

PROPAGACJA CIEPŁYCH ANOMALII W PRĄDZIE ZACHODNIOSPITSBERGEŃSKIM

WARM ANOMALIES PROPAGATION IN THE WEST SPITSBERGEN CURRENT

Waldemar Walczowski

Instytut Oceanologii PAN
ul. Powstańców Warszawy 55, 81–712 Sopot
walczows@iopan.gda.pl

Zarys treści. Badania Prądu Zachodniospitsbergeńskiego prowadzone przez Instytut Oceanologii PAN wykazały skomplikowaną strukturę transportu Wody Atlantyckiej w stronę Oceanu Arktycznego. Od roku 2004 zauważalne było intensywne ocieplenie się prądu. Dzięki obserwacji adwekcji ciepłych anomalii, określono prędkość propagacji sygnału przez wschodnią i zachodnią gałąź Prądu Zachodniospitsbergeńskiego. Zarówno wzrost temperatury, jak struktura transportu Wody Atlantyckiej mają istotne znaczenie dla klimatu i warunków ekologicznych Arktyki.

Słowa kluczowe: Prąd Zachodniospitsbergeński, Woda Atlantycka, klimat, Arktyka

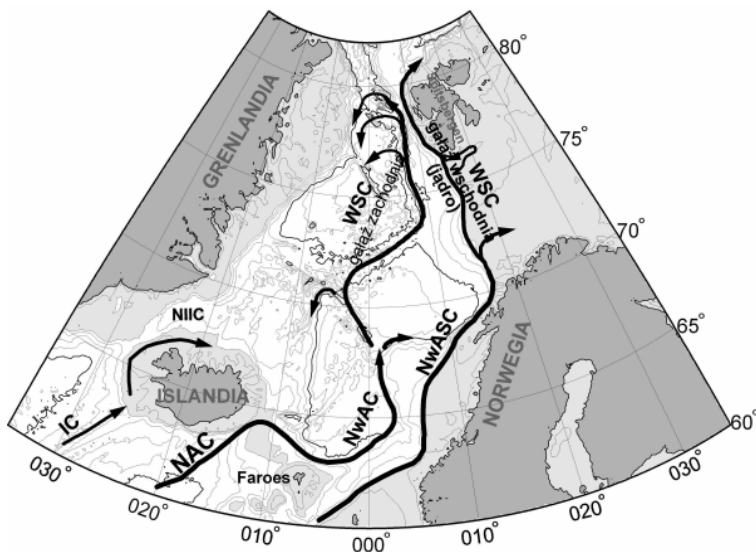
1. Wstęp

Ciepła, mocno zasolona Woda Atlantycka (Atlantic Water, AW) napływająca do Mórz Nordyckich¹ to jeden z najważniejszych czynników klimatotwórczych. Jej oddziaływanie zaznacza się zarówno w skali globalnej jak i lokalnej. W Morzu Grenlandzkim AW niesiona jest przez Prąd Zachodniospitsbergeński (West Spitsbergen Current, dalej skrót WSC), ostatni etap ciepłej, powierzchniowej fazy wszechoceanicznej cyrkulacji termohalinowej. Formowanie wód głębinowych zachodzące przy udziale AW w Morzu Grenlandzkim, to według dzisiejszego stanu wiedzy, jeden z głównych procesów kształtujących cyrkulację termohalinową (Hansen i in. 2004). Niezwykle znaczenie ma również wymiana Wód Atlantyckich z Oceanem Arktycznym². Dyskusja nad rolą AW w Oceanie Arktycznym zintensyfikowała się szczególnie wskutek obserwowanego ostatnio, dramatycznego topnienia stałej pokrywy lodowej tego akwenu.

Istotne znaczenie w adwekcji AW na północ ma struktura WSC. Badania Instytutu Oceanologii PAN wykazały, że WSC składa się z dwóch gałęzi (Piechura i Walczowski 1995). Wschodnią gałąź

¹ Morza Norweskie, Islandzkie, Grenlandzkie i Barentsa określane są często jako Morza Nordyckie.

² Ocean Arktyczny – nazwa powszechnie używana w oceanografii światowej. W polskim nazewnictwie geograficznym nazwa "Ocean Arktyczny" odpowiada Morzu Arktycznemu.



Ryc. 1. Powierzchniowe prądy morskie wnoszące ciepłą Wodę Atlantycką do Mózł Nordyckich.

