

WPŁYW ZMIAN TEMPERATURY WÓD W BRAMIE FARERO-SZETLANDZKIEJ NA TEMPERATURĘ POWIETRZA W ARKTYCE (1950–2005)

THE INFLUENCE OF CHANGES OF THE WATER TEMPERATURE IN THE FAEROE-SHETLAND
CHANNEL ON THE AIR TEMPERATURE IN ARCTIC (1950–2005)

Andrzej A. Marsz¹, Rajmund Przybylak², Anna Styszyńska¹

¹ – Katedra Meteorologii i Oceanografii Nautycznej, Wydział Nawigacyjny, Akademia Morska
ul. Sędzickiego 19, 81–374 Gdynia
aamarsz@am.gdynia.pl, stysa@am.gdynia.pl

² – Zakład Klimatologii, Instytut Geografii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika
ul. Gagarina 9, 87–100 Toruń
rp11@geo.uni.torun.pl

Zarys treści. Praca analizuje związki między wskaźnikiem charakteryzującym zasoby ciepła w wodach atlantyckich wprowadzanych do Prądu Norweskiego, a dalej przez Prąd Zachodniospitsbergeński i Prąd Nordkapski do Arktyki, a roczną temperaturą powietrza w Arktyce. Analizę związków przeprowadzono dla Arktyki jako całości oraz jej sektorów: atlantyckiego, syberyjskiego, pacyficznego kanadyjskiego i sektora Morza Baffina. Wykazano istnienie silnie rozciągniętych w czasie (od 0 do 9 lat opóźnienia) związków z temperaturą powietrza w całej Arktyce, potwierdzających istotny statystycznie wpływ zmian zasobów ciepła w wodach na zmiany temperatury powietrza w Arktyce. Związki regionalne wykazują silne zróżnicowanie – na wzrost zasobów ciepła niemal natychmiastowo reaguje temperatura powietrza w Arktyce Atlantycznej, z 2–6 letnim opóźnieniem temperatura powietrza w Arktyce Kanadyjskiej. Związki z temperaturą powietrza w sektorach syberyjskim i pacyficznym nie przekraczają progu istotności statystycznej. Zmiany temperatury powietrza w sektorze Morza Baffina wyprzedzają w czasie zmiany zasobów ciepła w wodach atlantyckich wprowadzanych następnie do Arktyki. To ostatnie może stanowić przyczynę okresowości w przebiegu temperatury powietrza w niektórych częściach Arktyki i strefy umiarkowanej.

Słowa kluczowe: temperatura powierzchni oceanu, temperatura powietrza, Brama Farero-Szetlandzka, Prąd Norweski, Arktyka.

1. Sformułowanie zagadnienia

Przyczyny zmian temperatury powietrza w Arktyce od wielu lat budzą zarówno duże zainteresowanie wśród badaczy, jak i często gorące spory. Temat ten stał się szczególnie aktualny w ostatnich latach, kiedy zmiany temperatury powietrza w Arktyce służą wielu badaczom jako argument wskazujący na działanie efektu cieplarnianego. Ocieplenie Arktyki jest faktem, jednak przebieg temperatury powietrza w Arktyce cechują w XX wieku duże wahania, wykazujące zgodność ze zmianami koncentracji CO₂ w atmosferze tylko w ciągu ostatniego 20–30. lecia. Pierwsze wielkie ocieplenie Arktyki

rozpoczęło się w latach 20. XX wieku, maksimum osiągnęło w końcu lat 30. i w latach 40. XX wieku. Po tym okresie zaznaczyło się w Arktyce silne ochłodzenie, w którym minimum temperatury powietrza wystąpiło na przełomie lat 60. i 70. Ostatnie ocieplenie Arktyki rozpoczęło się stosunkowo późno i dopiero w ostatnich latach (po 1994 r.) temperatura powietrza w Arktyce uzyskiwała podobne wartości jak w okresie maksimum ocieplenia lat 30–40. XX wieku (Przybylak 2007).

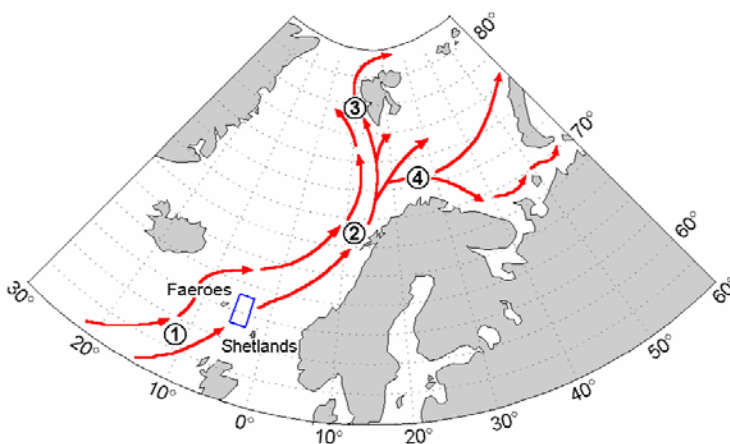
Czy rzeczywiście ocieplenie Arktyki stanowi bezpośredni przejaw działania efektu cieplarnianego? Wielu badaczy wskazuje na inne przyczyny ocieplenia Arktyki lub też współdziałanie różnego rodzaju procesów działających wspólnie z efektem cieplarnianym. Wśród czynników mających wywierać wpływ na zmiany temperatury powietrza w Arktyce wymienia się między innymi wzmożone działanie południkowej cyrkulacji atmosferycznej, wnoszącej do Arktyki zwiększone ilości ciepła oraz wzrost intensywności dostawy ciepła do Arktyki, wraz ze wzrostem transportu wód atlantyckich. Więcej informacji dotyczących zarówno zmian temperatury powietrza w Arktyce w ostatnich dekadach, jak i ewentualnych ich przyczyn (w tym przyczyn znacznego jej wzrostu w połowie lat 90. XX wieku) zawiera publikacja Przybylaka (2007).

Bengtsson i in. (2003), analizując mechanizmy silnego ocieplenia Arktyki w latach 20–30. XX w. główną przyczynę wzrostu temperatury znaleźli w zwiększeniu się częstości wiatrów zachodnich na początku lat 20. XX wieku między Spitsbergenem a Norwegią, które wzmogły transport ciepłych wód do Morza Barentsa. Wymusiło to proces cofania się zasięgu lodów na wschód i północno-wschód. Wzrost powierzchni wód wolnych od lodów wydatnie zwiększył sumaryczny strumień ciepła z oceanu do atmosfery. To z kolei, przyczyniając się do wzrostu cyklogenezy nad tym akwenem, doprowadziło do dalszego wzrostu częstości wiatrów zachodnich. W rezultacie powstał swoisty mechanizm samonapędzający się (dodatnie sprzężenie zwrotne) wzrostu temperatury powietrza. Proces ten, zdaniem cytowanych autorów stanowił przejaw wewnętrznej dynamiki systemu, mieścił się w zakresie naturalnej zmienności systemu klimatycznego i w całości miał przyczyny naturalne. Johannessen i in. (2004) zgadzają się, że ocieplenie Arktyki lat 30. XX wieku miało przyczyny naturalne. W przypadku następnego, współczesnego ocieplenia Arktyki, autorzy ci widzą jednak przeważający wpływ działania czynnika antropogenicznego, jakim jest wzrost koncentracji CO₂ w atmosferze. Styszyńska (2005, 2007), badając przyczyny i mechanizmy prowadzące do występowania ocieplenia Arktyki Atlantyckiej w ostatnim okresie (1982–2002), wykazała, że podstawową przyczyną obserwowanego w tym czasie ocieplenia jest wzrost dostawy ciepła przez wody atlantyckie niesione przez Prąd Norweski. Ocieplenie Arktyki Atlantyckiej, które obserwowano w latach 30–40 XX wieku miało taką samą przyczynę.

