrza związana jest z cyrkulacją południkową w obszarze Bjørnøya, a także nad samym Spitsbergenem. Wskaźnik Si dla Spitsbergenu i obszaru Bjørnøya wyjaśniał odpowiednio 38% i 39% zmienności w przebiegu temperatury powietrza, a jego składowa południowa około 41% i 42%. W lecie temperatura nad Spitsbergenem najsilniej skorelowana była ze wskaźnikiem Si nad północną częścią Morza Grenlandzkiego.

Wskaźnik cyrkulacji strefowej słabiej determinuje temperaturę powietrza na Spitsbergenie. Jedynie wartości wskaźnika Wi nad obszarem Bjørnøya były istotnie skorelowane z temperaturą powietrza, jego zmienność wyjaśniała jednak nie więcej niż 21% zmienności temperatury powietrza. Latem wpływ cyrkulacji strefowej nad obszarem Bjørnøya słabnie, natomiast znaczenia nabiera przepływ strefowy nad południową częścią Morza Grenlandzkiego. Sezonowym zmianom podlega również wpływ składowych wskaźnika cyrkulacji strefowej. Zimą i jesienią temperatura powietrza zależy zarówno od adwekcji powietrza z zachodu jak i ze wschodu, zwłaszcza nad obszarem Bjørnøya, natomiast wiosną i latem od adwekcji ze wschodu.

Wpływ wskaźnika Ci na temperaturę powietrza również charakteryzuje się zmiennością sezonową. Zimą oraz jesienią temperatura powietrza była istotnie skorelowana ze wskaźnikiem Ci tylko nad Morzem Grenlandzkim, latem obszar oddziaływania przesunął się nad Spitsbergen i obszar Bjørnøya, z kolei wiosną znaczenie posiada częstość układów niżowych nad Spitsbergenem i południową częścią Morza Grenlandzkiego.

Zaprezentowane wstępne wyniki wskazują zatem na wyraźną sezonową zmienność obszarów kluczowych pod względem wpływu cyrkulacji atmosfery na temperaturę powietrza na Spitsbergenie. Zimą, wiosną oraz jesienią temperatura powietrza skorelowana jest z przepływem południkowym i nieco słabiej z przepływem strefowym powietrza nad obszarem Bjørnøya oraz nad Spitsbergenem. Latem większe znaczenie ma cyrkulacja nad Morzem Grenlandzkim. Wskaźnik cykloniczności wyróżnia się największą sezonowością relacji z temperaturą powietrza.

Badania były realizowane w ramach projektu nr. 2015/19/B/ST10/02933 „Przyczyny ocieplenia klimatu Arktyki w pierwszej połowie XX wieku” finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

CHRONOLOGIA PRZYROSTÓW ROCZNYCH WIERZBY POLARNEJ (*SALIX POLARIS*) Z WYSPY NIEDŹWIEDZIEJ (BJØRNØYA) I JEJ POTENCJAŁ W BADANIACH DENDROKLIMATYCZNYCH

Magdalena Opała-Owczarek¹, Piotr Owczarek², Krzysztof Migala²

¹ Katedra Klimatologii, Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski w Katowicach, ul. Będzińska 60, Sosnowiec

² Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego, Wydział Nauk o Ziemi i Kształtowania Środowiska, Uniwersytet Wrocławski, Pl. Uniwersytecki 1, Wrocław

Roślinność tundry jest doskonałym wskaźnikiem zmian klimatycznych Arktyki. Prowadzone od kilkunastu lat badania dendrochronologiczne w obszarach polarnych potwierdziły, że drzewa, krzewy i krzewinki z rodziny *Salicaceae* i *Betulaceae* posiadają doskonale widoczne przyrosty roczne, które dają podstawę do tworzenia chronologii a tym samym rekonstrukcji wybranych elementów klimatycznych (np. Opała i in. 2016; Owczarek i Opała 2016, Opała-Owczarek i in. 2018; Buchwał i in. 2019). Obecnie, poza rekonstrukcją zmian klimatycznych, ważnymi zagadnieniami we współczesnej analizie ekosystemów polarnych są: progowa zmienność „zazielenienia” (greening) i „brązowienia” (browning) tundry (AMAP 2017), fizyczne zaburzenia w obrębie ekosystemów (permafrost, procesy geomorfologiczne) (Owczarek i in. 2013) czy wpływ efektu suszowego. Dendroklimatologia w istotny sposób pozwala na uzyskanie nowych danych, które mogą być pomocne w wyjaśnieniu przebiegu tych procesów. Zmiany klimatyczne w Arktyce są ewidentne, i przejawiają się nie tylko wzrostem temperatury ale również zmianami ilości i jakości opadów atmosferycznych (AMAP 2017; Marsz i Styszyńska 2007; Isaksen i in. 2016; Przybylak 2016).

Badania dendrochronologiczne były prowadzone na Wyspie Niedźwiedziej (74°25N, 19°00 E), która stanowi najbardziej na południe wysuniętą część archipelagu Svalbard. Wyspa Niedźwiedzia reprezentuje typ klimatu polarnego morskiego, kształtowanego przez wpływ prądu północnoatlantyckiego ze stosunkowo łagodnymi temperaturami w okresie zimowym. Średnia roczna temperatura powietrza na stacji Bjørnøya wahała się od -5,43°C (w 1969 r.) do 1,81°C (w 2016 r.), przy średniej -1,39°C (1946-2018). Førland i Hanssen-Baur (2003) obliczyli, że wzrost temperatury na Wyspie Niedźwiedziej w okresie 1976–2000 wynosił + 0,49°C. Natomiast od początku XXI wieku wzrost temperatury przyspieszył i wynosi 1,09 °C (2000-2018). Średnia roczna suma opadów na tym obszarze wynosi 396,4 mm (1946-2018), obecnie obserwuje się ich nieznaczny wzrost w skali roku (17,8 mm na dekadę) (MET Norwegia, 2019). Należy jednak zauważyć, że ilość opadów w miesiącach letnich maleje w ciągu ostatnich kilku dekad.

43 próby wierzby polarnej (*Salix polaris* Wahlenb.), obejmujące system korzeniowy oraz zdrewniałe pędy, zostały pobrane w sierpniu 2012 roku we wschodniej części Wyspy Niedźwiedziej z wysokości 56 – 81 m n.p.m. W trakcie prac laboratoryjnych zastosowane zostały standardowe metody preparacji. Wykorzystano metodę cięcia seryjnego przy pomocy mikrotomu, która pozwala na tworzenie chronologii z jednej rośliny na podstawie kilku przekrojów poprzecznych. Dzięki temu wyeliminowano możliwe błędy związane z występowaniem przyrostów brakujących i wyklinowujących się. W analizowanych próbach

stwierdzono obecność dobrze widocznych w obrazie mikroskopowym przyrostów rocznych. Szerokość słoików w zebranych osobnikach waha się od stosunkowo szerokich (190 μm) do skrajnie wąskich (<10 μm), przy średniej wartości 33 μm . Maksymalny wiek zebranych okazów wyniósł 91 lat.

