

WPLYW CYRKULACJI ATMOSFERYCZNEJ NA ZMIANY POKRYWY LODOWEJ NA MORZU CZUKOCKIM (1982-2008)

THE INFLUENCE OF ATMOSPHERIC CIRCULATION ON THE SEA ICE COVER CHANGES IN THE CHUKCHI SEA (1982-2008)

Sławomir Zblewski

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

Zarys treści. Praca omawia wpływ cyrkulacji atmosferycznej (charakteryzowanej przez różnice wartości ciśnienia atmosferycznego między rejonem Morza Beauforta a rejonem tajmyrskim) na zmiany zawartości lodu morskiego i minimalnych zasięgów pokrywy lodowej w rejonie Morza Czukockiego. Stwierdzono występowanie ujemnych i istotnych statystycznie miesięcznych i rocznych trendów zawartości lodu morskiego w środkowej części badanego obszaru oraz silny i nierównomiernie rozłożony w przestrzeni spadek zawartości lodów. Odnotowano istotne zmiany (zwłaszcza po roku 2001) w minimalnych zasięgach pokrywy lodowej. W badanym okresie 1982-2008 pomiędzy cyrkulacją atmosferyczną a zawartością i zasięgami lodów morskich dominują związki asynchroniczne. Na obserwowaną zmienność miesięcznych i rocznych zawartości lodów morskich i minimalnych zasięgów pokrywy lodowej najsilniejszy wpływ ma charakter cyrkulacji atmosferycznej występującej w okresie marzec-sierpień i marzec-wrzesień.

Słowa kluczowe: M. Czukockie, zawartość lodu, minimalny zasięg pokrywy lodowej, cyrkulacja atmosferyczna.

1. Wstęp

W pokrywie lodowej Arktyki dominującą rolę odgrywają lody morskie stanowiące ponad 99% masy lodów na morzach Arktyki. Pokrywa lodów morskich wykazuje dużą zmienność sezonową, międzyroczną i międzydekadową. W ciągu ostatnich kilkunastu lat, w Arktyce zaznaczyło się gwałtowne zmniejszanie się powierzchni i grubości lodów morskich oraz zmiany ich struktury wiekowej (Parkinson i in. 1999, Rothrock i in. 1999, Shirasawa i in. 2008, Richter-Menge i in. 2008). We wrześniu 2007 r. minimalna powierzchnia lodów osiągnęła najmniejsze rozmiary od początku pomiarów satelitarnych i zmniejszyła się o około 50% w stosunku do średniej z lat 1979-1998. Według badań modelowych obecny proces redukcji pokrywy lodowej w Arktyce wskazuje, że zanik lodów arktycznych nastąpi w ciągu najbliższych kilkunastu lat.

Szczególnie nagle i duże zmiany letnich zasięgów lodów, widoczne od roku 2002, wystąpiły na obszarach przypacyficznych Arktyki – morzach Beauforta, Czukockim i Wschodniosyberyjskim. Po

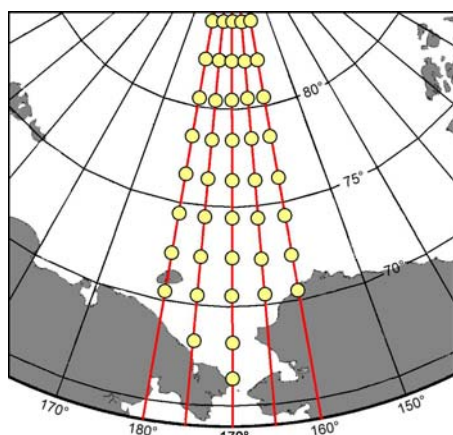
roku 2001 rozpoczęło się też wyraźne zmniejszanie się pokrywy lodowej w marcu, czyli w czasie największego rozwoju powierzchni lodów (Comiso 2002, 2006; Nghiem i in. 2007).