Wskaźnikiem charakteryzującym zasoby ciepła w Prądzie Norweskim, przyjętym przez Styszyńską jest średnia temperatura powierzchni oceanu (dalej TPO) z okresu styczeń-kwiecień w Bramie Farero-Szetlandzkiej. Temperatura powierzchni wód w tym okresie¹ informuje pośrednio o zasobach ciepła w wodach atlantyckich, które po przejściu Bramy Farero-Szetlandzkiej zostaną dalej niesione na północ przez Prąd Norweski i następnie przez prądy Zachodniospitsbergeński oraz Nordkapski wprowadzone

¹ Czyli wtedy, kiedy powietrze jest tam chłodniejsze od wody, przez co działają intensywne procesy konwekcji wynoszące do powierzchni wody z głębi. Po okresie zimowym na powierzchni tych wód dochodzi do wzrostu temperatury pod wpływem zwiększającego się dopływu radiacji, przez co TPO nie charakteryzuje zasobów ciepła zawartego w wodach atlantyckich. Na powierzchni wód atlantyckich tworzy się relatywnie cienka wygrzana warstwa wód, oddzielona od wód atlantyckich leżących głębiej termokliną. Temperatura warstwy wód nad termokliną rejestruje przebieg wiosenno-lętnich warunków pogodowych nad oceanem i jej wartość nie zawiera informacji o zasobach ciepła w wodach atlantyckich.

do Arktyki (ryc. 1). W czasie drogi tych wód oraz po ich wprowadzeniu do Arktyki, uruchamiają one dalsze procesy, których sumaryczne działanie prowadzi do szybkiego wzrostu temperatury powietrza.



Ryc. 1. Układ prądów wnoszących ciepło wraz z transportem wód do Arktyki.

1 – Prąd Północnoatlantycki, 2 – Prąd Norweski, 3 – Prąd Zachodniospitsbergeński, 4 – Prąd Nordkapski. Ramką oznaczona powierzchnia, której średnia miesięczna temperatura z okresu styczeń-kwiecień służy do obliczenia wskaźnika FS1-4_{2L} charakteryzującego względne zasoby ciepła w wodach atlantyckich wnoszonych do Prądu Norweskiego (61–63°N, 03–05°W)

Fig. 1. System of currents carrying in heat with the transportation of waters to Arctic.

1 – North Atlantic Current, 2 – Norwegian Current, 3 – West Spitsbergen Current, 4 – Nordcap Current. The area whose monthly average temperature from the period January-April is used to estimate the indicator FS1-4_{2L}, characterizing relative resources of the warmth in Atlantic waters carried in to the Norwegian Current (61–63°N, 03–05°W) has been marked with the frame box

Analiza przeprowadzona przez Styszyńską (2005, 2007) wykazała, że temperatura powierzchni wód z okresu styczeń-kwiecień w Bramie Farero-Szetlandzkiej (dalej oznaczenie FS1-4) istotnie statystycznie koreluje z temperaturą powietrza lipca, sierpnia i września tego samego roku co wartość FS1-4 oraz z temperaturą powietrza w listopadzie i grudniu następnego roku. FS1-4 wykazuje istotne statystycznie związki z polem ciśnienia nad obszarem Półwyspu Skandynawskiego i Arktyki Atlantyckiej w lipcu, sierpniu i wrześniu. Wzrost zasobów ciepła w wodach przepływających przez Bramę Farero-Szetlandzką powoduje takiego rodzaju deformacje pola ciśnienia, które pociągają za sobą wzrost intensywności adwekcji z sektora południowego w lipcu oraz zmniejszenia się zachmurzenia w sierpniu i wrześniu, co stanowi bezpośrednią przyczynę wzrostu temperatury powietrza w tych miesiącach nad obszarem Arktyki Atlantyckiej. Wzrost temperatury powietrza w listopadzie i grudniu następnego roku związany jest bezpośrednio ze wzrostem zasobów ciepła w wodach w rejonie Arktyki Atlantyckiej, co opóźnia tworzenie się zwartej pokrywy lodów morskich. Przedłużeniu ulega przez to okres występowania silnych strumieni ciepła z oceanu do atmosfery, pociągający za sobą wzrost temperatury powietrza w okresie jesieni i początku zimy.

Występowanie takiego rodzaju zależności oznacza, że na roczną temperaturę powietrza w Arktyce Atlantyckiej w roku k wywiera wpływ stan termiczny zimowych wód w Bramie Farero-Szetlandzkiej

z roku k (tego samego) oraz roku $k-1$ (poprzedzającego). Wskaźnik oznaczony symbolem FS1-4_{2L}, będący średnią zimową (I–IV) temperaturą z roku k i $k-1$ objaśnia w 25. leciu 1979–2003 46.7% wariacji rocznej temperatury powietrza na Jan Mayen, 39% na stacji Hopen, 37% na stacji Svalbard-Lufthavn, 34% na stacji Hornsund i 33.5% na Bjornoi. Wszystkie te związki są istotne na poziomie $p < 0.001$.

Napływ ciepłych i silnie zasolonych wód atlantyckich do Arktyki winien również wywierać wpływ na temperaturę powietrza i na innych, niż Arktyka Atlantycka obszarach Arktyki. Wpływ ten, jak można sądzić, nie będzie bezpośrednim i natychmiastowym. Silnie zasolone, ciepłe wody atlantyckie, transportowane na północ przez Prąd Zachodniospitsbergeński, w północnej części Cieśniny Fram oraz na północ od Spitsbergenu zapadają pod mniej zasolone, choć znacznie chłodniejsze, Powierzchniowe Wody Arktyczne (dalej PWA) i tracą kontakt z atmosferą. Bezpośrednie przekazywanie ciepła z tych wód do atmosfery przestaje być możliwe. Wpływające do Arktyki, niesione Prądem Zachodniospitsbergeńskim, wody atlantyckie wywierają wpływ na zasoby ciepła w Arktycznych Wodach Pośrednich (dalej APW). Można przypuszczać, że zasoby ciepła zawarte w APW mogą z opóźnieniem wywierać wpływ, poprzez działanie różnych procesów, na temperaturę powietrza w Arktyce.

Celem tej pracy jest przedstawienie wyników badań podjętych dla sprawdzenia tej hipotezy. Przeprowadzone badania były ukierunkowane na udzielenie odpowiedzi na kilka pytań:

- czy zaznacza się wpływ zmiennych zasobów ciepła wprowadzanych do Arktyki wraz z wodami atlantyckimi na temperaturę powietrza?

- jeśli tak, to jaka jest skala opóźnienia reakcji temperatury powietrza w Arktyce jako całości na zmiany ilości ciepła wnoszone przez Prąd Norweski do Arktyki?

- czy zaznacza się zmienność regionalna reakcji temperatury powietrza na zmieniające się ilości wprowadzanego wraz z wodami atlantyckimi ciepła?

Inne kwestie wiążące się z tymi zagadnieniami, na przykład jakie są rzeczywiste mechanizmy przekazywania ciepła z Arktycznych Wód Pośrednich do atmosfery, nie były podejmowane i czytelnik nie znajdzie na nie tu odpowiedzi.

2. Metody badawcze, materiały źródłowe

Licząc się z występowaniem nieznanej, różnej skali opóźnień między FS1-4_{2L} a temperaturą powietrza w Arktyce, jako zasadniczą metodę badawczą zastosowano korelacje wzajemne. Polegają one na obliczaniu współczynników korelacji liniowej między dwoma szeregami chronologicznymi, przy kolejnym przesuwaniu jednego szeregu (poprzedzający) względem drugiego (opóźniony) o 1 odstęp czasowy w zadanym przedziale czasu.