Na podstawie wykonanych pomiarów zestawiono chronologię średnią z 29 najlepiej skorelowanych ($r > 0,50$) serii pomiarowych. Utworzona 91-letnia chronologia obejmuje lata 1922-2012. Od połowy lat 80. (a szczególnie w latach 1992-2005) obserwuje się zwiększenie szerokości przyrostów rocznych, natomiast w ostatniej dekadzie wyraźne jest zmniejszenie tempa wzrostu. Analizy korelacyjne wykazały, że największy wpływ na przyrost radialny wierzby polarnej z Wyspy Niedźwiedziej ma temperatura wiosny i lata (od marca do września). Przy czym najwyższe wskaźniki współczynnika korelacji otrzymano dla temperatury minimalnej w maju i czerwcu ($r = 0,49$) oraz temperatury maksymalnej we wrześniu (0,44). Wyniki analizy korelacji ruchomej pozwoliły stwierdzić, że zależność szerokości przyrostu od temperatury powietrza była najsilniejsza w latach 1955-2005. Spadkowi siły korelacji z temperaturą w ostatnich latach towarzyszy wzrost znaczenia letnich opadów atmosferycznych (istotny statystycznie związek z sumą opadów w sierpniu).

Przeprowadzone analizy dendroklimatyczne wykazały dominujący wpływ temperatury okresu wiosenno-letniego na tempo wzrostu wierzby polarnej. Podobnie jak było to opisane dla tego gatunku na południowym Spitsbergenie (Owczarek i Opała, 2016), w ostatnich latach stwierdza się coraz wyraźniejszą rolę opadów atmosferycznych. Wraz z kontynuacją trendu wzrostu temperatury i zmniejszania się letnich opadów atmosferycznych stres suszowy u tego gatunku może się pogłębiać, prowadząc do zjawiska „brązowienia tundry” i jej nadmiernego wysuszenia. Przedstawione wstępne wyniki z nowego w dendroklimatologii stanowiska mogą być cennym wkładem w dyskusji o przyczynach gwałtownych zmian w ekosystemach tundry.

Badania były prowadzone w ramach grantu MNiSW nr. N N306 601440 na podstawie zezwolenia gubernatora Svalbardu (RIS-ID 4477).

Bibliografia:

AMAP, 2017. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway.

Buchwal A., Weijers S., Blok D., Elberling B., 2019. Temperature sensitivity of willow dwarf shrub growth from two distinct High Arctic sites. *International Journal of Biometeorology* 63: 167–181.

Førland, E. J., Hanssen- Bauer, I., 2003. Past and future climate variations in the Norwegian Arctic: overview and novel analyses. *Polar Research* 22: 113-124.

Isaksen, K., Nordli, Ø., Førland E. J., Łupikasza, E., Eastwood, S., Niedźwiedź, T., 2016. Recent warming on Spitsbergen—Influence of atmospheric circulation and sea ice cover. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121, doi:10.1002/2016JD025606.

Marsz A.A., Styszyńska A. (red.), 2007. Klimat Rejonu Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie – stan, zmiany i ich przyczyny. Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni.

Opala M., Migala K., Owczarek P., 2016. Two centuries-long dendroclimatic reconstruction based on Low Arctic *Betula pubescens* from Tromsø Region, Northern Norway. *Polish Polar Research* 37 (4), 457-476.

Opala-Owczarek M., Pirożnikow E., Owczarek P., Szymański W., Luks B., Kępski D., Szymanowski M., Wojtuń B., Migala K., 2018. The influence of abiotic factors on the growth of two vascular plant species (*Saxifraga oppositifolia* and *Salix polaris*) in the High Arctic. *Catena* 163: 219-232.

Owczarek P., Latocha A., Wistuba M., Malik I., 2013. Reconstruction of modern debris flow activity in the arctic environment with the use of dwarf shrubs – (south-western Spitsbergen) a new dendrochronological approach. *Z Geomorphol Supp* 57(3):75-95.

Owczarek, P., Opala, M., 2016. Dendrochronology and extreme pointer years in the tree-ring record (AD 1951–2011) of polar willow from southwestern Spitsbergen (Svalbard, Norway). *Geochronometria* 43 (1): 84–95.

Przybylak, R., 2016. The climate of the Arctic. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, Springer, Switzerland.

ANALIZA ZMIENNOŚCI WARUNKÓW KLIMATYCZNYCH ARCHIPELAGU SVALBARD NA PODSTAWIE SYMULACJI ARCTIC- CORDEX

Marzena Osuch¹, Tomasz Wawrzyniak¹ i grupa Arctic-CORDEX

¹Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk

W pracy analizowano zmienność warunków klimatycznych Archipelagu Svalbard w latach 1976-2100 na podstawie wyników wiązki symulacji klimatycznych o godzinowym i dobowym kroku czasowym o rozdzielczości przestrzennej (50, 25, 15, 12 i 2.5 km) dostępnych w ramach inicjatywy Arctic-CORDEX.

W pierwszym kroku, porównano wyniki symulacji wiązki modeli dla warunków brzegowych oraz początkowych pochodzących z ERA-Interim z dostępnymi obserwacjami ze stacji meteorologicznych (Barentsburg, Bjornoya, Edgeoya, Hopen, Hornsund, Lufthavn, NyAlesund i Sveagruva) oraz dostępnymi reanalizami dla okresu 1976-2005. Otrzymane wyniki wskazują że jakość symulacji zależy od analizowanej zmiennej, modelu klimatycznego oraz skali przestrzennej. Znacznie lepsze oszacowania (mniejsze błędy) uzyskano dla temperatury niż opadu. Istnieją statystycznie istotne różnice w wielkości błędów systematycznych pomiędzy modelami klimatycznymi oraz stacjami. Porównanie wyników pomiędzy symulacjami o różnej rozdzielczości przestrzennej wykazało że mniejsze błędy otrzymano dla symulacji o większej rozdzielczości przestrzennej.