Zmiany pokrywy lodowej traktowane są przez wielu badaczy jako prosty skutek globalnego ocieplenia. Przyjmują oni, że zmiana bilansu radiacyjnego spowodowana wzrostem zawartości CO₂ w atmosferze generuje wzrost temperatury powietrza, która przyspiesza topnienie lodów. W rezultacie akumulacja ciepła słonecznego w wodach jest wydłużona, wzrasta w nich zasób ciepła, co opóźnia tworzenie się lodów. Jednak oprócz czynników radiacyjno-termicznych na kształtowanie się zmian pokrywy lodów morskich wywierają również wpływ czynniki dynamiczne, zwłaszcza dryf lodów wymuszony przez charakter cyrkulacji atmosferycznej.

W ostatnich kilku latach największe zmiany pokrywy lodowej w Arktyce obserwuje się w rejonie Morza Czukockiego. Prezentowana praca przedstawia wyniki analiz, których celem było oszacowanie wpływu cyrkulacji atmosferycznej na zmiany pokrywy lodowej w rejonie Morza Czukockiego w okresie 1982-2008.

2. Źródła danych i metody badawcze

W badaniach posłużono się jednorodnymi ciągami danych charakteryzujących koncentrację (zwartość) lodu morskiego pochodzącymi ze zbioru NOAA NCEP EMC CMB GLOBAL Reyn_Smith OI v2 monthly sea ice (Reynolds i in. 2002). Zbiór ten zawiera średnie miesięczne wartości koncentracji lodów morskich w polach $1^\circ\varphi \times 1^\circ\lambda$, i ma organizację gridową. Dane w zbiorze pochodzą z przetworzenia obserwacji satelitarnych. Do badań wybrano 43 gridy położone na południkach przechodzących przez Morze Czukockie i jego najbliższe otoczenie (ryc. 1). Interpolując wartości zwartości lodu morskiego pomiędzy wybranymi gridami na danym południku, wyznaczono szerokość geograficzną, na której w danym miesiącu znajdował się skraj lodów. Przyjęto, że zwartość lodu w danym gridzie mniejsza od 15% oznacza wody wolne od lodu. Dalej w tekście szerokość geograficzną skraju lodów oznacza się skrótem MZPL (minimalny zasięg pokrywy lodowej).



Ryc. 1. Obszar badań i punkty gridowe wybrane do analizy

Fig. 1. Location of chosen grid points on the study area

Jako wskaźnik charakteryzujący cyrkulację atmosferyczną wykorzystano miesięczne różnice ciśnienia atmosferycznego na poziomie morza między rejonem Morza Beauforta a rejonem tajmyrskim

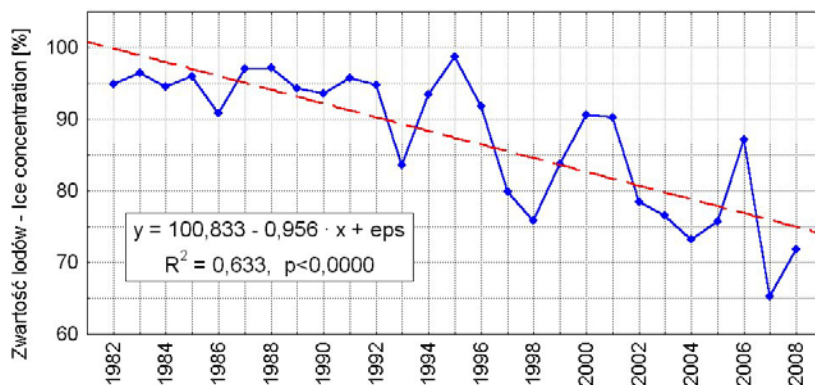
(patrz Marsz 2008) będące miarą tak zwanego "zmodyfikowanego Dipola Arktycznego". Wartość tą dalej oznacza się jako zDA. Im większa wartość zDA, tym na Morzu Czukockim jest większy udział wiatrów z sektora południowego, a w strefie działania Prądu Transarktycznego szybszy dryf lodów w kierunku Cieśniny Frama.