Do analizy wykorzystano szeregi chronologiczne rocznych wartości temperatury powietrza występującej w Arktyce oraz wskaźnika FS1-4_{2L} rozpoczynające się w roku 1951 i kończące się w roku 2005 (56 lat)². W ten sposób przy zerowym przesunięciu czasowym współczynnik korelacji obliczony jest dla 56 par wartości. Przy kolejnych przesunięciach liczba korelowanych par zmniejsza się o liczbę przesunięć, co czyni, że istotność obliczonych współczynników korelacji zmienia się wraz z każdym przesunięciem. Istotność współczynników korelacji szacowana jest tu standardowo, za pomocą testu t . Korelacje wzajemne obliczono w zakresie od -15 do $+15$ lat, co stanowi, że ostatnie w szeregu korelacje liczone były dla 41 par. Za granicę istotności przyjęto powszechnie stosowany 95% przedział

² Dla wskaźnika FS1-4_{2L} oznacza to, że jego obliczanie rozpoczęło się od roku 1950.

ufności (r większe od 2 standardowych błędów jego estymacji; $p = 0.05$). Wszystkie korelacje przeprowadzono w ten sposób, że wartości FS1-4_{2L} były wartościami poprzedzającymi, wartości temperatury powietrza – opóźnionymi.

Wartość wskaźnika FS1-4_{2L} obliczono, tak jak w pracy Styszyńskiej (2005), jako średnią arytmetyczną z okresu od stycznia do kwietnia TPO, z dwu kolejnych lat³, w gridzie 62°N, 4°W. Wartość temperatury przypisana do tego punktu gridowego stanowi średnią TPO na powierzchni 2°φ x 2°λ ograniczonej współrzędnymi 63–61°N, 5–3°E. Średnie miesięczne TPO zaczerpnięto ze zbioru ERSST v.1⁴. Zbiór ten do roku 1992 oparty jest na zweryfikowanych danych zbioru COADS SST, od roku 1993 również danych satelitarnych, kalibrowanych przez pomiary *in situ* (Smith i Reynolds, 2002). Nie wykorzystano do tego celu danych z nowszej wersji zbioru ERSST (ERSST v.2.; Smith i Reynolds (2004), gdyż na omawianych akwenach daje on nierealnie wysokie wartości temperatury powierzchni oceanu, których na dodatek rytm zmian nie odpowiada rytmowi znanych wahań TPO na tym akwenu⁵. Dla obszaru Bramy Farero-Szetlandzkiej, na wodach której przez cały rok odbywa się ożywiona żegluga dane zawarte w zbiorze ERSST v.1. są wysoce wiarygodne, a błędy, którymi obciążone są dane – bardzo małe – praktycznie pomijalne.

Wybór Bramy Farero-Szetlandzkiej, jako akwenu na którym kontroluje się zmiany TPO, a nie leżących bliżej Arktyki wód Prądu Norweskiego wynika z tego, że Prąd Norweski bez przerwy zmienia swój główny nurt, meandrując i tworząc wiry. Te zaburzenia hydrodynamiczne potoku wody nie pozostają bez wpływu na TPO, wprowadzając dodatkową jej zmienność. Wody atlantyckie przez Bramę Farero-Szetlandzką przepływają głębokowodnym kanałem między wyspami, przez co główny nurt tych wód, mimo różnego rodzaju zaburzeń przepływu, jest „skanalizowany” i w skali powierzchni, na której określa się średnią miesięczną TPO (2x2°), szumy wprowadzane przez procesy hydrodynamiczne są tu wyraźnie mniejsze niż na wodach otwartych.

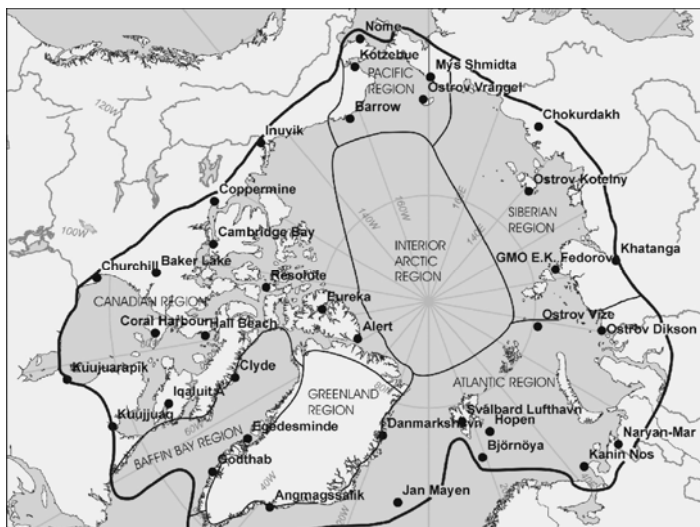
Granice obszaru Arktyki i regionów klimatycznych jest przyjęte według Atlasu Arktyki (Atlas Arktiki, 1985) – ryc. 2. Dane dotyczące temperatury powietrza dla tak zdefiniowanej Arktyki i jej sektorów pochodzą ze zbiorów Przybyłaka (2007). Średnie sezonowe i roczne wartości zostały zgromadzone dla 35 stacji w miarę równomiernie rozmieszczonych na jej obszarze, z wyjątkiem centralnych części Arktyki i Grenlandii, dla których wieloletnie dane nie istnieją (ryc. 2).

Większość danych pochodzi z Instytutów Meteorologicznych poszczególnych państw arktycznych (Danii, Norwegii i Kanady) lub z innych instytutów badawczych: Instytutu Naukowo-Badawczego Arktyki i Antarktyki w St. Petersburgu czy też Narodowego Centrum Danych Klimatycznych w Asheville (USA). Wszystkie serie temperatury powietrza są kompletne i sięgają wstecz co najmniej do 1950 r. (z wyjątkiem stacji Hall Beach, która ma dostępne dane od 1957 r.). Jakość i homogeniczność danych została sprawdzona przez Przybyłaka (1996, 2002). Średnie wartości obszarowe dla poszczególnych regionów klimatycznych i całej Arktyki obliczono stosując zwykle arytmetyczne uśrednianie danych ze stacji.

³ Wartość FS1-4_{2L} datowana na dany rok stanowi średnią z roku poprzedzającego i danego roku (przykładowo FS1-4_{2L} z roku 1970 stanowi średnią TPO z I–IV z roku 1969 i 1970, FS1-4_{2L} z roku 1971, średnią zimowych TPO z lat 1970 i 1971, etc.

⁴ Pełna nazwa zbioru NOAA NCDC ERSST version1: Extended reconstructed global sea surface temperature data based on COADS data.