W drugim kroku analizowano projekcje klimatyczne dla wszystkich dostępnych symulacji w ramach Arctic-CORDEX dla scenariuszy emisji RCP4.5 i RCP8.5. W tym celu oszacowano zmiany warunków klimatycznych w dwóch przyszłych okresach (2021-2050 i 2071-2100) w stosunku do okresu referencyjnego (1976-2005), a także trendy w okresie 1976-2100. Otrzymane wyniki wskazują że projekcje temperatury są spójne. Wszystkie analizowane modele symulują wzrost temperatury powietrza w czasie. Największe zmiany temperatury oszacowana dla miesięcy zimowych dla scenariusza RCP8.5. Analiza miesięcznych oraz rocznych sum opadu również wskazuje na wzrost lecz ze znacznie większym rozrzutem w oszacowaniach pomiędzy analizowanymi modelami.

MODELOWANIE WARTOŚCI ELEMENTÓW METEOROLOGICZNYCH DLA ARCHIPELAGU SVALBARD Z WYKORZYSTANIEM MEZOSKALOWEGO MODELU WRF

Natalia Pilgus¹, Maciej Kryza¹, Bartosz Czernecki², Krzysztof Migala¹, Leszek Kolendowicz²

¹Zakład Klimatologii i Ochrony Atmosfery, Uniwersytet Wrocławski

²Zakład Klimatologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Modelowanie numeryczne jest metodą umożliwiającą otrzymanie informacji ciągłej przestrzennie i czasowo. W kontekście obszarów Arktyki, a konkretnie Svalbardu, wykorzystanie modeli numerycznych do stworzenia symulacji o wysokiej rozdzielczości przestrzennej dotyczyło najczęściej analiz poszczególnych zjawisk dla stosunkowo niedużych obszarów i krótkich okresów czasu.

Prezentacja zawiera wyniki modelowania numerycznego otrzymane na podstawie pracy z mezoskalowym modelem numerycznym WRF 3.9 (*Weather Research and Forecasting*). Model został uruchomiony 3 razy dla okresu 2010-2017, z wykorzystaniem następujących źródeł warunków początkowych: ERA5, ERA-Interim i GFS FNL. Obszar poddany analizie uwzględnia cały archipelag Svalbard. Wyniki modelowania temperatury powietrza (2 m n.p.g) i prędkości wiatru (10 m n.p.g) zostały zestawione z danymi obserwacyjnymi z ośmiu stacji w obrębie archipelagu Svalbard. Często stosowanym zabiegiem w pracy z modelem jest uśrednianie symulacji o nieco odmiennych warunkach początkowych, czyli uśrednianie wiązek. W przypadku niniejszej pracy, taki zabieg został zastosowany, aby określić średnie wyniki błędu modelu dla lokalizacji stacji meteorologicznych w obrębie archipelagu.

Wyniki badań wskazują na nieco wyższe wartości błędu średniego absolutnego i niższe wartości współczynnika korelacji dla symulacji z użyciem GFS FNL jako źródła warunków początkowych. Wynikać to może z najmniejszej rozdzielczości spośród testowanych źródeł danych gridowych (oczko siatki $1^\circ \times 1^\circ$). Analiza statystyczna względem miesięcy wskazuje miesiące letnie jako okresy obarczone mniejszymi wartościami błędów w porównaniu do miesięcy zimowych.

ZASTOSOWANIE DANYCH Z REANALIZ DO ANALIZY WARUNKÓW TERMICZNO-WILGOTNOŚCIOWYCH NA OBSZARZE ARKTYKI

Piotr Piotrowski¹

¹ Katedra Meteorologii i Klimatologii, Uniwersytet Łódzki

Obszar Arktyki, dla którego dokonano analizy warunków termiczno-wilgotnościowych, został wydzielony dla poszczególnych pór roku w oparciu o ustalone wartości izoterm z określonych miesięcy wg metody Geba. Największym problemem był wybór reanalizy najlepiej oddającej rzeczywiste warunki termiczno-wilgotnościowe. Liczba punktów pomiarowych zbierających dane meteorologiczne przez dłuższy okres czasu na obszarze Arktyki jest ograniczona w zasadzie do obszarów lądowych. Dane z reanaliz umożliwiają potencjalne wykorzystanie ich do przestrzennych analiz klimatycznych z obszarów o małej gęstości sieci pomiarowej, takich jak Arktyka. W celu sprawdzenia przydatności danych z reanaliz do analizy warunków termiczno-wilgotnościowych w Arktyce i wyboru jak najlepszej(ych) przetestowano dane z reanaliz: ERA Integrim, ERA-40, NOAA-CIRES 20th Century Reanalysis (V2c) oraz NCEP-NCAR Reanalysis 1. Testowanie danych z reanaliz polegało na sprawdzeniu współbieżności danych w czasie i różnic pomiędzy danymi z reanaliz a danymi z pomiarów z ośmiu arktycznych stacji meteorologicznych. Największą zbieżność z danymi ze stacji meteorologicznych wykazały reanalizy ERA Integrim oraz ERA-40. Mimo pewnych wątpliwości co do jakości danych z tych reanaliz postanowiono zanalizować warunki termiczne w poszczególnych miesiącach w oparciu o temperaturę powietrza na wysokości 2 m oraz warunki wilgotnościowe na podstawie wartości wilgotności właściwej na 2 m. Największy wzrost temperatury powietrza odnotowano w okresie występowania nocy polarnej. Szczególnie duży wzrost temperatury stwierdzono w pasie od okolic archipelagu Svalbard po Nową Ziemię oraz na obszarze Oceanu Arktycznego przylegającego do Cieśniny Beringa. Wymienione obszary wyróżniają się także znacznym przyrostem wilgotności właściwej, ale tylko w niektórych miesiącach. Jakość danych z reanaliz ERA Integrim oraz ERA-40 budzi jednak wątpliwości co do wiarygodności wyników analizy trendu temperatury a także wilgotności powietrza. Przypuszczalnie, nieco lepsze zastosowanie mogą mieć dane z reanaliz do analizy zmienności przestrzennej, ale trudno jest je właściwie zweryfikować dla obszarów morskich Arktyki ze względu na zakres czasowy dostępnych danych meteorologicznych.