3. Wyniki

3.1. Trendy zwartości lodów morskich

Chronologiczne ciągi średnich miesięcznych wartości zwartości lodów morskich w wybranych gridach poddano analizie trendów. Wykazała ona, że od czerwca do października niemal na całym obszarze między 68 a 79°N, a na jego częściach również w listopadzie i grudniu, występują statystycznie istotne, ujemne trendy koncentracji lodów (wyjątek stanowi najdalej na południe położony grid o współrzędnych [66,5°N, 169,5°W]). Najwyższe wartości trendów zaznaczają się od sierpnia do października (-3,7%/rok w gridzie [74,5°N, 164,5°W] we wrześniu i -3,14%/rok w gridzie [74,5°N, 169,5°W] w październiku, co w całym badanym okresie 1982-2008 daje spadek zwartości lodów morskich o 100 i 85% odpowiednio). W części północnej badanego obszaru słabe i istotne statystycznie trendy pojawiają się jedynie w maju (-0,08%/rok w gridzie [82,5°N, 174,5°W]). Dodatkowo, istotne statystycznie i słabe trendy zwartości lodów występują jedynie w południowej części M. Czukockiego pod koniec zimy +0,21%/rok w gridzie [70,5°N, 164,5°W] w lutym i +0,10%/rok w gridzie [68,5°N, 169,5°W] w marcu, co daje wzrost zwartości w okresie największego rozwoju lodów o 5,7 i 2,7% odpowiednio.

Analizie trendów poddano również średnie roczne wartości zwartości lodów morskich. Wykazała ona, że w prawie wszystkich badanych gridach pojawiają się ujemne i istotne statystycznie trendy średniej rocznej zwartości. Wyjątek stanowią gridy położone najdalej na południu i północy (poniżej 68°N i powyżej 79°N), w których wartości trendów również są ujemne, ale nieistotne statystycznie. Najwyższe wartości trendów zaznaczają się w środkowej części badanego obszaru: -0,96%/rok w gridzie [74,5°N, 164,5°W] i -0,93%/rok w gridzie [74,5°N, 169,5°W], co w całym badanym okresie 27 lat daje spadek rocznej zwartości o 26 i 25% odpowiednio (ryc. 2).



Ryc. 2. Roczna zwartość lodów w gridzie [74,5°N, 164,5°W] w latach 1982-2008

Fig. 2. Annual ice concentration [%] at grid [74.5°N, 164.5°W] in period 1982-2008

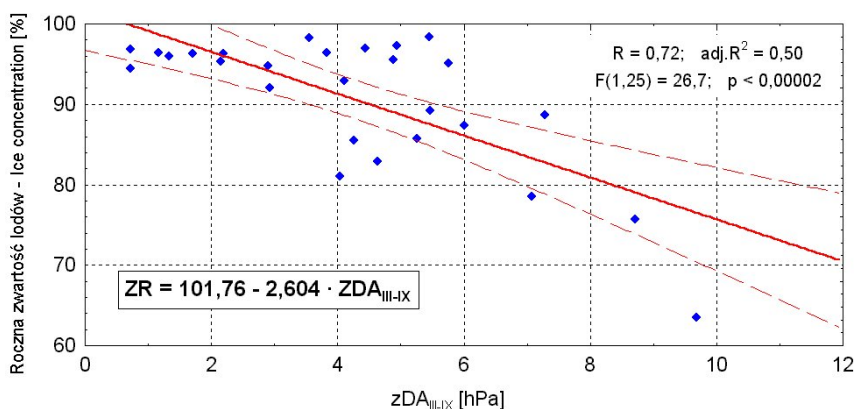
Badania wykazały, że wraz ze spadkiem zawartości i redukcji lodów morskich w rejonie Morza Czukockiego uległ wydłużeniu okres, w którym wody wolne są od lodu. Uwidoczniło się to zwłaszcza w częściach zachodniej i wschodniej badanego akwenu, gdzie okres ten wydłużył się o około 2-3 miesiące. Takie same wyniki w rejonie Morza Czukockiego uzyskał Rodrigues (2008) dla okresu 1979-2007. Jednocześnie dzięki temu, że wody są dłużej wolne od lodu, wydłużył się także okres radiacyjnego nagrzewania powierzchni morza.