⁵ Przykładowo, na wodach na W od Spitsbergenu zbiór ERSST v.2 w miesiącach lat, w których występuje tam pokrywa lodowa podaje wartości miesięczne TPO po +2, +3°C

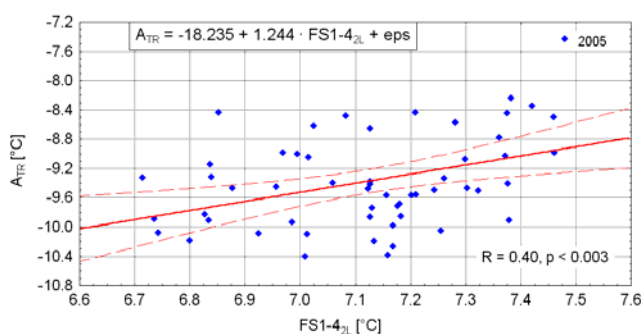


Ryc. 2. Położenie stacji meteorologicznych, z których wykorzystano dane w niniejszej pracy. Granice Arktyki i poszczególnych regionów klimatycznych wg Atlasu Arktiki (1985)

Fig. 2. Location of meteorological stations from which climatic data have been used in the present work. Boundaries of the Arctic and climatic regions after Atlas Arktiki (1985)

3. Wyniki

Wyniki analizy wykazują, że między roczną temperaturą powietrza w całej Arktyce a zasobami ciepła w wodach atlantyckich, charakteryzowanymi przez wartość wskaźnika FS1-4_{2L}, zachodzą synchronicznie niezbyt silne związki dodatnie (ryc. 3). Współczynnik korelacji jest równy 0.4 i istotny statystycznie ($p < 0.003$). Przedstawiony wykres rozrzutu (ryc. 3) objaśnia, że w większym stopniu można tu mówić o występowaniu ogólnej tendencji do synchronicznego wzrostu temperatury powietrza w Arktyce wraz ze wzrostem temperatury wód w Bramie Farero-Szetlandzkiej, niż o związku w rozumieniu bardziej ścisłych zależności.



Ryc. 3. Związek rocznej temperatury powietrza w całej Arktyce (A_{TR}) ze wskaźnikiem FS1-4_{2L} charakteryzującym zasoby ciepła w wodach atlantyckich w Bramie Farero-Szetlandzkiej

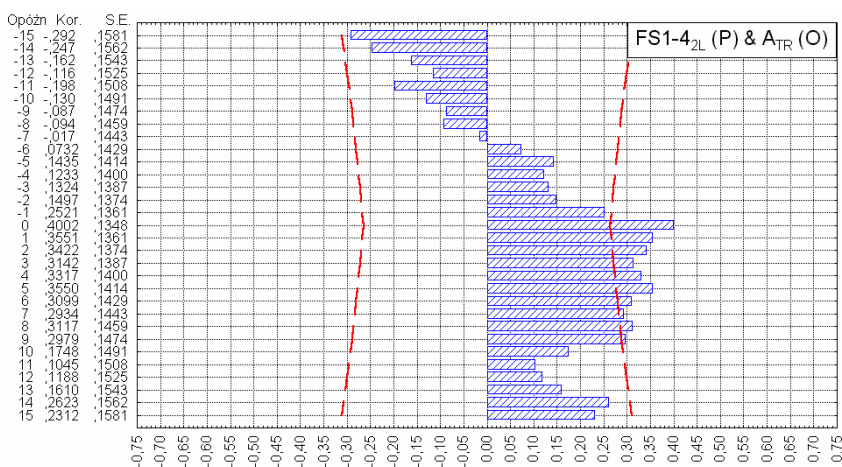
Fig. 3. Correlation between annual air temperature in all Arctic (A_{TR}) and the indicator FS1-4_{2L} with characterizing heat content in Atlantic waters in the Faeroe-Shetland Channel

Analiza korelacji wzajemnych (patrz ryc. 4) wykazuje jednak, że wpływ ten w rzeczywistości nie ogranicza się do związków synchronicznych, lecz zaznacza się przez następne 9 lat, kiedy to występują niezbyt silne, ale istotne statystycznie korelacje. Siła związków nie jest w ciągu tych 9 lat jednokowa, lecz od roku 0 (korelacje synchroniczne), kiedy to korelacje są najsilniejsze, stopniowo słabnie, by w 10 roku i latach następnym utracić istotność. Na tle ogólnego słabnięcia związków wraz z upływem czasu zaznacza się nieznaczne wzmocnienie siły związków w 5 i 8 roku.

Rozkład korelacji wzajemnych wskazuje więc, że wzrost temperatury wód atlantyckich niesionych przez Prąd Norweski do Arktyki pociąga za sobą wzrost temperatury powietrza w Arktyce przez 9 kolejnych, następujących po tym wzroście lat. Tak jak można to było przewidzieć, występują tu znacznie rozciągnięte w czasie opóźnienia reakcji temperatury powietrza na zmiany zasobów ciepła wnoszonych wraz z wodami do Arktyki.

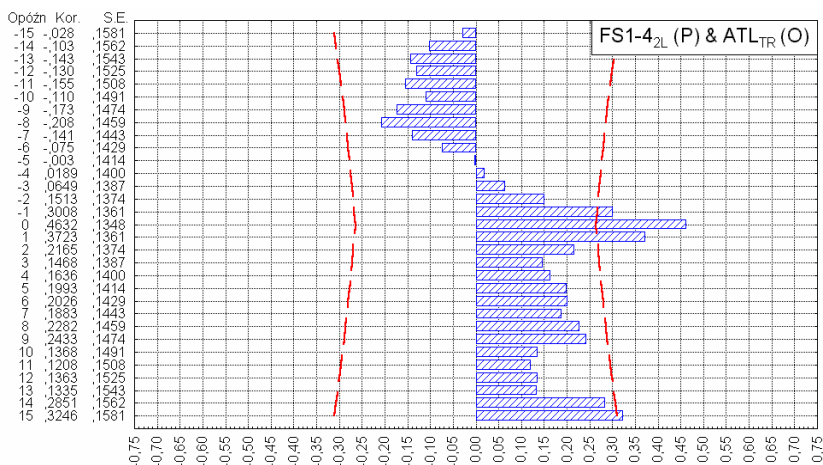
Reakcję temperatury powietrza w poszczególnych sektorach Arktyki na zmiany FS1-4_{2L} badano w ten sam sposób. Analiza zróżnicowania regionalnego wpływu FS1-4_{2L} dała nieoczekiwane wyniki.

W sektorze atlantyckim (patrz ryc. 5), stosunkowo silne i wysoce istotne korelacje temperatury powietrza z FS1-4_{2L} zgrupowane są w wąskim paśmie 3 lat (-1, 0, +1) względem roku, na który datuje się wskaźnik FS1-4_{2L}. Najsilniejsze są związki synchroniczne ($r = 0.46$), następne pod względem siły są związki temperatury powietrza w następnym roku ($r = 0.37$). Występują również istotne statystycznie związki temperatury powietrza z roku poprzedzającego rok, na który datuje się FS1-4_{2L} (-1), te związki są najsłabsze ($r = 0.30$). Ponieważ wskaźnik FS1-4_{2L} jest średnią z dwu lat i datowany jest na drugi rok, w świetle wyników badań Styszyńskiej (2005), która wykazała występowanie związków między FS1-4 a temperaturą powietrza w listopadzie i grudniu następnego roku, stwierdzenie tej, niezbyt silnej, ale istotnej korelacji nie powinno dziwić.