**WPLYW MAKROSKALOWYCH TYPÓW CYRKULACJI
ATMOSFERYCZNEJ NA POLE WIATRU W PRZYZIEMNEJ
WARSTWIE ATMOSFERY W PÓŁNOCNO-ZACHODNIEJ CZĘŚCI
ZATOKI PETUNIA (SPITSBERGEN)**

Marek Półrolniczak¹, Sebastian Kendzierski¹, Leszek Kolendowicz¹

¹Zakład Klimatologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Poster przedstawia rezultaty badań prowadzonych w roku 2018 w profilu: lodowiec Sven – przedpole rzeki Sven (Zatoka Petuniabukta, Svalbard), podczas letniej serii pomiarowej. W 2 punktach pomiarowych, zlokalizowanych na lodowcu (lodowiec i czoło lodowca) oraz jednym punkcie usytuowanym w dolinie rzeki Sven, w okresie lipiec-wrzesień zebrano dane dotyczące wartości prędkości i kierunku wiatru. Dodatkowo, w okresie 2 tygodni (druga połowa sierpnia) wykonano pomiary prędkości i kierunku wiatru za pomocą aerometru sonicznego zlokalizowanego w bezpośrednim sąsiedztwie Stacji Polarnej UAM. Uzyskane dane posłużyły do zbadania wpływu cyrkulacji atmosferycznej (w opracowaniu wykorzystano typy cyrkulacji wg. Niedźwiedzia) na prędkość i kierunek wiatru w przyziemnej warstwie atmosfery. W czasie występowania pogody radiacyjnej zauważono wpływ rzeźby terenu oraz podłoża na prędkość i kierunek wiatru w przygruntowej warstwie atmosfery.

Badania sfinansowano w ramach projektu NCN UMO-2014/15/B/ST10/04455.

CZY SKŁADNIKI ODŻYWCZE Z LODOWCÓW WPŁYWAJĄ NA OBIEG CO₂?

Lukasz Stachnik¹, Krzysztof Janik², Elżbieta Lępkowska², Dariusz Ignatiuk², Sławomir Sitek², Katarzyna Stachniak³

¹Wydział Nauk i Ziemi i Kształtowania Środowiska, Uniwersytet Wrocławski

²Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski / Centrum Studiów Polarnych

³Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk

Ocieplenie klimatu prowadzi do wzrostu odpływu wody ze zlewni zlodowaconych, a co za tym idzie zwiększa ładunek materiału zawieszonoego i rozpuszczonego. Zwiększeniu może ulec także ładunek składników pokarmowych w roztworze (rozpuszczone i koloidalne) i absorbowanych na powierzchni zawiesiny. Składniki pokarmowe poprzez wzrost produkcji pierwotnej (m.in. zwiększona fotosynteza) w strefie przybrzeżnej i wodach powierzchniowych na lądzie pochłaniają CO₂ z wody, a następnie z atmosfery. Intensywna ablacja lodowców będzie zwiększała odpływ i ładunek składników pokarmowych ze zlewni i w konsekwencji prowadzić będzie do intensyfikacji pochłaniania CO₂ (intensywniejsza produkcja pierwotna). Jest to część negatywnego sprzężenia zwrotnego w obszarach zlodowaconych.

Dotychczasowe badania wskazywały na to, że ładunek składników pokarmowych dostarczany z wód roztopowych Antarktydy i Grenlandii jest istotny i może wpływać na intensyfikację negatywnego sprzężenia zwrotnego. W mniejszym stopniu proces ten został określony dla obszarów zlodowaconych znajdujących się poza lądolodami. Należy podkreślić, że odpływ wody z tych obszarów wciąż stanowi duży udział w całkowitym odpływie wody z lądu i wroście poziomu oceanu światowego, co może zwiększać ładunek składników pokarmowych.

Celem niniejszej pracy jest określenie ładunku wysoko biodostępnych składników pokarmowych (Fe, P, Si) pochodzących z lodowca położonego poza lądolodami.

Na obszar badań wybrano lodowiec Werenskiolda położonym w SW Spitsbergenie o powierzchni 27 km² co stanowi około 60% całkowitej powierzchni jego zlewni. W budowie geologicznej dominują głównie łupki metamorficzne należącej do formacji Hecla Hoek.

Uzyskane wyniki wskazują, że stężenie składników pokarmowych absorbowanych na zawieszinie jest wyższe niż stężenie składników pokarmowych w roztworze. W szczególności ładunek biodostępnych form Si i Fe związanych z zawiesiną był 3-6 razy wyższy niż ładunek tych składników w roztworze. Z kolei ładunek absorbowanego na zawieszinie fosforu był niższy niż ładunek jego rozpuszczonej formy. W porównaniu do zlewni zlodowaconych na terenie Grenlandii, ładunek biodostępnego Fe obserwowany w zlewni lodowca Werenskiolda był około dwukrotnie niższy. Jednak w czasie sezonów ablacyjnych charakteryzujących się podwyższonymi ładunkami zawiesiny, ładunek Fe ulegał wzrostowi osiągając wartości zbliżonego do tych obserwowanych dla lodowców położonych na Grenlandii. Dotychczasowe badania nad ładunkiem składników odżywczych były

prowadzone w zaledwie kilku zlewniach zlodowaconych. Zeby określić globalne znaczenie tego procesu należy rozszerzyć zakres badań o zlewnie charakteryzujące się zróżnicowanymi warunkami środowiskowymi (m.in. czynniki klimatyczne, litologiczne, hydrologiczne, glaciologiczne).

W JAKI SPOSÓB ŚRODOWISKA WYBRZEŻY SPITSBERGENU ZAREAGOWAŁY NA ZMIANY KLIMATU, KTÓRE ZASZŁY OD ZAKOŃCZENIA MAŁEJ EPOKI LODOWEJ – PRZYCZYNEK DO TEORII PARAGLACJAŁU LITORALNEGO W WARUNKACH POLARNYCH.

Mateusz C. Strzelecki¹

¹Uniwersytet Wrocławski

O zmianach krajobrazowych jakie zaszły na Spitsbergenie od zakończenia małej epoki lodowej wiem naprawdę sporo. Recesja lodowców odsłoniła dziesiątki kilometrów kwadratowych przedpoli i dolin wypełnionych formami i osadami glacialnymi, które zostały poddane szybkiej transformacji przez całą mozaikę procesów rzeźbotwórczych, w których prym wiodła działalność fluwialna i stokowa (np. Lukas i in. 2005; Rachlewicz 2010; Mercier i in. 2009; Ewertowski i Tomczyk 2015; Senderak i in. 2017). Rozwinięte przez ostatnie dziesięciolecia paraglacjalne kaskady osadowe przemieszczały uwolnione z lodowców osady i tworzyły z nich stożki sandrowe, równiny aluwialne, aż w końcu docierały z nim do wybrzeży (np. Mercier i Laffly 2005; Strzelecki i in. 2018). Wybrzeża Spitsbergenu charakteryzuje prawdziwe bogactwo form litoralnych zarówno akumulacyjnych i erozyjnych. Wyjątkowym i wciąż mało poznanym środowiskiem są wybrzeża odsłaniane w wyniku recesji lodowców uchodzących do morza. Doskonałym przykładem jest tutaj zatoka Brepollen, która powstała w ostatnim wieku w głębi fiordu Hornsund odsłaniając kilkadziesiąt kilometrów nowych wybrzeży (Grabiec i in. 2019).