3.2. Związki zawartości lodu morskiego z cyrkulacją atmosferyczną

Analiza korelacji pokazała, że między miesięcznymi wartościami zmodyfikowanego Dipola Arktycznego (różnic ciśnienia atmosferycznego między rejonami Morza Beauforta i tajmyrskim) a zawartością lodu morskiego na Morzu Czukockim zachodzą słabe związki synchroniczne polegające na jednoczesnych zmianach zDA i zawartości o tych samych znakach. Istotne statystycznie korelacje zaznaczają się tylko w środkowej części badanego obszaru i występują jedynie w sierpniu. Przykładem może być związek pomiędzy zDA a zawartością lodu morskiego w gridzie [78,5°N, 169,5°W], gdzie pojawia się najwyższy współczynnik korelacji $r = -0,50$. Zmienność zDA objaśnia 22% obserwowanej zmienności zawartości lodu morskiego w sierpniu w tym gridzie.

Wykazano też, że istnieją również związki asynchroniczne między zmiennością zDA a zawartością lodu. Związki te są silne i wysoce istotne statystycznie dla dłuższych okresów uśredniania wartości zDA. Najsilniejsze związki zaznaczają się w środkowej części badanego obszaru (między 74 a 79°N), gdzie największy wpływ na zmiany zawartości lodu od sierpnia do listopada ma zDA uśredniona dla okresu marzec-wrzesień. Przykładowo, zmienność zDA_{III-IX} objaśnia 41% we wrześniu i 48% w październiku obserwowanej zmienności zawartości lodu morskiego w gridzie [74,5°N, 179,5°E].

Również w środkowej części badanego obszaru najsilniejszy wpływ na zmienność rocznej koncentracji lodu mają zmiany zDA_{III-IX} . W gridzie [74,5°N, 179,5°E] obserwowana zmienność rocznej zawartości lodu jest w 50% objaśniona przez zmienność zDA_{III-IX} (ryc. 3).



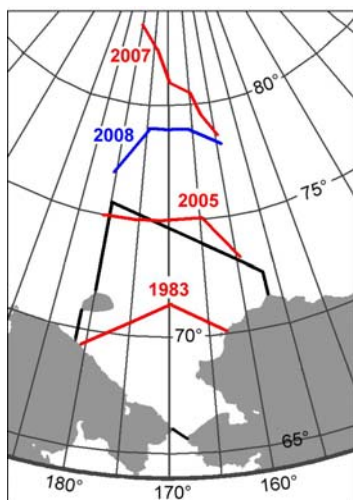
Ryc. 3. Związek wartości zDA_{III-IX} z roczną zawartością pokrywy lodowej w gridzie [74,5°N, 179,5°E]

Fig. 3. The correlation between zDA_{III-IX} value and annual ice concentration in grid [74.5°N, 179.5°E]

Podobny obraz zależności pojawia się dla krótszych okresów uśredniania zDA (zDA_{III-VIII}, zDA_{V-VIII}, zDA_{V-IX}), choć związki te są nieco słabsze. W częściach północnej i południowej siła związków między uśrednionymi dla różnych okresów wartościami zDA a miesięcznymi i rocznymi wartościami zawartości lodu maleje.

3.3. Minimalne zasięgi pokrywy lodowej

Analiza wykazała, że w rejonie Morza Czukockiego zaznaczają się dwa okresy, w których minimalny zasięg pokrywy lodowej kształtował się odmiennie. W pierwszym okresie, obejmującym lata 1982-2001, minimalny zasięg pokrywy lodowej we wrześniu wykazywał niewielkie zmiany i zaznaczał się przeważnie w granicach od 71°N w części zachodniej do 73°N w części wschodniej badanego obszaru. Wystąpiły też lata, w których obie części zachodnia (179,5°E) i wschodnia (159,5°W) były pokryte lodem morskim przez cały rok (9 i 11 lat – odpowiednio). W okresie 1982-2001 zaznaczyły się wyraźnie lata 1998 i 1999, w których minimalny zasięg lodu morskiego przesunął się w całym obszarze o 2-3° dalej na północ. W drugim okresie, 2002-2008, nastąpiło gwałtowne cofnięcie się minimalnych zasięgów pokrywy lodowej jeszcze dalej w kierunku północnym. Szczególnym był tu rok 2007, kiedy to w prawie całym badanym obszarze minimalny zasięg lodu przesunął się powyżej 80°N (ryc. 4).