Ryc. 4. Korelacje wzajemne między wskaźnikiem FS1-4_{2L} (P – zmienna poprzedzająca) a roczną temperaturą powietrza w całej Arktyce (A_{TR}; O – zmienna opóźniona). Oznaczone granice istotności ($\pm 2\sigma_n$). S.E. – błąd standardowy, Kor. – współczynnik korelacji

Fig. 4. Cross-correlations between the indicator FS1-4_{2L} (P – first variable) and annual air temperature in all Arctic (A_{TR}; O – lagged variable). Appointed borders of the statistical significance ($\pm 2\sigma_n$). S.E. – standard error, Kor. – coefficient of correlation



Ryc. 5. Korelacje wzajemne między wskaźnikiem FS1-4_{2L} (P – zmienna poprzedzająca) a roczną temperaturą powietrza w sektorze atlantyckim (ATL_{TR}; O – zmienna opóźniona). Oznaczone granice istotności ($\pm 2\sigma_n$). S.E. – błąd standardowy, Kor. – współczynnik korelacji

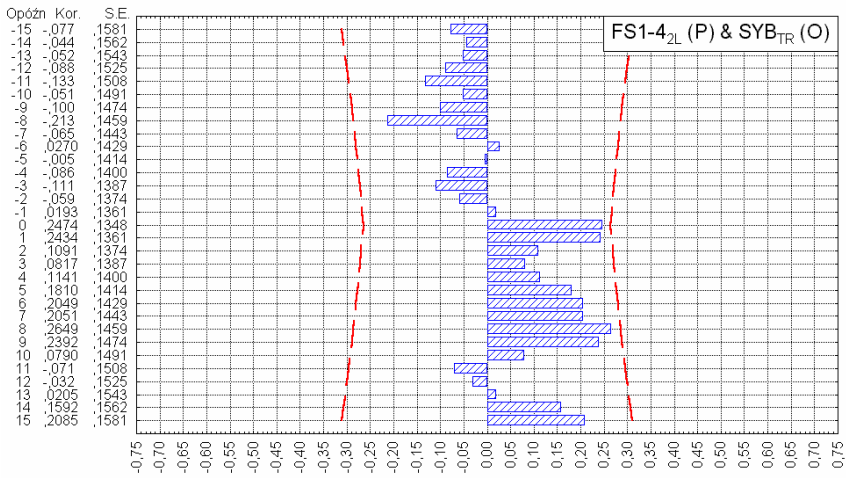
Fig. 5. Cross-correlations between the indicator FS1-4_{2L} (P – variable previous) and annual air temperature in Atlantic region (ATL_{TR}; O – lagged variable). Appointed borders of the statistical significance ($\pm 2\sigma_n$). S.E. – standard error, Kor. – coefficient of correlation

Po roku +1 korelacje FS1-4_{2L} pozostają dodatnie, ale tracą istotność statystyczną. Zauważyć można, że współczynniki korelacji dość wyraźnie wzrastają po 8 i 9 latach, po czym ponownie maleją. Silny wzrost współczynników korelacji obserwuje się w 14 i 15 roku, przy czym w 15 roku współczynnik korelacji wzrasta na tyle ($r = 0.32$), że staje się istotny statystycznie. Tak więc sektor atlantyki Arktyki reaguje na zmiany FS1-4_{2L} bardzo szybko i silnie, co wobec faktu, że wody atlantyckie wprowadzane są właśnie do tego sektora jest całkowicie zrozumiałe.

W sektorze syberyjskim Arktyki korelacje rocznej temperatury powietrza z FS1-4_{2L} są przez 10 kolejnych lat dodatnie, jednak w żadnym roku ich wartości współczynników korelacji nie przekraczają progu istotności statystycznej. Silniejsze korelacje temperatury powietrza z FS1-4_{2L} (patrz ryc. 6) występują w ciągu pierwszych dwu lat (w roku 0 i +1), oraz z 8-letnim opóźnieniem w stosunku do FS1-4_{2L}. Te opóźnione o 8 lat korelacje są silniejsze ($r = 0.27$) od korelacji synchronicznych i opóźnionych o jeden rok.

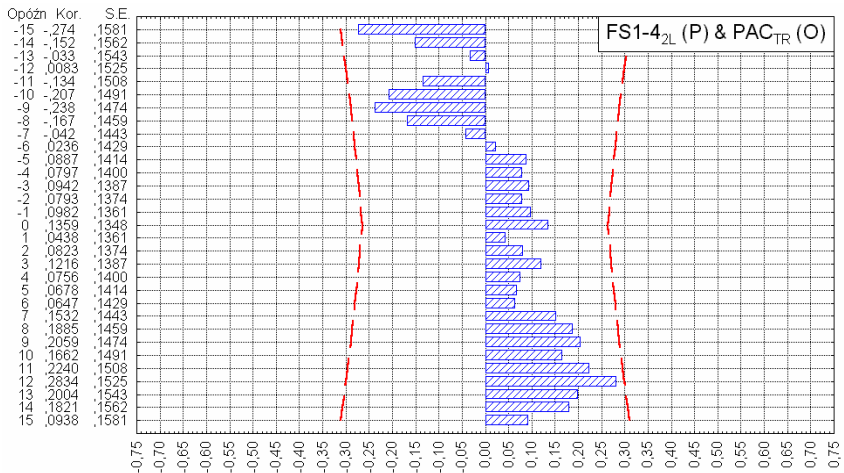
W sektorze pacyficznym (patrz ryc. 7) przez pierwsze 6 lat nie widać żadnej reakcji temperatury powietrza na zmiany FS1-4_{2L}. Wartości współczynników korelacji są na tyle małe, że trudno doszukiwać się tu jakichś związków. Od 7 roku opóźnienia w stosunku do FS1-4_{2L} współczynniki korelacji zaczynają gwałtownie rosnać, osiągając maksimum dla opóźnienia 12 lat ($r = +0.28$), jednak ich wartości nie przekraczają progu istotności statystycznej.

Reakcja temperatury powietrza w kanadyjskim sektorze Arktyki na zmiany FS1-4_{2L} jest odmienna od reakcji sektora pacyficznego. Również i tu nie obserwuje się korelacji synchronicznych, ale pierwsze istotne korelacje pojawiają się już z opóźnieniem 2-letnim i trwają przez kolejne 5 lat, do roku +6. W następnych latach wartości współczynników korelacji względnie równomiernie spadają, by w 12 roku opóźnienia zbliżyć się do zera. Najsilniejsze korelacje temperatury powietrza z FS1-4_{2L} występują z opóźnieniem 4, 5 ($r = 0.34$) i 6 lat (patrz ryc. 8).



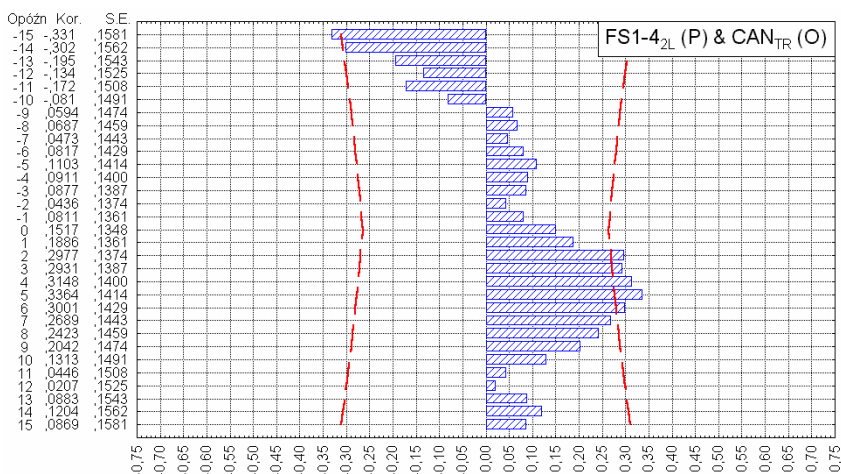
Ryc. 6. Korelacje wzajemne między wskaźnikiem FS1-4_{2L} (P – zmienna poprzedzająca) a roczną temperaturą powietrza w sektorze syberyjskim (SYB_{TR}; O – zmienna opóźniona). Oznaczone granice istotności ($\pm 2\sigma_n$). S.E. – błąd standardowy, Kor. – współczynnik korelacji

Fig. 6. Cross-correlations between the indicator FS1-4_{2L} (P – first variable) and annual air temperature in Siberian region (SYB_{TR}; O – lagged variable). Appointed borders of the statistical significance ($\pm 2\sigma_n$). S.E. – standard error, Kor. – coefficient of correlation



Ryc. 7. Korelacje wzajemne między wskaźnikiem FS1-4_{2L} (P – zmienna poprzedzająca) a roczną temperaturą powietrza w sektorze pacyficznym (PAC_{TR}; O – zmienna opóźniona). Oznaczone granice istotności ($\pm 2\sigma_n$). S.E. – błąd standardowy, Kor. – współczynnik korelacji