Wśród geomorfologów wybrzeży i geologów morza trwa dyskusja czy nowopowstałe plaże, kosy, bariery, świeżo odsłonięte klify i platformy abrazyjne pamiętają jeszcze swoje glacialne korzenie czy dynamika paraglacjalnych zmian krajobrazowych jaka panuje na Spitsbergenie zatarła już lodowcowe uwarunkowania ich ewolucji? W moim wystąpieniu postaram się pokazać jaki był charakter i tempo reakcji strefy wybrzeża na tą potężną dostawę osadów z uwolnionego spod lodu krajobrazu. Przedstawię przykłady różnych środowisk wybrzeżowych obserwowanych w Kongsfjorden, Billefjorden, Bellsundzie oraz Hornsundzie aby zastanowić się na ile wrażliwym wskaźnikiem zmian klimatu i związanych z nimi zmian krajobrazowych są współczesne wybrzeża Spitsbergenu.

Wystąpienie dedykowane dr hab. Piotrowi Zagórskiemu, wielkiemu znawcy wybrzeży spitsbergeńskich, z życzeniami szybkiego powrotu do zdrowia po kontuzji, którą odniósł w trakcie 41-wszej Wyprawy Polarnej IGF do Hornsundu. Wystąpienie przygotowałem podczas stypendium naukowego w Instytucie im. Alfreda Wegenera w Poczdamie finansowanego przez program im. Bekkera Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej (PPN/BEK/2018/1/00306).

Literatura

- Ewertowski MW, Tomczyk AM. 2015. Quantification of the ice-cored moraines' short- term dynamics in the high- Arctic glaciers Ebbabreen and Ragnarbreen, Petuniabukta, Svalbard. *Geomorphology* 234: 211–227. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.01.023>.
- Grabiec, M, Ignatiuk, D, Jania, J A., Moskalik, M, Głowacki, P, Błaszczuk, M, Budzik, T, Walczowski, W. 2018. Coast formation in an Arctic area due to glacier surge and retreat: The Hornbreen- Hambergbreen case from Spitsbergen. *Earth Surface Processes and Landforms* 43: 387–400. <https://doi.org/10.1002/esp.4251>.
- Lukas S, Nicholson LI, Ross FH, Humlum O. 2005. Formation, meltout processes and landscape alteration of high-arctic ice-cored moraines - examples from Nordenskiöld land, Central Spitsbergen. *Polar Geography* 29: 157–187.
- Mercier D, Laffly D. 2005. Actual paraglacial progradation of the coastal zone in the Kongsfjorden area, western Spitsbergen (Svalbard). In C. Harris, & J. B. Murton (Eds.), *Cryospheric systems: Glaciers and permafrost* (Special Publication 242 (pp. 111–117). London: Geological Society. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2005.242.01.10>.
- Mercier D, Étienne S, Sellier D, André, M- F. 2009. Paraglacial gullying of sediment- mantled slopes: A case study of Colletthøgda, Kongsfjorden area, West Spitsbergen (Svalbard). *Earth Surface Processes and Landforms* 34: 1772–1789. <https://doi.org/10.1002/esp.1862>.
- Rachlewicz G. 2010. Paraglacial modifications of glacial sediments over millennial to decadal time- scales in the high Arctic (Billefjorden, central Spitsbergen, Svalbard). *Quaestiones Geographicae* 29: 59–67. <https://doi.org/10.2478/v10117-010-0023-4>.
- Senderak K, Kondracka M, Gądek B. 2017. Talus slope evolution under the influence of glaciers with the example of slopes near the Hans Glacier, SW Spitsbergen, Norway. *Geomorphology* 285: 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.02.023>.
- Strzelecki MC, Long AJ, Lloyd JM, Małecki J, Pawłowski L, Jaskólski MW, Zagórski P. 2018. The role of rapid glacier retreat and landscape transformation in controlling the post- Little Ice Age evolution of paraglacial coasts in central Spitsbergen (Billefjorden, Svalbard). *Land Degradation and Development* 29: 1962–1978. <https://doi.org/10.1002/ldr.2923>.

WPLYW ZMIAN MIĄŻSZOŚCI WARSTWY CZYNNEJ NA FUNKCJONOWANIE ARKTYCZNEJ ZLEWNI NIEZŁODOWACONEJ

Tomasz Wawrzyniak¹, Marzena Osuch¹

¹ Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk

Funkcjonowanie zlewni rzecznych jest niezwykle istotnym elementem wskaźnikowym zmian środowiska zachodzących w Arktyce. Dotychczasowe analizy warunków hydrometeorologicznych prowadzone na Południowym Spitsbergenie wskazują, że Arktyka to miejsce największych zmian zachodzących na Ziemi. Wzrost temperatury powietrza, zmiana rocznego przebiegu opadów, częstsze występowanie opadów ciekłych, zmniejszenie miąższości pokrywy śnieżnej i skrócenie czasu jej zalegania, mają swoje odzwierciedlenie w przebiegu rocznym przepływów w zlewni. Wzrost temperatury powietrza powoduje degradację zmarzliny i wzrost miąższości warstwy czynnej. Wpływa to zarówno na powierzchniowe, jak i podpowierzchniowe procesy hydrologiczne, poprzez zmiany właściwości filtracyjnych gruntu, retencji oraz mechanizm generowania przepływu w zlewniach.

Głównym celem niniejszego opracowania jest ocena wpływu zmian warstwy czynnej wieloletniej zmarzliny na transformację opad-odpływ oraz na reakcję zlewni na opad. Zależności pomiędzy zmianami miąższości warstwy czynnej, przepływem a zmiennością parametrów modelu hydrologicznego HBV analizowano dla małej niezłodowaczonej zlewni Fuglebekken, znajdującej się w pobliżu Polskiej Stacji Polarnej Hornsund na Spitsbergenie.

Modelowanie hydrologiczne zlewni polarnych o zmiennej miąższości warstwy czynnej wieloletniej zmarzliny wymaga analizy niestacjonarności warunków środowiskowych oraz oceny ich wpływu na symulowane przepływy. W związku z tym, model został skalibrowany i zweryfikowany na zmierzonych przepływach w wydzielonych podokresach. Zastosowano podejście z ruchomym oknem czasowym, aby uzyskać sezonową zmienność parametrów. Jest to pierwsze opracowanie, które symuluje warunki podpowierzchniowe w niezłodowanej zlewni na Spitsbergenie, obejmujące retencję wód gruntowych, natężenie przepływu i zmiany miąższości warstwy czynnej.

Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego nr 2017/27/B/ST10/01269 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.

WPLYW WIELKOŚCI I ROZMIESZCZENIA KIER LODOWYCH NA PROCESY ATMOSFERYCZNE W WARSTWIE GRANICZNEJ ATMOSFERY

Marta Wenta¹

¹ Instytut Oceanografii, Uniwersytet Gdański

Zmiany obserwowane w pokrywie lodowej na obu biegunach w ostatnich dziesięcioleciach stanowią obiekt intensywnych i szeroko zakrojonych badań. Dotyczy to nie tylko postępującego zaniku lodu w Arktyce, ale również osłabienia pokrywy lodowej związanego z postępującym w ostatnich latach zmniejszeniem obszaru występowania lodu wieloletniego. W efekcie tych zmian coraz większe obszary w Arktyce zajmuje słabszy, cieńszy i bardziej podatny na fragmentację wskutek oddziaływania np. sztormów, sezonowy lód. Zmniejszenie wytrzymałości mechanicznej i zasięgu lodu morskiego ma szerokie konsekwencje dla klimatu i środowiska nie tylko obszarów polarnych, ale i niższych szerokości geograficznych. Wiele badań wskazuje, że zmienia się cyrkulacja atmosferyczna i oceaniczna globu, zaś ekosystemy obszarów polarnych ulegają wyraźnemu przeobrażeniu. Ze zmniejszeniem zasięgu pokrywy lodowej prawdopodobnie wiąże się również wzrost intensywności i częstotliwości występowania silnych cyklonów w rejonie Arktyki, które przyczyniają się do intensywnej fragmentacji lodu.

Intensywne tempo zachodzenia wspomnianych zmian w pokrywie lodowej wskazuje na występowanie dodatkowych czynników związanych z oddziaływaniem oceanu i atmosfery, które nie są uwzględnione w modelach. Obecnie stosowane modele klimatyczne nie odwzorowują dobrze nie tylko wspomnianych oddziaływań, ale i tempa zmian obserwowanych na obu biegunach. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest złożony charakter procesów zachodzących w systemie ocean–lód–atmosfera w skali mikro- jak i wielkoskalowej jak i brak odpowiednich danych obserwacyjnych. Należy również wziąć pod uwagę, że rozdzielczość przestrzenna aktualnie stosowanych modeli pogodowych, wynosząca od kilku do kilkudziesięciu kilometrów, nie pozwala na bezpośrednią analizę oddziaływań ocean–lód–atmosfera, zachodzących na poziomie pojedynczej kry lub szczeliny. Coraz częściej zwraca się uwagę, że oddziaływania zachodzące w skali mniejszej niż rozdzielczość horyzontalna modeli (czyli tzw. procesy podsiatkowe) mogą być główną przyczyną występujących w modelach błędów.

Pojawienie się w okresie zimowy w momencie szczeliny w lodzie wiąże się z występowaniem różnicy temperatury pomiędzy wodą, a powietrzem, która może wynosić nawet 40°C. W rezultacie następuje intensywna wymiana ciepła i wilgoci, która zaburza cyrkulację powietrza i stabilną strukturę atmosfery nad lodem. Dotychczasowe badania skupiały się głównie na analizie efektów występowania pojedynczych lub kilku szczelin, nie biorąc pod uwagę sytuacji silnej fragmentacji lodu na liczne, różnej wielkości kry. Tymczasem Horvat i inni (2016) zaobserwował wpływ wielkości kier na wiry oceaniczne i tempo topnienia lodu. Można zatem przypuszczać, że rozmiar kier oraz ich przestrzenne

rozmieszczenie może również wpływać nad procesy zachodzące w atmosferze. Zbadanie tego typu efektów fragmentacji lodu jest celem przedstawionych badań.

W ramach prezentowanych badań przeprowadzono serię symulacji z wykorzystaniem wyidealizowanej wersji modelu WRF (Weather Research and Forecasting) dla sześciu różnych koncentracji lodu, $c = 50\%$, $c = 60\%$, $c = 70\%$, $c = 80\%$, $c = 85\%$ i $c = 90\%$, oraz dla sześciu prędkości wiatru przypisanych na starcie modelu. Przyjmując identyczne warunki początkowe oraz koncentrację lodu, ale różne wielkości i rozmieszczenie przestrzenne kier oraz szczelin, analizowano wpływ tych czynników na cyrkulację atmosferyczną, strumienie ciepła utajonego i odczuwalnego, a także zawartość wody oraz pary wodnej w atmosferze.

Na podstawie wyników przeprowadzanych analiz określono, że uśrednione dla domeny modelu wartości wymienionych zmiennych są podatne na zmienność rozkładu kier oraz szczelin. Zauważono również, że w zależności od zastosowanej mapy lodu zmienia się cyrkulacja atmosferyczna oraz rozmieszczenie stref konwekcji, powodując przestrzenne zróżnicowanie wartości zmiennych charakteryzujących warstwę graniczną atmosfery (prędkość wiatru, temperatura, wilgotność). Na przykładzie strumienia wilgoci (QFX) stwierdzono, że tego typu zmienność może prowadzić do występowania wyraźnych błędów, gdy wartość QFX jest obliczana na podstawie uśrednionych dla danego obszaru wartości, co często jest wykonywane w modelach numerycznych pogody. W celu dalszej analizy tego zagadnienia obszar modelu o wymiarach 20×20 km potraktowano jako oczko siatki globalnego modelu pogodowego. Zastosowano dwie metody wyznaczania wartości turbulentnego strumienia wilgoci. W zastosowanym modelu WRF, jak we wszystkich modelach pogody, wartość strumienia obliczana jest na podstawie właściwości podłoża i atmosfery w każdym oczku siatki (100×100 m). W pierwszej metodzie uśredniono wartość tego strumienia dla całej domeny modelu ($\overline{QFX_1}$). W drugiej metodzie wzięto pod uwagę modelowane wartości temperatury, prędkości wiatru, współczynnika wymiany ciepła, stosunku mieszania pary wodnej oraz gęstości powietrza obliczone dla każdego oczka siatki i również uśredniono je dla całego modelowanego obszaru, a następnie, przyjmując ten sam wzór, który jest stosowany w modelu WRF, obliczono średnią wartość strumienia wilgoci w oparciu o te wartości ($\overline{QFX_2}$). Ze względu na nieliniowy charakter opisywanych zależności, kolejność uśredniania ma znaczący wpływ na wynik. W celu analizy tego wpływu wyznaczono współczynnik α określający stosunek między wartościami strumieni otrzymanymi za pomocą obu metod ($\frac{\overline{QFX_1}}{\overline{QFX_2}}$). Policzono 180 wartości tego współczynnika dla różnych kombinacji parametrów modelu, obejmujących koncentrację lodu, prędkość wiatru oraz ułożenie przestrzenne i wielkość kier. Zauważono między innymi, że dla prędkości wiatru powyżej 6 m/s efekty związane z rozprzestrzenieniem i rozmiarem kier mogą zostać pominięte, gdyż silniejsze mieszanie powietrza niweluje ich wpływ, oraz że wartość α jest zależna od intensywności i rozmieszczenia stref konwekcji dla danej symulacji. Ustalono, że dla poszczególnych koncentracji lodu wartość współczynnika α zmienia się w podobny sposób w zależności od prędkości wiatru oraz wielkości kier i opisano te zależności odpowiednim równaniem. Jest to pierwszy krok do sformułowania parametryzacji efektów związanych z fragmentacją lodu, które mogłyby być zastosowane w modelach numerycznych.