IC – Prąd Irmingera, NIIC – Prąd Północnoislandzki, NAC – Prąd Północnoatlantycki, NwAC – Prąd Norwesko-Atlantycki, NwASC – Prąd Norweski, WSC – Prąd Zachodniospitsbergeński

Fig. 1. Warm surface currents carrying Atlantic Water into the Nordic Seas

IC – Irminger Current, NIIC – North Icelandic Irminger Current, NAC – North Atlantic Current, NwAC – Norwegian-Atlantic Current, NwASC – Norwegian Atlantic Slope Current, WSC – West Spitsbergen Current

plynie wzdłuż krawędzi szelfu Morza Barentsa i Spitsbergenu, jako kontynuacja Prądu Norweskiego (Norwegian Atlantic Slope Current; skrót NwASC), prądu płynącego nad stokiem kontynentalnym, wzdłuż dolnego załomu szelfu Norwegii (ryc. 1). Do Mózł Nordyckich ten strumień AW wpływa od południa rynną pomiędzy Wyspami Owczymi i Szetlandami (Faeroe-Shetland Channel). Związana z Frontem Arktycznym gałąź zachodnia płynie wzdłuż systemu podwodnych grzbietów – Grzbietu Moha i Grzbietu Knipowicza – i jest kontynuacją Prądu Norwesko-Atlantyckiego (Norwegian Atlantic Current, NwAC). NwAC jest z kolei przedłużeniem Prądu Północnoatlantyckiego, który wpływa do Mózł Nordyckich ponad Grzbietem Grenlandzko-Szkockim, pomiędzy Islandią i Wyspami Owczymi. AW w strumieniu wschodnim (jądro WSC) jest cieplejsza i bardziej zasolona niż w strumieniu zachodnim. Za transport do Oceanu Arktycznego odpowiedzialna jest głównie gałąź wschodnia, gałąź zachodnia po dotarciu w rejon Cieśniny Frama w większości recyrkułuje na południowy zachód i na południe.

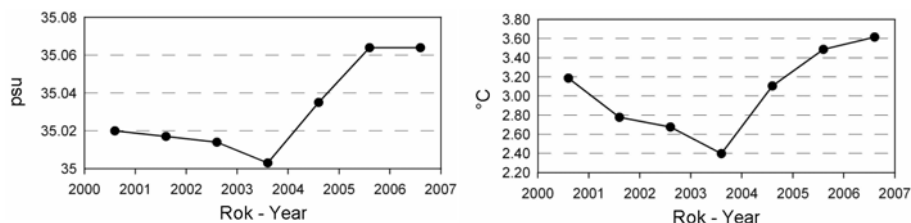
Przepływając wzdłuż zachodnich wybrzeży Spitsbergenu wody atlantyckie oddziałują na klimat tego obszaru, a poprzez to także na zachowanie się lodowców oraz warunki ekologiczne na lądzie. Ważne jest również regulowanie przez AW warunków hydrologicznych, procesów lodowych i warunków ekologicznych we fiordach zachodniego wybrzeża Spitsbergenu.

2. Ocieplenie WSC

Instytut Oceanologii PAN bada Prąd Zachodniospitsbergeński od roku 1989, zajmując się głównie strukturą WSC, przenoszeniem masy i ciepła, wymianą transfrontalną, wymianą na granicy ocean-

atmosfera. Stała siatka punktów pomiarowych na akwenie pomiędzy północną Norwegią a północnym Spitsbergenem pozwala śledzić zmienność przestrzenną i czasową własności fizykochemicznych, struktury i dynamiki Prądu Zachodniospitsbergeńskiego. Przekroje przecinają główne drogi przepływu AW do Oceanu Arktycznego: południkowy pomiędzy Północną Norwegią a Wyspą Niedźwiedzią (Barents Sea Opening) i równoleżnikowe, w stronę Cieśniny Framy.

W latach 2004–2006 obserwowano znaczne podwyższenie temperatury i zasolenia Wody Atlantyckiej w Prądzie Zachodniospitsbergeńskim. Po minimum w roku 2003, temperatura AW wzrosła latem 2006 do rekordowych, nigdy wcześniej nie notowanych wartości (ryc. 2).