Fig. 7. Cross-correlations between the indicator FS1-4_{2L} (P – first variable) and annual air temperature in Pacific region (PAC_{TR}; O – lagged variable). Appointed borders of the statistical significance ($\pm 2\sigma_n$). S.E. – standard error, Kor. – coefficient of correlation



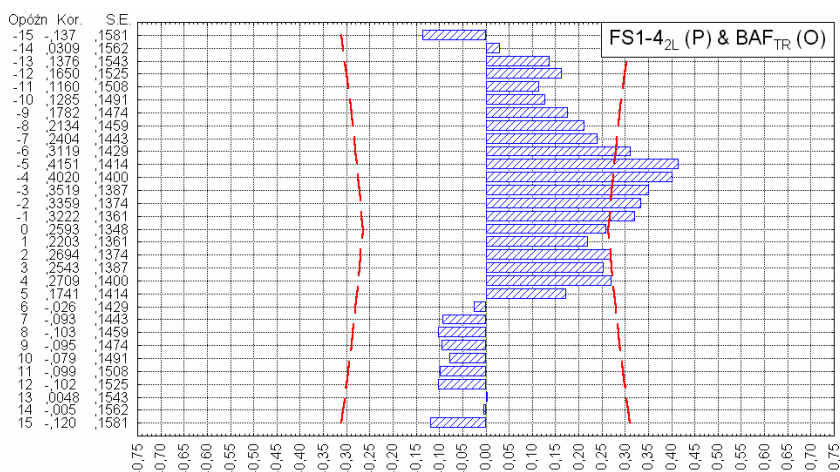
Ryc. 8. Korelacje wzajemne między wskaźnikiem FS1-4_{2L} (P – zmienna poprzedzająca) a roczną temperaturą powietrza w sektorze kanadyjskim (CAN_{TR}; O – zmienna opóźniona). Oznaczone granice istotności ($\pm 2\sigma_n$). S.E. – błąd standardowy, Kor. – współczynnik korelacji

Fig. 8. Cross-correlations between the indicator FS1-4_{2L} (P – first variable) and annual air temperature in Canadian region (CAN_{TR}; O – lagged variable). Appointed borders of the statistical significance ($\pm 2\sigma_n$). S.E. – standard error, Kor. – coefficient of correlation

Rozkład korelacji rocznej temperatury powietrza w sektorze Morza Baffina, silnie pod względem hydrologicznym izolowanym od pozostałych sektorów Arktyki, jest całkowicie odmienny od wszystkich do tej pory analizowanych sektorów – i w pewnym sensie – zaskakujący. Występują tu relatywnie silne i istotne statystycznie korelacje dodatnie między roczną temperaturą powietrza a FS1-4_{2L} (r od +0.31 do +0.42), jednak na tym obszarze zmiany rocznej temperatury powietrza wyprzedzają zmiany temperatury wód atlantyckich w Bramie Farero-Szetlandzkiej od 6 lat do roku. Najsilniejszy związek między FS1-4_{2L} a temperaturą powietrza w sektorze Morza Baffina zaznacza się z opóźnieniem –5 i –4 lat (r odpowiednio 0.42 i 0.40). W momencie dojścia do zależności synchronicznych (rok 0) korelacje stają się nieistotne (patrz ryc. 9). Jeszcze przez 5 kolejnych lat są dodatnie, a w 6 roku opóźnienia zmieniają znak i ich wartości spadają do około –0,10, co pozwala twierdzić, że ustają związki między temperaturą powietrza a FS1-4_{2L}.

Taki obraz wyraźnie sugeruje, że to zmiany temperatury powietrza w sektorze Morza Baffina wywierają wpływ na zasoby ciepła w wodach atlantyckich wprowadzanych następnie przez Bramę Farero-Szetlandzką do Prądu Norweskiego – i dalej przez ten prąd – do Arktyki. Zmiana rocznej temperatury powietrza w sektorze Morza Baffina pociąga za sobą, opóźnioną od 6 lat do jednego roku, zgodną ze znakiem, zmianę zimowej TPO w Bramie-Farero-Szetlandzkiej.

Jeśli tak jest rzeczywiście, to między temperaturą powietrza w sektorze Morza Baffina a temperaturą powietrza w sektorze atlantyckim Arktyki powinny występować przesunięte w czasie związki. Sprawdzenie tej hipotezy wykazuje, że związki takie występują. Roczna temperatura powietrza w Arctyce Atlantyckiej wykazuje opóźnienie (wymienia się wyłącznie związki istotne statystycznie) w stosunku do zmian temperatury w sektorze Morza Baffina o 1 rok ($r = 0.29$), 4 lata ($r = 0.39$) i 5 lat ($r = 0.30$).



Ryc. 9. Korelacje wzajemne między wskaźnikiem FS1-4_{2L} (P – zmienna poprzedzająca) a roczną temperaturą powietrza w sektorze Morza Baffina (BAF_{TR}; O – zmienna opóźniona). Oznaczone granice istotności ($\pm 2\sigma_n$). S.E. – błąd standardowy, Kor. – współczynnik korelacji

Fig. 9. Cross-correlations between the indicator FS1-4_{2L} (P – first variable) and annual air temperature in Baffin Bay region (BAF_{TR}; O – lagged variable). Appointed borders of the statistical significance ($\pm 2\sigma_n$). S.E. – standard error, Kor. – coefficient of correlation

4. Dyskusja wyników i wnioski

Przedstawione rezultaty korelacji wzajemnych wykazują, że występują zależności między zasobami ciepła wnoszonymi wraz z wodami atlantyckimi do Arktyki a roczną temperaturą powietrza w Arktyce. Wykazują one silne zróżnicowanie regionalne. Na obszarze sektorów atlantyckiego, syberyjskiego, pacyficznego i kanadyjskiego, zmiana zasobów ciepła w wodach atlantyckich pociąga za sobą, zgodną z ich znakiem (wzrost, spadek) zmianę temperatury powietrza, choć zarówno skala opóźnień, jak i siła reakcji temperatury powietrza na zmiany FS1-4_{2L} jest w każdym sektorze odmienna. Najsilniej i najszybciej (opóźnienie 0 i 1 rok) reaguje temperatura powietrza w sektorze atlantyckim. W sektorze kanadyjskim temperatura powietrza reaguje również silnie, ale ze znacznie większym opóźnieniem – od 2 do 6 lat. W sektorach syberyjskim i pacyficznym siła reakcji temperatury powietrza na zmiany zasobów ciepła wnoszonych do Arktyki wraz z wodami atlantyckimi jest słaba, poniżej progu istotności statystycznej, a opóźnienia reakcji znacznie wydłużone – od 8 do 12 lat.

Ponieważ średnia roczna temperatura powietrza w Arktyce jako całości stanowi nic innego, jak średnią arytmetyczną temperaturę stacji ze wszystkich sektorów Arktyki, wnoszona przez poszczególne szeregi zmienność kumuluje się. Dzięki temu korelacje między FS1-4_{2L} a temperaturą powietrza Arktyki są silnie rozciągnięte w czasie – opóźnienia wynoszą od 0 do 9 lat. Rozciągnięcie w czasie związków zmniejsza ich amplitudę, przez co związki te dla Arktyki jako całości są niezbyt silne, ale czytelne.