Prezentowane badania, choć dotyczą jedynie wyników modelowania, potwierdzają coraz częściej stawianą w środowisku naukowym tezę, że to właśnie nie uwzględnianie w modelach numerycznych pogody procesów podsiatkowych może być przyczyną występujących w nich błędów. W połączeniu z zaplanowanym przeprowadzeniem pomiarów nad niejednorodnym morskim oraz dalszymi symulacjami modelowymi zaprezentowane wyniki mogą przyczynić się do poprawy działania modeli numerycznych pogody.

ZMIENNOŚĆ TEMPERATURY POWIETRZA W NE GRENLANDII W OKRESIE 1927-2017

Przemysław Wyszyński¹, Øyvind Nordli², Rajmund Przybylak¹

¹ Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Katedra Meteorologii i Klimatologii, Toruń

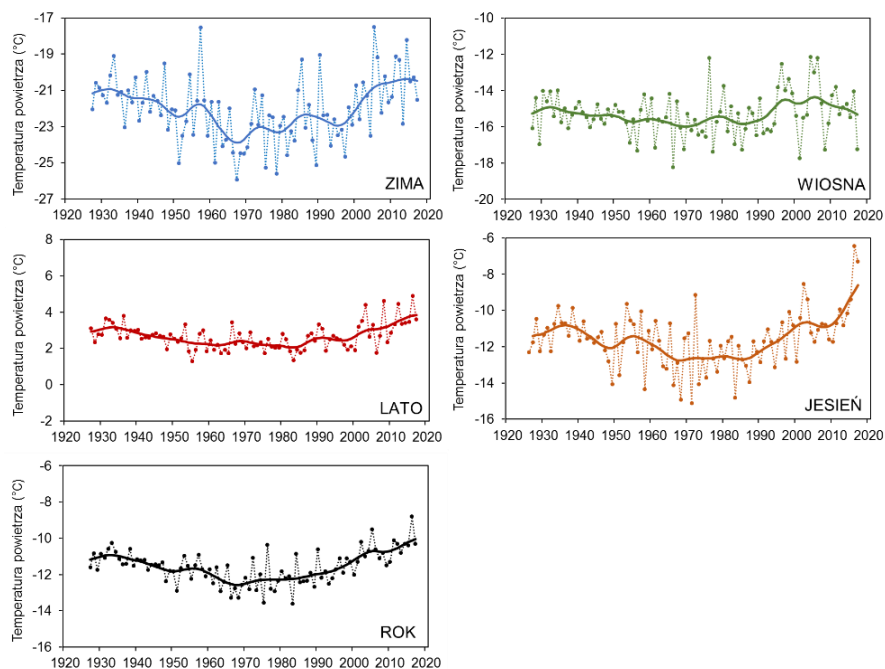
² Norweski Instytut Meteorologiczny, Oslo

W pracy przedstawiono wieloletnią zmienność temperatury powietrza w NE Grenlandii w okresie 1927-2017. Do tej pory najdłuższa seria temperatury powietrza dla tego obszaru pochodziła z Danmarkshavn (1949-2017). Dla celów niniejszej pracy przedłużono ją o 22 lata korzystając z danych obserwacyjnych z Myggbukty (Ryc. 1), gdzie w latach 1926-1958 istniała stacja meteorologiczna założona przez Norwegów. Dane miesięczne z Danmarkshavn dla okresu 1993-2017 pobrano z Duńskiego Instytutu Meteorologicznego (Cappelen 2018), natomiast dane dobowe z okresu 1949-1992 zostały zebrane w ramach pracy habilitacyjnej przez Przybylaka (1996). Oryginalne raporty z obserwacjami meteorologicznymi z Myggbukty zostały w 2016 r. odnalezione w magazynie Norweskiego Instytutu Meteorologicznego. Dane zostały zdigitalizowane i sprawdzone pod względem jakości. Serię z Danmarkshavn uznano jako serię główną, na którą wyinterpolowano metodą najmniejszych kwadratów (Nordli i in. 2014) dane z Myggbukty. Dodatkowo dobowe luki uzupełniono danymi z drugiej wersji Reanalizy Dwudziestowiecznej (20CRv2c; Compo i in. 2011).

Przeanalizowano dekadową zmienność średnich rocznych i sezonowych temperatury powietrza (Gaussowski filtr dolnoprzepustowy), wyliczono trendy liniowe oraz ich istotność statystyczną (sekwencyjny test Manna–Kendalla), określono zmiany reżimu termicznego (Rodionov 2015) i stopnia kontynentalizmu (K-indeks, Ewert 1972). Zmiany temperatury powietrza w NE Grenlandii porównano z wieloletnimi seriami pomiarowymi istniejącymi dla niektórych stacji Północnego Atlantyku (Ryc. 1.). Ponadto oszacowano wpływ Atlantyckiej Oscylacji Wielodekadowej (AMO), Oscylacji Północnoatlantyckiej (NAO), Grenlandzkiego Indeksu Blokującego (GBI) oraz zmian zasięgu lodów morskich (SIC) na zmienność temperatury powietrza na badanym obszarze.



Rycina 1. Położenie stacji meteorologicznych na obszarze Północnego Atlantyku, które zostały użyte w niniejszym opracowaniu. Wypełnione kropki oznaczają stacje z danymi obserwacyjnymi, na podstawie których utworzono rozszerzoną serię temperatury powietrza dla NE Grenlandii. Natomiast kwadraty oznaczają najbliższe punkty gridowe z Reanalizy Dwudziestowiecznej (wer. 20CRv2c).