Ryc. 2. Średnie zasolenie [psu] i temperatura [°C] warstwy Wody Atlantyckiej na przekroju wzdłuż równoleżnika 76°30'N, latem 2000–2006. Dane r/v „Oceania”

Fig. 2. Mean temperature [°C] and salinity [psu] of the Atlantic Water layer at section along the 76°30'N parallel in summers 2000–2006. Data from r/v “Oceania”

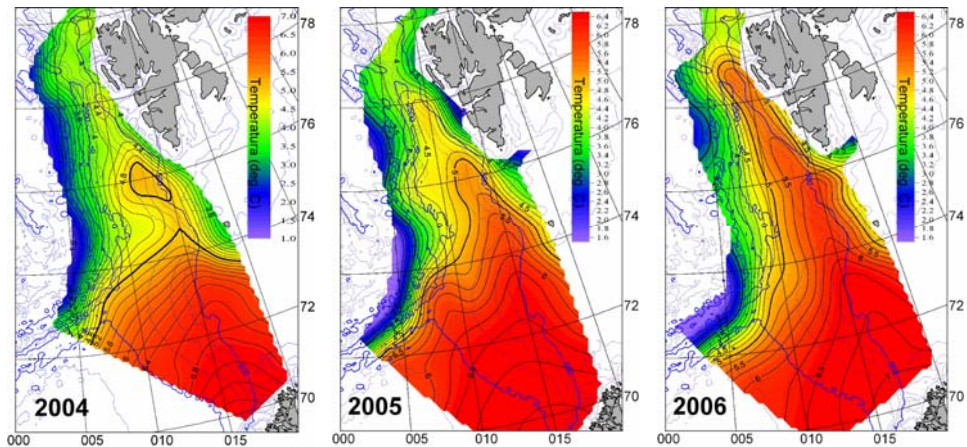
W tym czasie nastąpiła niezwykła ekspansja języka ciepłej wody na północ. W ciągu 2 lat izoterma 5°C na poziomie 100 m (ryc. 3) przesunęła się o ponad 4° szerokości geograficznej (Walczowski i Piechura 2007). Łączyło się to z ekspansją AW na szelf i penetracją tych wód do fiordów zachodniego Spitsbergenu. Przyniosło widoczne skutki w postaci osłabienia, a nawet zaniku pokrywy lodowej w fiordach, cieplejszych zim, zmian w warunkach ekologicznych.

3. Propagacja ciepłych anomalii

Istotnym z punkt widzenia oceanografii i klimatologii jest problem przewidywalności własności AW w rejonie Cieśniny Framy. Główne cechy AW nabiera w średnich szerokościach geograficznych, w rejonie Wiru Subpolarnego, a niesiony sygnał ma głównie charakter adwekcyjny. Z pozoru przewidywanie zmian własności AW w wysokich szerokościach geograficznych na podstawie badań ‘*upstream*’³, powinno więc być dość proste. Rzeczywiście, Holliday i inni (2006) pokazuje przenoszenie ciepłego, słonego sygnału wzdłuż wschodnich granic Oceanu Atlantyckiego i Mórz Nordyckich. Sygnał uformowany w roku 1998 na szerokości 57°N dotarł do Cieśniny Framy na szerokość 78°N w roku 2004, co daje średnią prędkość adwekcji powyżej 1.6 cm/s. Polyakov i inni (2005) przedstawiają dane z szeregu prądomiery pokazujące propagację sygnału ocieplenia przez system prądów płynących wzdłuż załamania szelfu (NwASC, WSC gałąź wschodnia) do Cieśniny Framy i dalej w Oceanie Arktycznym. Autorzy określają średnią prędkość propagacji ciepłej anomalii od Svinoy Section (63°N) do Cieśniny

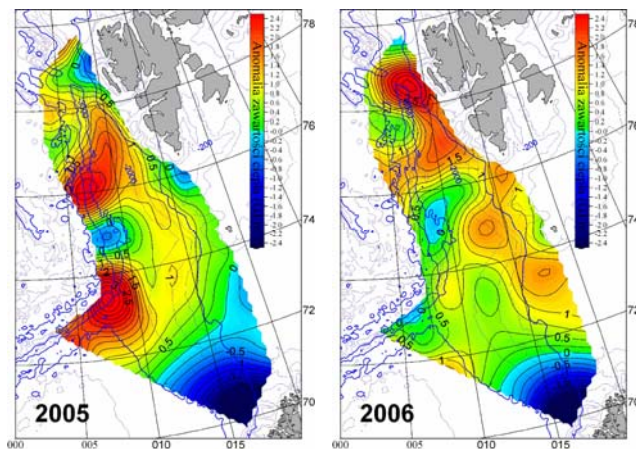
³ Badania “upstream” – badania “pod prąd”. Poznanie charakterystyki fizykochemicznej wód niesionych przez prąd w jakimś profilu pozwala na przewidywanie z dużą dozą pewności właściwości wód jakie pojawiają się z opóźnieniem na profilu położonym dalej, z biegiem prądu.

