Problemy Klimatologii Polarnej 14

2004 69 – 78

# WPŁYW ZMIAN TEMPERATURY WODY NA PRĄDZIE NORWESKIM NA KSZTAŁTOWANIE ROCZNEJ TEMPERATURY POWIETRZA W ATLANTYCKIEJ ARKTYCE I NOTOWANE TAM OCIEPLENIE W OKRESIE OSTATNIEGO 20-LECIA

Anna Styszyńska

Katedra Meteorologii i Oceanografii Nautycznej, Wydział Nawigacyjny, Akademia Morska
ul. Sędzickiego 19, 81–374 Gdynia
stysa@am.gdynia.pl

## 1. Wprowadzenie

Zmiany klimatyczne zachodzące w atlantyckim sektorze Arktyki budzą od wielu lat bardzo duże zainteresowanie. W ostatnich dwu dekadach XX wieku obserwuje się tam stosunkowo silny wzrost temperatury powietrza (m.in. Førland i in. 1997, Hanssen-Bauer i in. 1998, Przybylak 2000, Tuomenvirta i in. 2000, Niedźwiedź 2003). Jednoznaczne określenie przyczyn zmian termiki na obszarze Arktyki jest bardzo trudne, gdyż pomiędzy poszczególnymi składowymi systemu klimatycznego Arktyki zachodzą skomplikowane układy sprzężeń zwrotnych. Dość powszechne jest przekonanie, że obserwowany wzrost temperatury powietrza w Arktyce stanowi bezpośredni (patrz np. IPCC, 1996) lub pośredni (np. Comisio, 2003) rezultat efektu cieplarnianego. Duża grupa badaczy, między innymi polskich (np. Niedźwiedź 1997, 2003, 2004, Przybylak 1996), uważa, że w kształtowaniu warunków termicznych atlantyckiego sektora Arktyki kluczową rolę odgrywa cyrkulacja atmosferyczna. Obecnie coraz częściej ocieplanie się atlantyckiej Arktyki wiąże się ze zwiększonym napływem do tego rejonu ciepłych wód atlantyckich (m.in. Zhang i in. 1998, Furevik 2001, Karcher i in. 2003). Powszechnie znanym rezultatem tego oddziaływania jest występowanie silnych dodatnich anomalii temperatury powietrza nad obszarem wybrzeży Półwyspu Skandynawskiego i Islandii oraz najdalej na północ w skali półkuli północnej przesunięty zasięg lodów morskich w rejonie Spitsbergenu.

Marsz (1999) wykazał, że pomiędzy temperaturą powierzchni oceanu (TPO) na wybranych akwenach Atlantyku Północnego, a miesięczną i roczną temperaturą powietrza na stacjach Jan Mayen i Svalbard-Lufthavn istnieją stosunkowo ścisłe związki. Mają one charakter asynchroniczny, to znaczy, że zmiany TPO wyprzedzają o kilka miesięcy następujące zmiany miesięcznej temperatury powietrza. Niektóre z wykrytych związków są na tyle silne, że zdaniem tego autora, można traktować je jako związki prognostyczne.

Większość wód atlantyckich wprowadzanych do Arktyki to wody transportowane przez Prąd Norweski. Część ciepła niesiona wraz z masami wody tego prądu dotrze do Arktyki wywierając tam

określone skutki klimatyczne, jednak znaczna część zasobów tego ciepła zostanie rozchodowana na wymianę ciepła z atmosferą w czasie drogi przez Morze Norweskie. Badania nad strumieniami ciepła z oceanu do atmosfery na Morzu Norweskim wykazały, że mogą one osiągać tam wyjątkowo duże wartości (Perry i Walker 1982, Ugryumov 1982, Alekseeev 1987, Savčenko i Nagurnyj 1987), szczególnie w chłodnej porze roku.

Dopływ ciepła wraz z wodami Prądu Norweskiego wykazuje dużą zmienność w funkcji czasu, stąd zarówno ilość ciepła przekazywanego do atmosfery w czasie drogi wód w Prądzie Norweskim, jak i ilość ciepła wprowadzanego bezpośrednio wraz z wodami do Arktyki będzie wykazywała podobną zmienność. W ten sposób zmienność stanu termicznego wód Morza Norweskiego powinna wprowadzać elementy zmienności do klimatu Arktyki. Kruszewski, Marsz i Zblewski (2003) wykryli, że zimowa temperatura wody na Prądzie Norweskim wykazuje stosunkowo silne, występujące z opóźnieniem, korelacje z temperaturą powietrza na Spitsbergenie, Bjornoyi, Hopen i Jan Mayen. Silne i istotne statystycznie korelacje między średnią temperaturą wody z okresu styczeń – kwiecień w gridzie 2 x 2° o współrzędnych środka: 67°N i 10°E (środkowa część Morza Norweskiego) zaznaczają się z temperaturą lipca, sierpnia i września tego samego roku co temperatura wody (opóźnienie 3–5 miesięcy) oraz temperaturą powietrza w listopadzie i grudniu następnego roku (opóźnienie 18–20 miesięcy). W pracy tej sformułowano również hipotezy na temat mechanizmów prowadzących do występowania opisanych zależności.