Ryc. 4. Minimalne zasięgi pokrywy lodowej w wybranych latach (wrzesień) i granice Morza Czukockiego

Fig. 4. Minimum sea ice extent in selected years in September and Chukchi Sea borders

3.4. Związki cyrkulacji atmosferycznej z minimalnymi zasięgami pokrywy lodowej

Przeprowadzona analiza korelacji pokazała, że między miesięcznymi wartościami różnic ciśnienia nad Morzem Beauforta i rejonem tajmyrskim (zDA) a minimalnymi zasięgami pokrywy lodowej (MZPL) zachodzą związki synchroniczne polegające na jednoczesnych zmianach zDA i MZPL o tych samych znakach. Bezpośrednie związki są stosunkowo słabe, zaznaczają się na prawie wszystkich południkach (za wyjątkiem 159,5°W) przechodzących przez badany obszar i zachodzą od sierpnia do października. Korelacje są najsilniejsze w zachodniej części rejonu Morza Czukockiego i słabną w kierunku

wschodnim. Przykładem może być związek pomiędzy zDA a MZPL na 179,5°E, gdzie pojawia się najwyższy współczynnik korelacji $r=0,64$. Zmienność wartości zDA objaśnia tu 37% obserwowanej zmienności MZPL w sierpniu.

Analiza wykazała, że istnieją również związki asynchroniczne między zmiennością zDA a zmiennością minimalnych zasięgów pokrywy lodowej. Związki te stają się silniejsze dla dłuższych okresów uśredniania zDA (tab. 1). Na badanym obszarze najsilniejszy wpływ na zmiany MZPL ma zmienność zDA uśrednionej dla okresów: marzec – sierpień i marzec – wrzesień. Przykładowo, zmienność zDA_{III-VIII} objaśnia 40% obserwowanej zmienności MZPL w sierpniu, a zmienność zDA_{III-IX} objaśnia 43% obserwowanej zmienności MZPL we wrześniu na południku 169,5°W (ryc. 5).

Tabela 1 – Table 1

Wartości współczynników korelacji liniowej (r) i ich poziom istotności statystycznej (p) między uśrednionymi dla okresu marzec-sierpień (zDA_{III-VIII}), maj-sierpień (zDA_{V-VIII}), marzec-wrzesień (zDA_{III-IX}) i maj-wrzesień (zDA_{V-IX}) różnicami ciśnienia między rejonem Morza Beauforta a rejonem Tajmyru a minimalnymi zasięgami pokrywy lodowej od sierpnia do października (MZPL) w okresie 1982-2008

Values of coefficients of linear correlation (r) and their level of statistical significance (p) between mean differences of pressure values between the region of the Beaufort Sea and the Taymir region for the period March-August (zDA_{III-VIII}), May-August (zDA_{V-VIII}), March-September (zDA_{III-IX}) and May-September (zDA_{V-IX}) and minimum sea-ice extent (MZPL) for the period August-October (1982-2008)

Zmienna Variable		174,5°W			169,5°W		
		MZPL _{VIII}	MZPL _{IX}	MZPL _X	MZPL _{VIII}	MZPL _{IX}	MZPL _X
zDA _{III-VIII}	r	0,61	0,54	0,40	0,65	0,56	0,46
	p	0,001	0,004	0,047	0,000	0,003	0,015
zDA _{V-VIII}	r	0,55	0,48	0,54	0,55	0,51	0,52
	p	0,003	0,011	0,005	0,003	0,007	0,005
zDA _{III-IX}	r	0,65	0,65	0,53	0,66	0,67	0,63
	p	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000
zDA _{V-IX}	r	0,60	0,62	0,68	0,57	0,65	0,71
	p	0,001	0,001	0,000	0,002	0,000	0,000