Frama (79°N) na 3.8 cm/s. Porównanie danych IO PAN z przekroju na szerokości 76°30'N z danymi norweskimi ze Svinoy Section pokazuje opóźnienie ciepłego sygnału rzędu 18–21 miesięcy, co daje średnią prędkość propagacji rzędu 3–3.5 cm/s (Walczowski i Piechura 2006). Jest to więc wartość porównywalna z tą otrzymana przez Polyakova.



Ryc. 3. Temperatura na poziomie 100 m w lipcu 2004–2006. Izoterma 1°C i 5°C zaznaczone grubszą linią. Dane r/v 'Oceania'

Fig. 3. Temperature at 100 m in July 2004–2006. Isotherm of 1°C and 5°C in bold. Data from r/v "Oceania"



Ryc. 4. Anomalie ciepła zawartego w warstwie Wody Atlantyckiej w lipcu 2005 i 2006

Fig. 4. Heat anomalies in the Atlantic Water layer in July 2005 and 2006

Dużo większe problemy sprawia określenie szybkości transmisji sygnału przez zachodnią gałąź WSC. O ile wiadomo było wcześniej o istnieniu zachodniej gałęzi Prądu Norwesko-Atlantyckiego (Poulain i in. 1996) o tyle, mimo wcześniejszych doniesień, nie brano pod uwagę tego, że ma on

istotne znaczenie w Morzu Grenlandzkim. Dopiero po publikacji Orviki i Niiler (2002), zaczęto zwracać uwagę na to źródło AW. Brak jest jednak sieci prądomierzy, z których można by porównać przesunięcie czasowe sygnałów. Pomiary IO PAN w Morzu Grenlandzkim pozwoliły na pośrednie oszacowanie średniej prędkości adwekcji ciepłych anomalii wzdłuż Frontu Arktycznego. W dwu kolejnych latach obserwowano w zachodniej części WSC antycyklonalne wiry o średnicy 150 km i głębokości do 900 m. Mezoskalowe wiry w Froncie Arktycznym obserwowane były przez nas wielokrotnie, jednak tak wielkie struktury zaobserwowano po raz pierwszy. W roku 2005 centra wirów znajdowały się odpowiednio na szerokościach geograficznych 73.5°N i 76°N. W roku 2006 obserwowany był jeden wir na szerokości 79°N (ryc. 4). Analiza własnych danych hydrologicznych oraz danych z prądomierza zainstalowanego w Kongsfiordzie (Cottier inf. ustna, Cottier i in. 2007) pozwoliła stwierdzić, że wir obserwowany latem 2006 na 79°N to ten sam, co zlokalizowany w 2005 na szerokości 73.5°N. Dodatkowo, w marcu 2006 w Kongsfiordzie zarejestrowano przejście wiru obserwowanego przez nas latem 2005 na 76°N. Wielkość obserwowanych przesunięć wirów daje średnią prędkość adwekcji 1.9–2.1 cm/s.

Różne prędkości propagacji sygnału (3.4 cm w części wschodniej i 2 cm w części zachodniej) utrudniają predykcję własności AW w Cieśninie Frama. Dodatkowo, o ile obserwowana była kreacja mniejszych wirów mezoskalowych we Froncie Arktycznym, o tyle nie do końca poznane jest pochodzenie tak dużych wirów jak te obserwowane w 2005 roku. Mogą one powstać w Morzu Norweskim lub Grenlandzkim, albo niżej – w Północnym Atlantyku. Dodatkowo, wskutek konfiguracji dna oba strumienie AW konvergują na szerokości geograficznej 78°N, by następnie ponownie się rozdzielić na dwa bądź nawet 3 oddzielne przepływy.