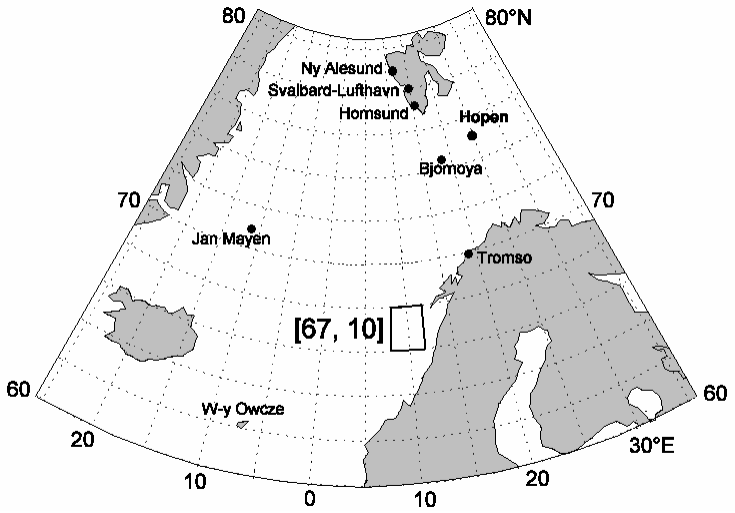
Wody Prądu Norweskiego transportują ciepłe i silnie zasolone wody atlantyckie. Zimowa temperatura powierzchni oceanu wskazuje na zasoby ciepła zawarte w głębszych warstwach wód. Temperatura wody w gridzie [67,10] charakteryzuje pośrednio zasoby ciepła wnoszonego wraz z wodami atlantyckimi do Morza Norweskiego i dalej, wraz z prądami Zachodniospitsbergeńskim i Nordkapskim, do Arktyki.

Jeżeli zimowa TPO w wyróżnionym przez Kruszewskiego i współautorów (2003) gridzie wykazuje związki z temperaturą powietrza zarówno miesięcy letnich (lipiec – wrzesień danego roku) jak i zimowych (listopad – grudzień następnego roku) to tak rozciągnięte w czasie zależności winny również skutkować zmianami rocznej temperatury powietrza. Cytowani autorzy podają, że taka zależność dla analizowanych przez nich stacji istnieje, nie zajmują się jednak tym zagadnieniem bardziej szczegółowo. Wykryte przez Kruszewskiego i współautorów (2003) związki postanowiono zatem zbadać ponownie rozszerzając nieco zakres terytorialny badań.

## 2. Obszar badań i materiały

Celem pracy jest określenie wpływu wywieranego przez zmiany zasobów ciepła wnoszonych do Arktyki przez Prąd Norweski na roczną temperaturę powietrza w rejonie atlantyckiej Arktyki obejmującej obszar od Hopen na wschodzie po Jan Mayen na zachodzie, oraz od Spitsbergenu na północy po północną Norwegię na południu (ryc. 1).

Wykorzystano ciągi miesięcznych wartości temperatury powietrza z okresu 1982–2003 na 7 stacjach: Jan Mayen (70° 56'N, 008°40'W), Ny Alesund (78°55'N, 011°57'E), Svalbard-Lufthavn (78°15'N, 015°28'E), Hornsund (77°00'N, 015°33'E), Bjornoya (74°31'N, 019°01'E), Hopen (76°30'N, 025°04'E) i Tromso (69°39'N, 018°56'E). Dane dla Hornsundu uzyskano z Roczników Meteorologicznych opracowanych w Pracowni Badań Polarnych Oddziału Morskiego IMGW pod kierunkiem M. Miętusa oraz od lipca 2000 roku w Instytucie Geofizyki PAN w Warszawie. Dane dla stacji Hopen i Ny Alesund otrzymano z Norweskiego Instytutu Meteorologicznego. Źródłem danych dla pozostałych stacji był zbiór NORDCLIM (Tuomenvirta i in. 2001) uzupełniony dla okresu 2002–2003 danymi uzyskanymi z Norweskiego Instytutu Meteorologicznego.