Rycina 2. Wieloletnie średnie roczne i sezonowe temperatury powietrza (°C) w NE Grenlandii w okresie 1927-2017. Pojedyncze lata (kropki) zostały wygładzone dolnoprzepustowym filtrem Gaussa (linia pogrubiona) o odchyleniu standardowym trzech lat, co odpowiada ok. 10-letniemu filtrowi prostokątnemu.

Seria temperatury powietrza z NE Grenlandii (Ryc. 2) rozpoczyna się od wczesnych lat wczesnodwudziestowiecznego ocieplenia (ETCW, 1921-1950), potem obejmuje ochłodzenie lat 60 i 70. XX wieku oraz okres współczesnego ocieplenia się klimatu. W okresie ETCW najcieplejszą okazała się dekada 1927-1936, która jednak była średnio rocznie chłodniejsza o 0.6°C od ostatniej dekady współczesnego ocieplenia (2008–2017). Dla całego badanego okresu 1927–2017 nie stwierdzono istotnych statystycznie trendów zmian sezonowej i rocznej temperatury powietrza. Wielkości trendów wahają się w granicach $0,02\text{--}0,06^{\circ}\text{C}/\text{dekadę}$. W okresie pierwszych 40 lat (1927-1966) temperatura powietrza przeważnie spadała (Ryc. 2). Najwyższym stopniem ochłodzenia odznaczała się zima ($-0,57^{\circ}\text{C}/\text{dekadę}$), podczas gdy spadek temperatury dla lata, jesieni i roku był mniejszy i wyniósł średnio ok. $-0,30^{\circ}\text{C}/\text{dekadę}$. Wyraźne ocieplenie się w regionie NE Grenlandii, podobnie jak na całej kuli ziemskiej, wystąpiło w drugiej połowie 1970. lat. W ostatnich badanych w niniejszym artykule 40 latach (1978-2017) największe ocieplenie stwierdzono jesienią i zimą, kiedy wzrost temperatury wyniósł odpowiednio $0,98^{\circ}\text{C}/\text{dekadę}$ i $0,88^{\circ}\text{C}/\text{dekadę}$. W obu wspomnianych wyżej podokresach zmiany średniej temperatury (spadek/wzrost) wiosny były nieistotne. Należy dodać jednak, że w ostatnim dwudziestoleciu (1998–2017) stwierdzono nawet nieistotną statystycznie tendencję jej ochładzania ($-0,44^{\circ}\text{C}/\text{dekadę}$). Natomiast pozostałe sezony znacząco się w tym czasie ocieplily, szczególnie jesień i lato, kiedy trendy temperatury wyniosły odpowiednio $1,16^{\circ}\text{C}/\text{dekadę}$ i $0,83^{\circ}\text{C}/\text{dekadę}$. Stosując test Rodionova stwierdzono występowanie dwóch zmian reżimu termicznego, pierwsza wystąpiła na przełomie lat 50 i 60. XX w., czyli w momencie zakończenia się ETCW i rozpoczęcia ochłodzenia, a druga w połowie lat 90. XX w., kiedy w Arktyce, w tym w NE Grenlandii, obserwowano istotny wzrost tempa ocieplenia się klimatu. Istnieją oczywiście kilkuletnie przesunięcia czasu zmiany reżimu termicznego biorąc pod uwagę średnie sezonowe i roczne temperatury powietrza. Okres ETCW wyróżniał się większym stopniem oceanizmu klimatu niż okres współczesny (K-indeks był niższy o ok. 2-3%). Natomiast w okresie chłodniejszego klimatu wykazywał cechy bardziej kontynentalne. Zrekonstruowana seria temperatury NE Grenlandii najlepiej koreluje z temperaturą powietrza ze stacji Jan Mayen, Svalbard Lufthavn i Bjørnøya. Współczynniki korelacji (r) średniej temperatury rocznej oraz zimy i jesieni kształtują się na poziomie od 0,63 do 0,76, natomiast wiosny i lata są dużo niższe (0,25–0,58). Korelacja serii NE Grenlandii spada do poniżej 0,50 w stosunku do obszarów położonych na wybrzeżu Morza Barentsa (stacja Vardø). Nie stwierdzono natomiast korelacji ze zrekonstruowaną przez Vinther'a i in. (2006) serią temperatury dla obszaru SW Grenlandii, z wyjątkiem sezonu letniego, dla którego jest istotnie statystyczna, $r = 0,49$.

Niniejsze opracowanie zostało wykonane w ramach projektu pt. „Przyczyny ocieplenia klimatu Arktyki w pierwszej połowie XX wieku” finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki (Nr 2015/19/B/ST10/02933).

Bibliografia:

Cappelen, J. (red.), 2018. Greenland – DMI Historical Climate Data Collection 1784-2017. DMI Report 18–04. Danish Meteorological Institute, Copenhagen, 118 s.

Compo, G.P., Whitaker, J.S., Sardeshmukh, P.D., Matsui, N., Allan, R.J., Yin, X., Gleason, B.E., Vose, R.S., Rutledge, G., Bessemoulin, P., Brönnimann, S., Brunet, M., Crouthamel, R.I., Grant, A.N., Groisman, P.Y., Jones, P.D., Kruk, M., Kruger, A.C., Marshall, G.J., Mauerer, M., Mok, H.Y., Nordli, Ø., Ross, T.F., Trigo,

R.M., Wang, X.L., Woodruff, S.D., Worley, S.J., 2011. The twentieth century reanalysis project. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137: 1–28. doi: 10.1002/qj.776.

Ewert, A., 1997. Kontynentalizm termiczny klimatu region wpolarnych. *Problemy Klimatologii Polarnej* 7, 55–64.

Nordli, Ø., Przybylak, R., Ogilvie, A.E.J., Isaksen, K., 2014. Long-term temperature trends and variability on Spitsbergen: the extended Svalbard airport temperature series, 1898–2012. *Polar Research*, 33, 21349. <https://doi.org/10.3402/polar.v33.21349>.

Przybylak, R., 1996. Zmienność temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w okresie obserwacji instrumentalnych w Arktyce. Uniwersytet Mikołaj Kopernika, Toruń, 280 s.

Rodionov, S., 2015. A sequential method of detecting abrupt changes in the correlation coefficient and its application to Bering Sea climate. *Climate* 3: 474-491. doi:10.3390/cli3030474

Vinther, B.M., Andersen, K.K., Jones, P.D., Briffa, K.R., Cappelen, J., 2006. Extending Greenland temperature records into the late eighteenth century. *J. Geophys. Res.*, 111, D11105, doi:10.1029/2005JD006810