Można więc w sposób uprawniony twierdzić, że wzrost zasobów ciepła w wodach atlantyckich wnoszonych do Arktyki pociąga za sobą opóźniony i silnie rozciągnięty w czasie wzrost temperatury powietrza, spadek zasobów ciepła – spadek temperatury powietrza. Wyraźne wzrosty temperatury powietrza w Arktyce, zachodzące jako rezultat zmian zasobów ciepła we wprowadzanych do Arktyki

wodach zachodzić będą wtedy, kiedy przez kilka kolejnych lat wartość FS1-4_{2L} będzie wyraźnie wyższa od ich normy klimatycznej. Nastąpi wtedy kumulacja jednoimiennych odchyłeń, stopniowo rozprzestrzeniających się na powierzchni całej Arktyki. Taki przebieg wpływu FS1-4_{2L} na kształtowanie temperatury powietrza w Arktyce powoduje, że w przebiegach rocznych obu wartości nie zauważa się zgodności.

Doszukując się przyczyn, które powodują, że w sektorach atlantyckim i kanadyjskim związki między FS1-4_{2L} są istotne statystycznie, natomiast w sektorach syberyjskim i pacyficznym – nie, zwrócono uwagę na warunki fizyczno-geograficzne tych sektorów. To, co łączy sektory atlantycki i kanadyjski, to duże głębokości akwenów przylegających do lądów oraz brak większych rzek uchodzących do oceanu. Odwrotna jest sytuacja w sektorach syberyjskim i pacyficznym – rozciągają się tam przed linią brzegową obszerne szelfy, a do oceanu uchodzą liczne rzeki. Wysłodzenie wód powierzchniowych i utrudniona wymiana pionowa wód sprzyja na akwenach szelfowych formowaniu się warstwy PWA (Powierzchniowych Wód Arktycznych), która izoluje, zawierające zasoby ciepła, Arktyczne Wody Pośrednie od powierzchni morza i wywiera wpływ na reżim lodowy. Przypuszczalnie ten zespół czynników hydrologicznych jest odpowiedzialny za odmienne warunki przekazu ciepła z oceanu do atmosfery w sektorze atlantyckim i kanadyjskim, od tych jakie występują w sektorze syberyjskim i pacyficznym, co odbija się na odmiennej reakcji rocznej temperatury powietrza.

Najprawdopodobniej na kształtowanie zróżnicowania czasu opóźnień ma wpływ niejednocześnie następujący wzrost zasobów ciepła w masie Arktycznych Wód Pośrednich (AWP). Polyakov i in. (2004) udostępnili szereg rocznych anomalii temperatury AWP z okresu 1946–2002. Korelacje synchroniczne między wartościami anomalii temperatury AWP a FS1-4_{2L} są bliskie zera (0.02). Jednak, kiedy bada się korelacje wzajemne okazuje się, że między FS1-4_{2L} (zmienna poprzedzająca) a anomaliami AWP (opóźniona) występują istotne statystycznie korelacje w przedziale od 3 do 6 lat⁶, z maksimum +0.38 i +0.40 odpowiednio w 4 i 5 roku. Oznacza to, że rozprzestrzenianie się w AWP ciepłych wód atlantyckich, doprowadzające do wzrostu temperatury AWP na większych powierzchniach, trwa nie mniej niż 4-5 lat. Jednak jak dochodzi do przekazania ciepła z AWP do atmosfery i w jaki sposób wahania zasobów ciepła w AWP wpływać mogą na roczną temperaturę powietrza, jest niejasne.

Całkowita odmienność relacji między temperaturą powietrza w sektorze Morza Baffina a FS1-4_{2L} jest zrozumiała. Wody atlantyckie nie trafiają do akwenów należących do tego sektora, nie ma więc żadnych powodów, dla których miałyby wywierać tam regulacyjny wpływ na temperaturę powietrza. Stwierdzona odwrotna zależność – opóźniony wpływ temperatury powietrza w sektorze Morza Baffina na zasoby ciepła w wodach atlantyckich można wyjaśnić przez związki temperatury powietrza w tym sektorze z aktywnością Prądu Labradorskiego (Sukhovej 1977, Marsz 1997). W okresach wzrostu częstości wiatrów z sektora od N od NW nad tym obszarem dochodzi jednocześnie do silnych spadków temperatury powietrza i aktywizacji Prądu Labradorskiego. W takich sytuacjach Prąd Labradorski wynosi daleko na południe, oprócz zwiększonej masy lodów morskich i gór lodowych, wielkie masy silnie wychłodzonych i wysłodzonych wód. Wody te, ekspandujące na S, w rejonie delty Gofsztrumu, spychają ciepłe wody tropikalne na południe, ograniczając przepływy w północnej gałęzi prądowej delty (Baryševskaya 1983, Baryševskaya i Šubenko 1983, Styszyńska 2005). A to właśnie są wody, które następnie przenoszone przez Prąd Północnoatlantycki, trafiają do Bramy Farero-Szetlandzkiej

⁶ Czyli zmiany anomalii AWP zaznaczają się z opóźnieniem od 3 do 6 lat względem zmian FS1-4_{2L}.

(Baryševskaya 1979). W ten sposób, po okresie spadku temperatury powietrza w sektorze Morza Baffina, dochodzi, z pewnym opóźnieniem, do zmniejszenia się zasobów ciepła w wodach atlantyckich w prądach Norweskim, Zachodniospitsbergeńskim i Nordkapskim. Okresy wzrostu temperatury powietrza na obszarze sektora Morza Baffina związane są z osłabieniem częstości wiatrów (cyrkulacji) z północy, wzrostu częstości napływu mas powietrza z innych kierunków, przez co towarzyszy im zmniejszenie aktywności Prądu Labradorского, ze wszystkimi tego dalszymi skutkami.

Zwiększone wyrzuty wychłodzonych wód Prądu Labradorского na południe generują na powierzchni zachodniej i środkowej części Atlantyku Północnego rozległe i bardzo trwale ujemne anomalie TPO. Anomalie te wywierają następnie wpływ na charakter cyrkulacji atmosferycznej. Silne ochłodzenie zachodniej i środkowej części Atlantyku Północnego w szerokościach 50-ych zwiększa południkowe gradienty temperatury w strefie 55–35°N i jest przyczyną wystąpienia w czasie nadchodzącej zimy wzrostu natężenia cyrkulacji strefowej, przez co bezpośrednio wiąże się z wartością zimowego wskaźnika NAO (Marsz 2001).

Ponieważ temperatura powietrza (i charakter cyrkulacji atmosferycznej prowadzącej do zmian rocznej temperatury powietrza) w sektorze Morza Baffina jest istotnie powiązana z temperaturą powietrza (i cyrkulacją atmosferyczną) w sektorze kanadyjskim, z kolei temperatura powietrza w sektorze kanadyjskim jest uwarunkowana, z 4–5-letnim opóźnieniem, przez zmiany zasobów ciepła w wodach atlantyckich, a zmiany rocznej temperatury powietrza w sektorze Morza Baffina wywierają wpływ na zasoby ciepła w wodach atlantyckich wprowadzanych następnie do Arktyki, powstaje wielka pętla wzajemnie uwarunkowanych procesów-sprzężeń. Przebiegi procesów w tej pętli wpływają, z odpowiednimi, nieznanymi w tej chwili opóźnieniami, same na siebie. Takie układy (systemy) zdolne są do generowania przebiegów okresowych i quasi-okresowych. Uwzględniając skale opóźnień, okresowości takie powinny zaznaczać się w Arktyce raczej jako długookresowe, w szerokościach umiarkowanych jako okresowości dekadowe lub nieco krótsze od dekadowych. Kwestia generowania okresowości przez wzajemnie sprzęgnięte procesy związane z automodulacją strumienia ciepła wnoszonego wraz z wodami atlantyckimi do Arktyki wydaje się być ważna dla zrozumienia mechanizmów zmian klimatu i wymaga dalszych badań.