Ryc. 1. Położenie gridu [67,10] i stacji meteorologicznych uwzględnionych w analizie
Fig. 1. Location of grid [67,10] and weather stations analysed in this study

Wykorzystany w analizie ciąg zimowej (styczeń–kwiecień) temperatury powierzchni oceanu w gridzie 2 x 2° o współrzędnych środka 67°N, 10°E obliczony został na podstawie miesięcznych wartości TPO w gridach 1 x 1 ° pochodzących ze zbioru Reynoldsa (Reynolds i Smith 1994, Reynolds i in. 2002). Uśrednienie wartości TPO dla pola 2 x 2° pozwoliło na częściową eliminację szumów termicznych generowanych przez drobnoskalowe procesy hydrologiczne (przesunięcia osi prądu, tworzenie się zamkniętych wirów). Zbiór ten (SST OI v.1 – NOAA CIRES, Climate Diagnostic Center, Boulder, Co) stanowi materiał całkowicie jednorodny pod względem klimatycznym i obejmuje okres od listopada 1981 do kwietnia 2003. Okres, który poddano badaniom w niniejszym artykule obejmuje pełne lata, czyli 1982–2002 (21 lat). Jest to okres, w którym zaznacza się na obszarze atlantyckiej Arktyki silne ocieplenie.

### 3. Wyniki

Przeprowadzona analiza przestrzennego rozkładu współczynników korelacji rocznej temperatury powietrza na analizowanych stacjach z zimową temperaturą powierzchni wody w gridzie [67,10] potwierdza sformułowane przez Kruszewskiego i in. (2003) hipotezy o mechanizmach opóźnionych oddziaływań zmian zasobów ciepła na Morzu Norweskim na temperaturę powietrza na badanym obszarze.

Analiza związków rocznej temperatury powietrza na rozpatrywanych stacjach z zimową temperaturą powierzchni wody w gridzie [67,10] – dalej Tw – wykazała, że na wszystkich badanych stacjach związki takie są istotne statystyczne na poziomie $p < 0.05$ (95% poziomu ufności). Związki te zaznaczają się zarówno w tym samym roku (k) co wartość Tw jak i w roku następnym (k+1). Roczną temperaturę powietrza na danej stacji (T(s)) można traktować jako liniową funkcję wartości Tw:

$$T(s) = A + b \cdot Tw . \qquad [1]$$

Wartości wyrazów wolnych (A) i współczynników kierunkowych (b) opisujących te związki na badanych stacjach i ich charakterystyki statystyczne zestawiono w tabelach 1 (dla roku k) i 2 (dla roku k+1).

Tabela 1 – Table 1

Wartości wyrazów wolnych (A) i współczynników kierunkowych b w równaniu [ 1 ] oraz charakterystyka statystyczna równań dla poszczególnych stacji (R – współczynnik korelacji, adj. $R^2$ – współczynnik determinacji, p – poziom istotności statystycznej równania). Szeregi T(s) i Tw z lat 1982–2002, n = 21

Values of constant term (A) of the direction coefficients b in the formula [1] and statistical characteristics of formulas for given stations (R – correlation coefficient, adj. $R^2$ – determination coefficient, p – level of statistical significance of formula). The series of Tw and T(s) is taken from period 1982–2002, n = 21

| Stacja – Station | A | b | R | adj. $R^2$ | p < |
|---|---|---|---|---|---|
| Jan Mayen | –12.130 (±4.054) | 1.847 (±0.644) | 0.550 | 0.266 | 0.010 |
| Bjornoya | –14.160 (±4.758) | 2.005 (±0.755) | 0.518 | 0.232 | 0.016 |
| Hornsund | –18.490 (±5.648) | 2.226 (±0.897) | 0.495 | 0.205 | 0.023 |
| Svalbard-Lufthavn | –22.088 (±6.529) | 2.626 (±1.037) | 0.502 | 0.213 | 0.020 |
| Ny Alesund | –18.796 (±5.983) | 2.103 (±0.950) | 0.453 | 0.163 | 0.039 |
| Hopen | –26.155 (±7.113) | 3.306 (±1.129) | 0.558 | 0.275 | 0.009 |
| Tromso | –5.214 (±2.453) | 1.281 (±0.398) | 0.602 | 0.329 | 0.004 |

Wpływ Tw w tym samym roku na wartość rocznej temperatury powietrza powinien się realizować przez regulację cyrkulacji atmosferycznej w okresie od lipca do września. O "sile" wpływu informuje wartość współczynnika kierunkowego b (tab. 1), wyjaśniająca jaka nastąpi zmiana rocznej temperatury powietrza przy zmianie wartości Tw o 1 K (1°C). Jak wynika z zestawienia w tabeli 1, najwyższe wartości współczynników b obserwuje się na Hopen, w Svalbard-Lufthavn i Hornsundzie. Oznacza to, że temperatura roczna rejonu środkowego i południowego Spitsbergenu oraz nad wodami rozciągającymi się na E–ESE od S Spitsbergenu jest najbardziej "czuła" na zmiany wartości Tw w tym samym roku. Największy stopień determinowania zmienności rocznej temperatury powietrza przez zmienność Tw w tym samym roku obserwuje się nad akwenem rozciągającym się od Tromso przez Jan Mayen, Bjornoyę, do Hopen (objaśnienie od 33 do 23%).