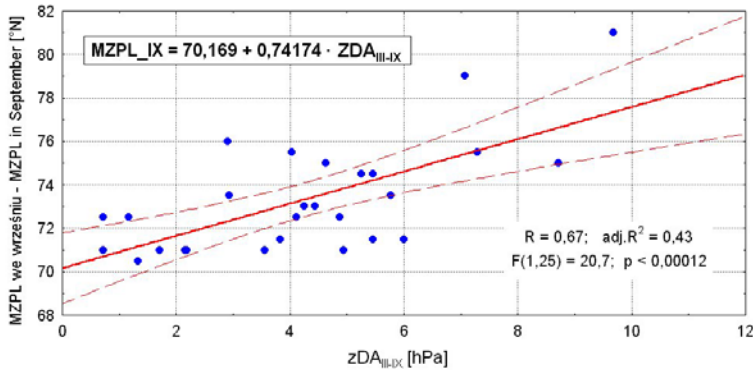
Taki obraz zależności między wartościami zDA uśrednionymi dla dłuższych okresów a pokrywą lodową w momencie jej minimalnego rozwoju pokazuje, że dominującą rolę w kształtowaniu MZPL ma charakter wcześniej występującej cyrkulacji atmosferycznej, która kieruje lody w kierunku Prądu Transarktycznego (Transpolarnego), a ten wynosi je w kierunku bieguna.

4. Wnioski

W badanym okresie 1982-2008, w rejonie Morza Czukockiego, nastąpił duży spadek zawartości lodu morskiego. Istotnie statystycznie spadki zawartości zaznaczają się latem i jesienią, a najsilniejsze są we wrześniu i październiku. W ciągu 27 lat, w środkowej części badanego obszaru, spadek ten może być oszacowany na 100% we wrześniu i 85% w październiku, a średni roczny spadek koncentracji lodu morskiego na 25%.

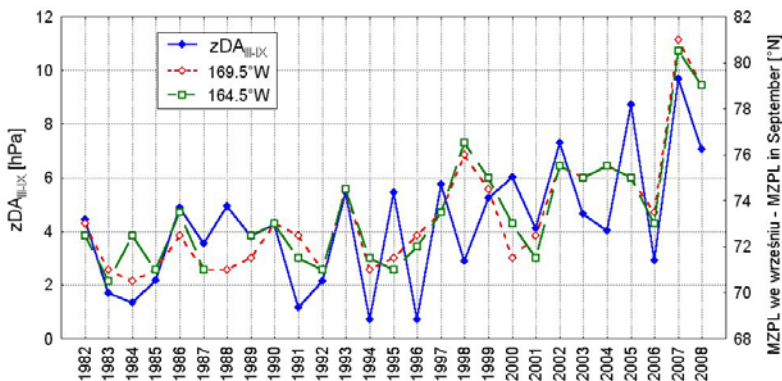
Wręcz ze zmniejszaniem się pokrywy lodowej (gwałtownym po roku 2001) nastąpiło wydłużenie okresu, w którym powierzchnia Morza Czukockiego wolna jest od lodu morskiego. Najbardziej widoczne

jest to w częściach zachodniej i wschodniej morza, gdzie wody są wolne od lodu przez około 5-6 miesięcy – od czerwca-lipca do listopada. Skutkiem tego są większe ilości ciepła zmagazynowane w wodzie jak i silniejsze strumienie ciepła z wody do atmosfery.



Ryc. 5. Związek wartości zDA_{III-IX} z minimalnym zasięgiem pokrywy lodowej (MZPL) we wrześniu na południku 169,5°W

Fig. 5. The correlation between zDA_{III-IX} value and minimum sea ice extent (MZPL) in September at 169.5°W meridian



Ryc. 6. Przebiegi MZPL na południkach 169,5°W i 164,5°W oraz wartości zDA_{III-IX} w okresie 1982-2008

Fig. 6. Course of minimum ice extent (MZPL) at 169.5°W and 164.5°W meridian and zDA_{III-IX} values in period 1982-2008