4. Podsumowanie

Na własności AW w Cieśninie Frama i na transport do Oceanu Arktycznego składa się wiele różnorodnych procesów. Jednym z nich jest złożenie, a następnie rozdzielenie dwu strumieni AW, niosących wodę o różnych parametrach, z różną prędkością. Dodatkowo, intensywność obu przepływów zmienia się w czasie. Mimo tego, na bazie obserwacji na niższych szerokościach geograficznych można przewidzieć przejście dużej anomalii (skok temperatury), a nawet z dużym prawdopodobieństwem prognozować generalny trend (ocieplenie, ochłodzenie AW). Latem 2007 nastąpiło ochłodzenie AW w rejonie Cieśniny Frama – powrót do stanu z roku 2005. Wbrew innym opiniom, w opublikowanej przed letnim rejsem pracy (Walczowski i Piechura 2007), na bazie synoptycznych pomiarów z roku 2006, przewidzieliśmy to odwrócenie trendu.

Dokładne prognozowanie zmian własności AW, a tym bardziej transportu do Oceanu Arktycznego, na bazie danych upstream jest jednak znacznie trudniejsze. Estymacje prędkości propagacji opierają się bowiem na obserwacji anomalii temperatury czy zasolenia, a nie na ich bezwzględnych wartościach. Woda Atlantycka płynąc w stronę cieśniny Frama podlega znacznej modyfikacji, oddając większość ciepła do atmosfery i przyległych mórz. Warunki wymiany ocean-atmosfera zależą w dużej mierze od cyrkulacji atmosferycznej, w tym od indeksu NAO (North Atlantic Oscillation, Oscylacja Północnego Atlantyku). Wymiana poprzez fronty rozdzielające różne masy wodne jest również zmienna w czasie i w dużym stopniu zależy od indeksu NAO.

Literatura

- Cottier F.R., Tverberg V., Inall M.E., Svendsen H., Griffiths C., 2005, Water mass modification in an Arctic fjord through cross-shelf exchange: The seasonal hydrography of Kongsfjorden, Svalbard. *Journal of Geophysical Research*, 110, C12005, doi: 10.1029/2004JC002757.
- Hansen B., Østerhus S., Quadfasel D., Turrell W., 2004, Already the Day After Tomorrow? *Science*, 305: 953–954.
- Holliday N.P., Hughes S., Lavin A., Mork K.A., Nolan G., Walczowski W., Beszczynska-Möller A., 2007, The end of trend? The progression of unusually warm and saline water from the eastern North Atlantic into the Arctic Ocean. *CLIVAR Exchanges*, 12(1): 19–20.
- Orvik K.A., Niiler P., 2002, Major pathways of Atlantic water in the northern North Atlantic and the Nordic Seas toward the Arctic. *Geophysical Research Letters*, 29(19), 1896, L015002, doi:10.1029/2002GL015002.
- Piechura J., Walczowski W., 1995, The Arctic Front: structure and dynamics. *Oceanologia*, 37(1): 47–73.
- Polyakov I.V., Beszczynska A., Carmack E.C., Dimitrenko I.A., Fahrbach E., Frolov I.E., Gerdes R., Hansen E., Holfort J., Ivanov V.V., Johnson M.A., Kracher M., Kauker F., Morison J., Orvik K.A., Schauer U., Simmons H.L., Skagseth Ø., Sokolov V.T., Steele M., Timokhov L.A., Walsh D., Walsh J.E., 2005, One more step toward a warmer Arctic. *Geophysical Research Letters*, 32, L17605, doi:10.1029/2005GL023740.
- Poulain P.-M., Warn-Varnas A., Niiler P.P., 1996, Near-surface circulation of the Nordic seas as measured by Lagrangian drifters. *Journal of Geophysical Research*, 101 (C8): 18237–18258.
- Walczowski W., Piechura J., Osinski R., Wieczorek P., 2005, The West Spitsbergen Current volume and heat transport from synoptic observations in summer (2005). *Deep-Sea Research*, 52: 1374–1931.
- Walczowski W., Piechura J., 2006, New evidence of warming propagating toward the Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*, 33, L12601, doi:10.1029/2006GL025872
- Walczowski W., Piechura J., 2007, Pathways of the Greenland Sea Warming. *Geophysical Research Letters*, 34, L10608, doi: 10.1029/2007GL029974.

Summary

Progressive warming of the West Spitsbergen Current (WSC) has been observed by Institute of Oceanology Polish Academy of Science (IOPAS) since summer 2004. Northward shifting of the Atlantic Water tongue was considerable; between 2004 and 2006 isotherm 5°C at 100 m moved to the north more than 2° of latitude. Comparing published results from the Svinoy Section with IOPAS data, rate of warm impulse propagation in the WSC eastern branch has been estimated as 3–35 cm/s. In the western branch observations of warm anomalies allowed to estimate warm propagation mean velocity as 1.9–2.1 cm/s.