Tabela 2 – Table 2

Wartości wyrazów wolnych (A) i współczynników kierunkowych b w równaniu [ 1 ] oraz charakterystyka statystyczna równań dla poszczególnych stacji (R – współczynnik korelacji, adj. $R^2$ – współczynnik determinacji, p – poziom istotności statystycznej równania dla danej stacji). Szereg Tw z lat 1982–2002, rocznej temperatury powietrza z lat 1983–2003, n = 21

Values of constant term (A) of the direction coefficients b in the formula [1] and statistical characteristics of formulas for given stations (R – correlation coefficient, adj. $R^2$ – determination coefficient, p – level of statistical significance of formula for a given station). The series of Tw is taken from the period 1983–2002, annual air temperature from 1983–2003, n = 21

| Stacja – Station | A | b | R | adj. $R^2$ | p < |
|---|---|---|---|---|---|
| Jan Mayen | -13.468 (±3.586) | 2.075 (±0.569) | 0.641 | 0.380 | 0.002 |
| Bjornoya | -16.220 (±4.452) | 2.330 (±0.707) | 0.603 | 0.330 | 0.004 |
| Hornsund | -21.454 (±4.976) | 2.703 (±0.790) | 0.617 | 0.349 | 0.003 |
| Svalbard-Lufthavn | -25.209 (±5.987) | 3.124 (±0.954) | 0.602 | 0.329 | 0.004 |
| Ny Alesund | -23.367 (±5.283) | 2.031 (±0.839) | 0.612 | 0.342 | 0.003 |
| Hopen | -28.133 (±6.637) | 3.623 (±1.054) | 0.619 | 0.351 | 0.003 |
| Tromso | -4.513 (±2.829) | 1.181 (±0.449) | 0.517 | 0.228 | 0.016 |

Wpływ wartości Tw na kształtowanie się rocznej temperatury powietrza w następnym roku jest większy, niż wpływ Tw w tym samym roku. Zmienność zmiennej niezależnej objaśnia tu od 38 do 23% zmienności zmiennej zależnej (patrz tab. 2). Oznacza to, że opóźniony o 19–20 miesięcy wpływ termiczny adwekcji wód atlantyckich w wysokie szerokości geograficzne, głównie przenoszonych przez Prąd Zachodniospitsbergeński, wnosi większy wkład do temperatury średniej rocznej, niż wcześniejsze, opóźnione o 3–5 miesięcy oddziaływanie atmosferyczne.

Podobnie, jak i w przypadku analizy związków występujących w tym samym roku, największą "czułość" na zmiany wartości Tw w roku poprzedzającym wykazują stacje zachodniego wybrzeża Spitsbergenu i Hopen. Największy stopień objaśnionej zmienności temperatury rocznej następnego roku przez Tw obserwuje się na Jan Mayen, Hopen i stacjach leżących wzdłuż zachodnich wybrzeży Spitsbergenu. Zwraca uwagę, że Tromso, którego temperatura średnia roczna była najsilniej objaśniana przez wartość Tw w tym samym roku, w przypadku roku następnego objaśniana jest najsłabiej.

Dotychczasowa analiza wykazuje, że na roczną temperaturę powietrza w rejonie Morza Grenlandzkiego, północnej części Morza Norweskiego i zachodniej części Morza Barentsa w roku k istotny statystycznie wpływ wywiera jednocześnie wartość Tw z roku k i roku k-1 (poprzedzającego). Można to zapisać jako funkcję dwu zmiennych:

$$Ts(k) = A + b \cdot Tw(k) + c \cdot Tw(k-1) \qquad [2]$$

Wartości wyrazów wolnych, współczynników kierunkowych stojących przed wartościami zmiennych niezależnych oraz wybrane elementy charakterystyki statystycznej równań regresji wielokrotnej dla omawianych 7 stacji zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3 – Table 3

Wartości wyrazów wolnych (A) współczynników kierunkowych b i c w równaniu [2] oraz charakterystyka statystyczna równań dla poszczególnych stacji (R – współczynnik korelacji regresji wielokrotnej, adj. $R^2$– współczynnik determinacji, p–- poziom istotności statystycznej równania dla danej stacji)

Values of constant term (A) of the direction coefficients b and c in the formula [2] and statistical characteristics of formulas [2] for given stations (R – correlation coefficient of multiple regression, adj. $R^2$ – determination coefficient, p – level of statistical significance of formula for a given station)

| Stacja – Station | A | b | c | R | adj. $R^2$ | p < |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Jan Mayen | –16.80 | +0.92 | +1.68 | 0.669 | 0.382 | 0.007 |
| Bjornoya | –21.55 | +1,09 | +2,09 | 0.693 | 0.419 | 0.004 |
| Hornsund | –21.67 | +0.96 | +2.57 | 0.685 | 0.407 | 0.005 |
| Svalbard-Lufthavn | –32.87 | +1.55 | +2.79 | 0,686 | 0.409 | 0.005 |
| Ny Alesund | –29.98 | +1.09 | +2.64 | 0.676 | 0.394 | 0.006 |
| Hopen | –37.67 | +1.83 | +3.32 | 0.730 | 0.477 | 0.002 |
| Tromso | – 7.93 | +1.10 | +0.61 | 0.646 | 0.348 | 0.010 |