W badanym okresie zaznaczają się bezpośrednie, synchroniczne związki między minimalnymi zasięgami pokrywy lodowej a miesięcznymi wartościami różnic ciśnienia między Morzem Beauforta a rejonem tajmyrskim (zDA). Istotnie statystycznie, choć słabe, związki występują na przelomie lata i jesieni (od sierpnia do października) na 169,5 i 174,5°W. Na 169,5°W zmiany zDA w sierpniu objaśniają 20% zmienności minimalnego zasięgu pokrywy lodowej. Jednakże zaznaczają się też silne i wysoce istotne statystycznie związki minimalnych zasięgów pokrywy lodowej z charakterem wcześniej wystę-

pującej cyrkulacji atmosferycznej. Zmienność zDA od marca do sierpnia objaśnia od 34 do 40% zmienności minimalnego zasięgu pokrywy lodowej w środkowej części morza. Wskazuje to na istotny wpływ cyrkulacji atmosferycznej na minimalny zasięg lodów na Morzu Czukockim.

Nieco silniejsze związki zaznaczają się dla zDA od marca do września. Zmiany cyrkulacji atmosferycznej w tym okresie objaśniają od 43% (we wrześniu) do 37% (w październiku) zmienności minimalnego zasięgu pokrywy lodowej na 169,5°W południku.

Badania wykazały, że w rejonie Morza Czukockiego spadek zawartości jak i zmniejszanie się powierzchni lodów w okresie ich minimalnego rozwoju jest nie tylko wynikiem działania czynników radiacyjno-termicznych ale również wynikiem działania cyrkulacji atmosferycznej charakteryzowanej przez "zmodyfikowany Dipol Arktyczny" (ryc. 6).

Literatura

- Comiso J.C., 2002. A rapidly declining perennial sea ice cover in the Arctic. *Geophysics Research Letters*, 29 (20), 1956, doi: 10.2929/2002GL015650.
- Comiso J.C., 2006. Abrupt decline in the Arctic winter sea ice cover. *Geophysics Research Letters*, 33; L18504, doi: 10.1029/2006GL027341.
- Marsz A.A., 2008. Zmiany pokrywy lodów morskich Arktyki na przełomie XX I XXI wieku i ich związek z cyrkulacją atmosferyczną. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 18: 7-33.
- Nghiem S.V., Rigor I.G., Perovich D.K., Clemente-Colón P., Weatherly J.W., Neumann G., 2007. Rapid reduction of Arctic perennial sea ice. *Geophysics Research Letters*, 34; L19504, doi: 10.1029/2007GL031138.
- Parkinson C.L., Cavalieri D.J., Gloersen P., Zwally J.H., Comiso J.C., 1999. Arctic sea ice extent, areas and trends, 1978-1996. *Journal of Geophysical Research*, 104: 20837-20856.
- 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.
- Richter-Menge J., Comiso J., Meier W., Nghiem S., Perovich D., 2008. Sea Ice Cover [w: Arctic Report Card, 2008], <http://www.arctic.noaa.gov/reportcard>.
- Rodrigues J., 2008. The rapid decline of the sea ice in the Russian Arctic. *Cold Regions Science and Technology*, 54: 124-142.
- Rothrock D.A., Yu Y., Maykut G.A., 1999. Thinning of the Arctic sea ice cover. *Geophysics Research Letters*, 26: 3469-3472.
- Shirasawa K., Eicken H., Tateyama K., Takatsuka T., Kawamura T., 2009. Sea-ice-thickness variability in the Chukchi Sea, spring and summer 2002-2004. *Deep-Sea Research, Part II*, 56 (17): 1182-1200.

Wpłynęło: 20 sierpnia 2009; poprawiono: 3 października 2009.

Summary

Research indicated that in the region of the Chukchi Sea both the decrease in ice concentration and the decrease in the sea ice covered area, in the period of its minimal development, is to a great extent influenced by atmospheric circulation characterized by a modified Arctic Dipole. Changes in atmospheric circulation explain from 43% (in September) up to 37% (in October) changeability in minimum sea ice extent at 169°W meridian.

Key words. Chukchi Sea, sea-ice, concentration, minimum sea-ice extent, atmospheric circulation, Arctic Dipole.