Literatura

- Atlas Arktiki, 1985, (red.) Treshnikov A.F., Glavnoe Upravlene Geodezji i Kartografii, Moskva: 204 s.
- Baryševskaya G.I., 1979, Raspredelenie vod Golfstrima po akvatorii Severnoj Atlantiki. Trudy GOI, 146: 14–22.
- Baryševskaya G.I., 1983, Transformaciya vod Golfstrima v rajone ego razdeleniya. Trudy GOI, 164: 30–36.
- Baryševskaya G.I., Šubenko A.P., 1983, Nekotorye rezultaty issledovaniya cirkulacii v delte Golfstrima. Trudy GOI, 164: 37–44.
- Bengtsson L., Semenov V.A., Johannessen O., 2003, The early century warming in the Arctic – a possible mechanism. Report No. 345. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg: 3–31 [również: pod tym samym tytułem: 2004; Journal of Climate, vol. 17 (20): 4045–4057].
- Johannessen O.M., Bengtsson L., Miles M. W., Kuzmina S.I., Semenov V.A., Alekseev G.V., Nagurnyi A.P., Zakharov V.F., Bobylev L.P., Pettersson L.H., Hasselmann K., Cattle H.P., 2004, Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea-ice variability Tellus, 56A (4): 328–341.
- Marsz A., 1997, Współdziaływanie klimatyczne między strefą tropikalną a północną częścią strefy umiarkowanej, strefą subarktyczną i arktyczną wzdłuż brzegów zachodniej części północnego Atlantyku. Problemy Klimatologii Polarnej, 7: 167–234.

- Marsz A., 2001, Rozkład anomalii temperatury na powierzchni Północnego Atlantyku a wartości zimowego wskaźnika Oscylacji Północnego Atlantyku – problem prognozy wartości wskaźnika. *Prace Wydziału Nawigacyjnego WSM w Gdyni*, 12: 161–217.
- Polyakov I.V., Alekseev G.V., Timokhov L.A., Bhatt U.S., Colony R.L., Simmons H.L., Walsh D., Walsh J.E., Zakharov V.F., 2004, Variability of the intermediate Atlantic water of the Arctic Ocean over the last 100 years. *Journal of Climate*, 17 (23): 4485–4497.
- Przybylak R., 1996, Zmienność temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w okresie obserwacji instrumentalnych w Arktyce, Wydawnictwo Uniwersytetu M. Kopernika, Toruń: 280 s.
- Przybylak R., 2002, Variability of air temperature and atmospheric precipitation in the Arctic, *Atmospheric and Oceanographic Sciences Library*, 25, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London: 330 s.
- Przybylak R., 2007, Recent air-temperature changes in the Arctic. *Annals of Glaciology*, 46: 316–324.
- Smith T.M., Reynolds R.W., 2002, Extended reconstruction of global seas surface temperatures based on COADS data 1854–1997. *Journal of Climate*, 16: 1495–1510.
- Smith T.M., Reynolds R.W., 2004, Improved Extended Reconstruction of SST (1854–1997). *Journal of Climate*, 17: 2466–2477.
- Styszyńska A., 2005, Przyczyny i mechanizmy współczesnego (1982-2002) ocieplenia atlantyckiej Arktyki. *Wyd. AM Gdynia*: 109 s.
- Styszyńska A., 2007, Zmiany klimatyczne w Arktyce a procesy oceaniczne. [w:] A. Styszyńska i A. Marsz (red.): *Zmiany klimatyczne w Arktyce i Antarktyce w ostatnim pięćdziesięcioleciu XX wieku i ich implikacje środowiskowe*. Wydawnictwo Uczelniane Akademii Morskiej, Gdynia: 111–144.
- Sukhovej V.F., 1977, Izmenčivost gidrologičeskikh uslovij Atlantičeskogo okeana. *Naukova Dumka*, Kiev: 215 s.

Summary

Styszyńska (2005, 2007) has shown the existence of clear statistical relationships between heat contents in the waters of the Atlantic flowing towards the Arctic via the Norwegian, West Spitsbergen, and North Cape currents and the air temperature in Spitsbergen, Jan Mayen and Hopen between the years 1982 and 2002. These relationships extend in time: following rises in the heat content of the waters of the Norwegian Current, an increase in air temperature follows in the same year and the following year. Heat contents in the Atlantic waters flowing towards the Arctic are assessed according to the average sea surface temperature (SST) in the Faeroe-Shetland Channel (grid 62°N, 004°W) from January to April. These values are used to calculate a determining indicator such as FS1-4_{2L}, established as the average of two successive years: data from one year (k) and the year preceding it (k-1). The aim of this work is to investigate whether there are relationships between FS1-4_{2L} and the air temperature in both the whole of the Arctic and in individual Arctic sectors and, if so, what the character of these relationships is.

The data analysed were a set of yearly air temperatures for the whole of the Arctic and for particular Arctic sectors (fig. 2) according to Przybylak (2007), as well as a set of monthly SST values including values calculated for the FS1-4_{2L} indicator (NOAA NCDC ERSST v.1; Smith and Reynolds, 2002). The primary methodology employed was Cross-Correlation Function Analysis. The FS1-4_{2L} was established as a first value, with the yearly air temperature used as a lagged value. The analysis was carried out for a 55-year period, from 1951 to 2005.

The analysis showed that, taken as a whole, relationships between heat contents leading to the Arctic and air temperature over the whole of the Arctic (calculated from averages of individual sectors) were not particularly significant, though there was marked significance in these relationships from year 0 (fig. 3) to year +9 (fig. 4). The strongest relationships were those from the same year for which the FS1-4_{2L} was dated, after which relationships grew gradually weaker, until they finally disappeared in the tenth year. In the Atlantic sector of the Arctic the relationship was strong and almost immediate (fig 5). In the Siberian (fig. 6) and Pacific (fig. 7) sectors there was an absence of statistically significant relationships, and any that did exist were weak, with varying degrees of 'echo' in air temperature reactions. Air temperature in the Canadian sector (fig. 8) reacted to increases in heat contents with a delay of 2 to 6 years, with the strongest relations from FS1-4_{2L} being noted with a 5-year delay. The situation in Baffin Bay was entirely different, with air temperature changes preceding changes in the heat contents of the waters of the Faeroe-Shetland Channel by 1 to 6 years. The maximum strengths of these relations were -5 and -4 per year (fig. 9).

Analysis of the reasons for these regional variations in the influence of FS1-4_{2L} on air temperature allows us to conclude that a major role is played by the bathymetry of the Arctic Ocean. Atlantic waters sinking beneath Arctic Surface Water (ASW) contribute to changes in the temperature of Arctic Intermediate Water (AIW). Independent of the routes taken by the processes, the influence of AIW on the air temperatures in the Siberian and Pacific sectors is limited, with these sectors being isolated by wide shelves from the Arctic Ocean. In the Canadian sector, which is separated by narrow shelves from deep-water parts of the Arctic Ocean and is situated a relatively short distance from the Atlantic sector, the influence of heat contents on the ASW is apparent, with a certain delay.

Changes in the air temperature of the Baffin Bay sector are related to the variable activity of the Labrador Current, bringing cold waters to the North from the Gulf Stream delta. The force of strong cooling waters from the Labrador Current, with the appropriate delay, result in a lessening of the heat contents in the Faroe-Shetland Channel. Because of the fact that there is a strong positive correlation between the yearly air temperatures of the Canadian and Baffin Bay sectors, a chain of dependencies emerges: air temperature in the American sectors of the Arctic → the flow of Atlantic waters → FS1-4_{2L} → air temperature in the Atlantic Arctic sector → air temperature in the Canadian sector should generate quasi-periodic (> 10 years) air temperature courses.