Obie zmienne, Tw z roku k i Tw z roku k-1, objaśniają łącznie na analizowanych stacjach około 40% obserwowanej w badanym 20.leciu zmienności temperatury średniej rocznej (tab. 3). Oznacza to, że jeden tylko czynnik, jakim jest zasób ciepła w wodach Prądu Norweskiego, opisany przez wartość Tw w gridzie [67,10] determinuje powyżej 1/3 całej zmienności temperatury rocznej na obszarze od Jan Mayen po Hopen i od Tromso po Ny Alesund. Maksimum objaśnienia, zbliżające się do 50%, występuje na

Hopen, czyli stacji, na której dodatni trend rocznej temperatury jest największy (+0.090°C/rok). Wartości współczynników kierunkowych b i c na wszystkich stacjach za wyjątkiem Tromso potwierdzają, że większą rolę w kreowaniu zmienności temperatury średniej rocznej ma człon inercyjny związany z napływem wód atlantyckich – wartość współczynnika c stojącego przed Tw(k-1) jest około 2 razy większa od współczynnika b, stojącego przed Tw(k). Odwrotny układ wartości współczynników b i c na stacji Tromso stanowi najprawdopodobniej rezultat bezpośredniego oddziaływania termicznego przemieszczających się wód już w tym samym roku i osłabiony, z powodu oddalenia, wpływ wód przechodzących przez rejon Tromso w roku poprzednim.

Analiza równania [2] wskazuje, że do dużych wzrostów lub spadków rocznej temperatury powietrza na omawianych stacjach dochodzić będzie w roku k wtedy, gdy wartości Tw w dwu kolejnych latach; zarówno w roku k-1, jak i roku k, będą wyraźnie wyższe lub wyraźnie niższe od średnich. Stąd też występowanie dodatniego trendu w wartości Tw powinno pociągać za sobą względnie systematyczny wzrost temperatury rocznej na stacjach znajdujących się na omawianym obszarze.

W analizowanym okresie 1982–2002 zaznacza się na badanych stacjach dodatni trend temperatury rocznej. Najsilniejszy wzrost temperatury obserwuje się na Hopen (+0.090°C/rok). Średni trend na stacjach Spitsbergenu (Hornsund, Svalbard-Lufthavn i Ny Alesund) wynosi +0.068°C/rok, na Bjornoyi +0.046°C/rok, na Jan Mayen 0.067°C/rok, a w Tromso +0.019°C/rok. Uwzględniając wartości trendu rocznej temperatury powietrza na poszczególnych stacjach omawianego obszaru, można stwierdzić, że w ciągu lat 1983–2002 powinna ona wzrosnąć od 0.92°C na Bjornoyi do 1.80°C na Hopen, w stosunku do temperatury powietrza w roku 1982. Oszacowanie wpływu zmian wartości Tw na wzrost temperatury może zostać jednak dokonane tylko dla stacji Jan Mayen, bowiem w analizowanym okresie tylko na tej stacji trend temperatury rocznej jest istotny statystycznie.

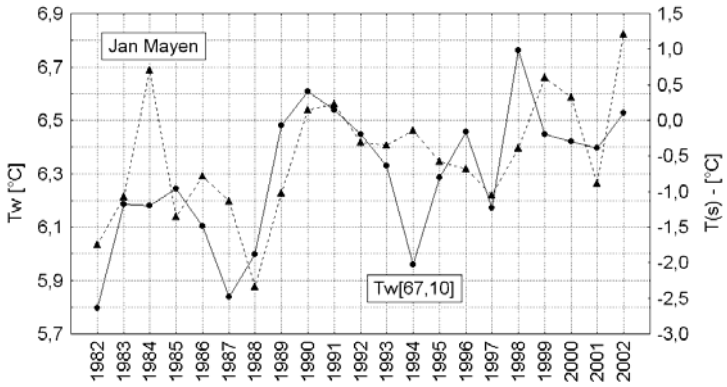
Wartość trendu Tw wynosi +0.023 (±0.008)°C/rok i jest istotna statystycznie ($p < 0.008$). Wartość trendu temperatury rocznej na Jan Mayen jest równa +0.067 (±0,028)°C/rok ($p < 0.026$).

Przyjmując estymowane wartości współczynników kierunkowych regresji wielokrotnej wiążącej temperaturę roczną na Jan Mayen z wartością Tw (patrz tab. 2) równe 0.92 dla roku k oraz 1.68 dla roku k-1, jednakową dla obu lat (k i k-1) wartość trendu Tw równą +0.023 i pomijając wyraz wolny stojący w równaniu [2], otrzyma się wartość rocznego trendu temperatury powietrza na Jan Mayen ($T_{JM}$) warunkowanego przez trend Tw:

$$T_{JM} = ((0.92 \cdot 0.023) + (1.68 \cdot 0.023)) = 0.02116 + 0.03864 = 0{,}0598 \cong 0.060°C/rok,$$

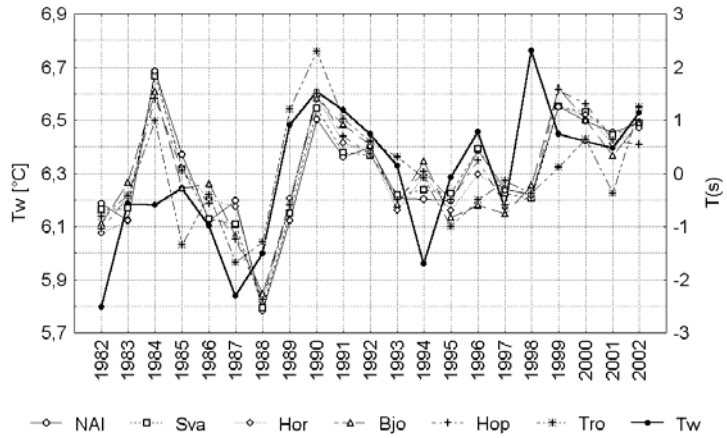
co jest wartością niezwykle bliską oszacowanej wartości trendu temperatury rocznej na tej stacji. Trudno ocenić czy, i na ile, różnica między wartościami trendów wynosząca –0.007°C /rok jest istotna, mieści się ona w granicach dokładności szacunków.

Wynik tej analizy wskazuje, że całe, lub niemal całe, ocieplenie notowane na Jan Mayen w latach 1983–2002 jest zgodne z tym, jakie powinno dać bezpośrednie i pośrednie oddziaływanie wzrostu wartości Tw w tym samym okresie. W dwudziestoleciu 1983–2002, przyjmując oszacowaną wartość trendu temperatury rocznej na Jan Mayen temperatura roczna powinna wzrosnąć o 1.34°C, przyjmując wartość trendu wymuszonego przez wzrost zimowej temperatury wody w gridzie [67°N, 10°E] temperatura roczna winna wzrosnąć o 1.20°C.




Ryc. 2. Przebieg zimowej temperatury powierzchni wody (Tw) w gridzie [67°N, 10°E] i rocznej temperatury powietrza (Ts) na stacji Jan Mayen w latach 1982–2002

Fig. 2. The course of winter sea surface temperature (Tw) in [67N, 10°E] and the annual air temperature (Ts) at the Jan Mayen station in the years 1982–2002




Ryc. 3. Przebieg zimowej temperatury powierzchni wody (Tw) w gridzie [67°N, 10°E] i standaryzowanych odchyleń od średniej rocznej temperatury powietrza (Ts) na stacjach Ny Alesund (Nal), Svalbard-Lufthavn (Sva), Hornsund (Hor), Bjornoya (Bjo), Hopen (Hop) i Tromso (Tro) w latach 1982–2002

Fig. 3. The course of winter sea surface temperature (Tw) in [67N, 10°E] and normalized difference of the annual mean air temperature (Ts) at the Ny Alesund (Nal), Svalbard-Lufthavn (Sva), Hornsund (Hor), Bjornoya (Bjo), Hopen (Hop) and Tromso (Tro) stations in the years 1982–2002

Analiza przebiegów rocznej temperatury powietrza na Jan Mayen i wartości Tw wykazuje daleko posuniętą zgodność (patrz ryc. 2) z charakterystycznymi przesunięciami czasowymi występowania momentów maksimów i minimów rocznej temperatury powietrza w stosunku do przebiegu Tw. W świetle omówionych wcześniej zależności przesunięcia te są zrozumiałe (patrz formuła [2] i tab. 3). Na pozostałych stacjach (Bjornoya, Hornsund, Svalbard-Lufthavn, Ny Alesund i Hopen), na których trend temperatury rocznej jest niewątpliwie dodatni, ale nieistotny statystycznie, charakter przebiegu rocznej temperatury powietrza i wartości Tw jest bardzo podobny (patrz ryc. 3). Pozwala to na sformułowanie tezy, że i na tych stacjach obserwowane ocieplenie ma swoją przyczynę we wzroście wartości Tw.

## 4. Wnioski

Wzrost zasobów ciepła w latach 1982–2002 we wprowadzanych do atlantyckiej Arktyki za pośrednictwem Prądu Norweskiego wodach atlantyckich jest odpowiedzialny za obserwowane tam w tym samym czasie silne ocieplenie. Można uważać, że główną przyczyną obserwowanego wzrostu temperatury rocznej na omawianym obszarze w latach 1982–2002 jest występujący w tym okresie dodatni trend wartości zimowej temperatury wody (Tw).

Kształtowanie się temperatury rocznej pod wpływem Tw z roku poprzedzającego i roku bieżącego wyjaśnia wykrytą przez Kożuchowskiego i Stolarczuk (1994) silną bezwładność temperatury rocznej na Spitsbergenie, która przejawia się w występowaniu istotnych korelacji między temperaturą roczną trzech kolejnych lat.

Przeprowadzona analiza przestrzennego rozkładu współczynników korelacji potwierdza sformułowane przez Kruszewskiego i in. (2003) hipotezy o mechanizmach opóźnionych oddziaływań zmian zasobów ciepła na temperaturę powietrza na tym obszarze. Występujące dodatnie korelacje między zimową temperaturą wody w gridzie [67,10] a temperaturą powietrza w lipcu, sierpniu i wrześniu mają swoją przyczynę w regulowaniu przez zmienne zasoby ciepła w wodach następującej w tych miesiącach cyrkulacji atmosferycznej, dodatnie korelacje w listopadzie i grudniu następnego roku stanowią efekt "dopłynięcia" cieplejszych i silnie zasolonych wód atlantyckich do Arktyki. Te oddziałują na kształtowanie się powierzchni lodów morskich na Morzu Grenlandzkim i Barentsa, przez co wpływ zmiennych zasobów ciepła wnoszonego przez wody na temperaturę powietrza ulega silnemu wzmocnieniu.

**Literatura**


Alekseeev G.V., 1987, Naturnye isledovaniya v Norvežskoj energoaktivnoj zone okeana. [w:] Issledovaniya roli energoaktivnykh zon okeana v kratkoperiodnykh kolebaniyakh klimata. Itogi Nauki i Tekhniki, ser. Atmosfera, okean, kosmos - Programma "Razriezy", tom 8: 233-240.

Comiso J.C., 2003, Warming trends in the Arctic from clear sky satellite observation. Journal of Climate, 16 (21): 3498-3510.

Førland E.J., Hanssen-Bauer I., Nordli P.Ø., 1997, Climate statistics and long term series of temperature and precipitation at Svalbard and Jan Mayen, DNMI – Rapport, 21/97, Norwegian Meteor. Inst., Oslo, 72 pp.

Furevik T. 2001, Annual and interannual variability of Atlantic Water temperatures in the Norwegian and Barents Seas: 1980–1996. Deep-Sea Research I, 48: 383-404.

Hanssen-Bauer I., Førland E.J., 1998, Long-term trends in precipitation and temperature in the Norwegian Arctic: can they be explained by changes in atmospheric circulation patterns? Climate Research, 10: 143-153.

IPCC, 1996: Climate Change 1995: The Science of Climate Change (J. T. Houghton, L. G. Miera Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell, Eds.), Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K., 572 pp.

Karcher M. J., Gerdes R., Kauker F., Köberle C. 2003, Arctic warming: Evolution and spreading of the 1990s warm event in the Nordic seas and the Arctic Ocean. J. Geophys. Res., 108(C2), 3034 doi:10.1029/2001JC001265

Kożuchowski K., Stolarczuk A., 1996, Bezwładność i okresowość zmian temperatury powietrza na Spitsbergenie. Problemy Klimatologii Polarnej, 6: 17-22.

Kruszewski G., Marsz A., Zblewski S., 2003, Wpływ zmian temperatury powierzchni oceanu na Morzu Norweskim na temperaturę powietrza na Svalbardzie i Jan Mayen (1982-2002). Problemy Klimatologii Polarnej, 13: 59-78.

Niedźwiedź T., 1997, Wieloletnia zmienność wskaźników cyrkulacji atmosfery nad Spitsbergenem i ich rola w kształtowaniu temperatury powietrza. Problemy Klimatologii Polarnej, 7: 19-40.

Niedźwiedź T., 2003, Współczesna zmienność cyrkulacji atmosfery, temperatury powietrza i opadów atmosferycznych na Spitsbergenie. Problemy Klimatologii Polarnej, 13: 79-92.

Niedźwiedź T, 2004, Rola cyrkulacji atmosfery w kształtowaniu temperatury powietrza w styczniu na Spitsbergenie. Problemy Klimatologii Polarnej 14: 59-68.

Perry A., Walker J.M., 1982, System ocean – atmosfera. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk: 267 s.

Przybylak R., 1996, Zmienność temperatury powietrza i opadów w Arktyce w okresie oberwacji instrumentalnych. Wydawnictwo UMK, 280 s.

Przybylak R., 2000, Temporal and spatial variation of surface air temperature over the period of instrumental observations in the Arctic, International Journal of Climatology, Vol. 20, No 6 (May 2000): 587-614.

Reynolds, R. W., Rayner N. A., Smith T. M., Stokes D. C., Wang W., 2002, An improved in situ and satellite SST analysis for climate. Journal of. Climate, 15, 1609-1625.

Reynolds R.W., Smith T.M., 1994, Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. Journal of Climate 7, 929-948.

Savčenko V.G., Nagurnyj A.P., 1987, Vozdejstvie teplovykh potokov iz okeana na kolebaniya klimata vysokikh širot. AANII, Gidrometeoizdat, Leningrad: 199 s.

Tuomenvirta H., Alexandersson H., Drebs A., Frich P., Nordli P.Ø., 2000, Trends in Nordic and Arctic temperature extremes and ranges, Journal of Climate, 13, 3: 977-990.

Tuomenvirta H., Drebs A., Forland E., Tveito O.E., Alexandersson H., Laursen E.V., Jonsson T., 2001, Nordklim data set 1.0 – description and illustration. DNMI-Report, 08/01 KLIMA; 27 s.

Ugryumov A.I., 1982, Teplovoj režim okeana i dolgosročnye prognozy pogody. Gidrometeoizdat, Leningrad: 176 s.

Zhang J., Rothrock A. D., Steele M. 1998, Warming of the Arctic Ocean by strenghtened Atlantic inflow: Model results. Geophysical Research Letters, Vol. 25, No. 10: 1745-1748.

## THE INFLUENCE OF CHANGES IN WATER TEMPERATURE IN THE NORWEGIAN CURRENT ON ANNUAL AIR TEMPERATURE IN THE ATLANTIC PART OF THE ARCTIC AND ITS WARMING NOTED OVER THE PAST 20-YEAR PERIOD

### Summary

Kruszewski, Marsz and Zblewski (2003) found out that winter temperature of water in the Norwegian Current indicates quite strong, occurring with a delay, correlations with the air temperature at Spitsbergen, Bjornoya, Hopen and Jan Mayen. Strong and statistically significant correlations between the mean sea surface temperature (SST) in the period January–March in grid 2°x2° [67°N, 10°E] and the monthly temperature of July, August and September with SST are marked the same year (3–5 month delay) and with the air temperature in November and December the following year (18–20 month delay).

Waters of the Norwegian Current transport warm, of higher salinity Atlantic waters. Winter SST of the Atlantic Ocean characterizes the heat resources in the deeper layers of waters. SST in grid [67,10] in an indirect way characterizes heat resources carried with the Atlantic waters into the Norwegian Sea and farther to the Arctic together with the West Spitsbergen and Nordcap currents.

The aim of this work is to describe the influence caused by changes in heat resources transported to the Arctic with the Norwegian Current on the annual temperature of air in the region of Hopen, Spitsbergen and Jan Mayen. The examined period covers the years of 1982–2002 and is marked by great warming in this area.

The analysis of spatial distribution of correlation coefficients justifies Kruszewski and others (2003) hypothesis of mechanism causing the delayed influence of changes in water heat resources on the air temperature in this region The observed positive correlations between winter SST in [67,10] grid and air temperature in July, August and September result in the influence of changing water heat resources on atmospheric circulation noted in these months. Positive correlations in November and December in the following year result from the 'onflow' to the Arctic of warmer and of high salinity Atlantic waters. They have influence on the ice formation on the Greenland and Barents seas thus causing that influence of changing heat resources carried with waters on air temperature is much stronger.

The analysis of regression made it possible to establish the correlation between annual air temperature at a given station (Ts) and winter water temperature (Tw) in [67,10] grid. Annual temperature in a year k is a function of two variables: Tw of the same year as the temperature Ts (Tw(k)) and Tw from the preceding year (Tw(k-1)):

$$Ts(k) = A + b \cdot Tw(k) + c \cdot Tw(k-1)$$

Table 3 contains the values of constant term and regression coefficients as well as statistical characteristics of formulas for the analysed stations. Both variables Tw from the year k and the year k-1 explain about 40% of the changeability in mean annual air temperature of the observed 20-year period at the analysed stations. This means that only one element, i.e. heat resource in the waters of the Norwegian Current, defined with the value Tw, determines more than 1/3 of the whole annual changeability in air temperature in the region located from Jan Mayen up to Hopen and from Tromso up to Ny Alesund. The station for which maximum explanation may be applied (47.7%) is Hopen, the station where the positive trend in annual temperature is the highest (+0.090°C/year). The values of regression coefficients b and c prove that the inertial factor connected with advection of the Atlantic waters has greater role in the changeability in mean annual temperature of air.

The analysis of formula [2] indicates that great increases and decreases in annual temperature at the discussed stations will be observed in a k year if the values of Tw in two following years are significantly higher or lower than the mean ones. That is why the occurrence of positive trend in value of Tw should be followed by relatively systematic increase in annual air temperature at stations located at the described region.

A positive trend in annual air temperature was noted at the analysed stations over the period 1982–2002. At Jan Mayen its value is +0.067 (±0.028)°C/year ($p<0.026$).When taking the estimated values of regression coefficients in the multiple regression connecting the annual temperature at Jan Mayen with the value of Tw (Table 1) and the same value of trend T equal to +0.023 then the value of annual trend in air temperature at Jan Mayen influenced by trend Tw equals 0.0598°C/year. The obtained result indicates that the whole or almost whole warming observed at Jan Mayen in the years 1983–2002 may be explained by direct and indirect influence of the increase in the value of Tw over that period.