

ZMIANY TEMPERATURY WODY POWIERZCHNIOWEJ NA MORZACH ARKTYKI ROSYJSKIEJ I ICH KONSEKWENCJE DLA ŻEGLUGI NA PÓŁNOCNEJ DRODZE MORSKIEJ

CHANGES OF SEA SURFACE TEMPERATURE IN THE RUSSIAN ARCTIC SEAS
AND THEIR IMPLICATIONS FOR SHIPPING IN THE NORTHERN SEA ROUTE

Anna Styszyńska¹, Tadeusz Pastusiak²

¹ – Katedra Urbanistyki i Planowania Regionalnego, Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12, 11/12 80-233 Gdańsk
anna.styszynska@pg.gda.pl

² – Katedra Nawigacji, Wydział Nawigacyjny Akademii Morskiej w Gdyni
ul. Jana Pawła II 3, 81-345 Gdynia
tadeusz.pastusiak@wp.pl

Zarys treści. Praca omawia zmiany średniej miesięcznej temperatury wody powierzchniowej na morzach Arktyki Rosyjskiej w latach 1979-2016. Stwierdzono, że w badanym okresie następował powolny wzrost temperatury wody. Jednakże tylko na Morzu Barentsa był on istotny statystycznie we wszystkich miesiącach roku, a w SW części Morza Karskiego oraz w zachodniej części Morza Czukockiego w okresie od czerwca do grudnia. W analizowanym 38. leciu największy wzrost temperatury wody powierzchniowej miał miejsce na Morzu Wschodnio-syberyjskim (+0,57°C/10 lat w sierpniu i +0,44°C/10 lat we wrześniu) oraz w SW części Morza Karskiego w lipcu (+0,53°C/10 lat). W dalszym ciągu na wszystkich morzach, poza Morzem Barentsa, do czerwca włącznie temperatura wody ma wartości niższe od temperatury jej zamarzania przy swoistym dla danego morza zasoleniu. Najpóźniej temperaturę zamarzania osiągają wody Morza Barentsa gdzie w ostatniej dekadzie (2006-2015) na podejściu do północnego wejścia na PDM rzadko kiedy temperatura wody spadała poniżej temperatury zamarzania oraz wody Morza Czukockiego (w grudniu). Oznacza to, że statki pokonujące PDM w listopadzie będą miały szansę przepłynąć ją po „czystej” wodzie lub w cienkich, młodych lodach, które dla współczesnych statków nie stanowią większego zagrożenia.

Słowa kluczowe: temperatura wody powierzchniowej, zmiany temperatury wody, Północna Droga Morska, Arktyka Rosyjska.

1. Wprowadzenie

Północna Droga Morska (dalej PDM) to wielowariantowy szlak żeglugowy między portami europejskimi i portami Dalekiego Wschodu przebiegający przez morza Arktyki Rosyjskiej. Na PDM składają się płytkowodne trasy przybrzeżne, łączące poszczególne porty leżące na wybrzeżu i w częściach ujściowych rzek syberyjskich oraz trasy tranzytowe odsunięte bardziej od wybrzeży (ryc. 1), wybierane przez statki posiadające większe zanurzenie. Z punktu widzenia nawigacji podstawową kwestią decydującą o wykorzystaniu PDM jako szlaku przewozów morskich jest kształtowanie się warunków hydro-klimatycznych w tym rejonie, sterujących zmianami warunków lodowych. Jednym z istotnych

czynników wpływających na zmiany pokrywy lodowej jest temperatura wody morskiej (m.in. Polyakov i in. 2010, Steele i in. 2010, Marsz 2015, Styszyńska i Marsz 2016).

Morza, przez które przebiega PDM co roku, w okresie od listopada do maja, pokryte są lodem. Temperatura wody pod lodem bliska jest temperaturze zamarzania przy danym zasoleniu i waha się od $-0,8 \div -1^{\circ}\text{C}$ w pobliżu ujść wielkich rzek syberyjskich (zasolenie 15-18 PSU) do $-1,8^{\circ}\text{C}$ w centralnych i północnych częściach mórz (przy zasoleniu 33-35 PSU). W strefach płytkowodnych taką temperaturę ma masa wód od powierzchni do dna (Bulatov i Zakharov 1976). W czerwcu i lipcu pod wpływem dopływu ciepłych wód rzecznych i radiacji słonecznej dochodzi do rozpadu pokrywy lodowej w południowych częściach mórz (Stiepanov 1972). Początkowo dopływ ciepła zużywany jest na topnienie lodu, dlatego temperatura wody na powierzchni (dalej SST – Sea Surface Temperature) niewiele różni się od zimowej. W strefie lodów dryfujących SST zależy od stopnia koncentracji lodu. Przy zwarciu lodów 7-10/10 temperatura wody waha się od $-1,7$ do $-1,0^{\circ}\text{C}$, przy mniejszym zwarciu lodów (do 6/10) – wzrasta do $-1 \div +2^{\circ}\text{C}$. Na wodach otwartych ochładzający wpływ lodu zaznacza się do odległości 30 Mm od skraju zwarłego lodu (Locija Karskiego Morza 1998). Po stopieniu lodu SST zaczyna szybko wzrastać, osiągając swoje maksimum pod koniec sierpnia. Warstwa wygrzanych wód, o temperaturze wyższej od 0°C , jest bardzo cienka i na ogół wynosi od 5 do około 20 m (Locija Morza Laptevych 2009). Jedynie sporadycznie może być bardziej miększa (do 60-70 m). Najczęściej od połowy września rozpoczyna się spadek SST. Jesienią, wraz ze spadkiem temperatury powietrza, woda w warstwie powierzchniowej szybko oddaje ciepło do atmosfery, co prowadzi do zaniku powierzchniowej warstwy wygrzanych wód i powoduje, że już na początku października woda na powierzchni osiąga temperaturę zamarzania (Dobrovolskij i Zalagin 1982, Danilov i in. 2004, Zubakin 2006). Całkowity zanik lodu stałego najszybciej następuje na Morzu Wschodniosyberyjskim i w SW części Morza Karskiego, a najpóźniej w rejonie cieśnin Wilkickiego i Sannikova (na pograniczu mórz Karskiego i Łaptiewów). Całkowity zanik pokrywy lodowej w południowych częściach mórz Karskiego i Łaptiewów następuje przeciętnie pod koniec lipca – na początku sierpnia.

Pod koniec lata najwyższą temperaturę ($5-7^{\circ}\text{C}$) osiągają wody Morza Peczorskiego (SE część Morza Barentsa) i wody w ujściach Obi i Jeniseja oraz w Zatoce Bajdarackiej na Morzu Karskim. W pobliżu północnych skrajów Nowej Ziemi woda jest już znacznie chłodniejsza, ale jeszcze utrzymuje temperaturę dodatnią ($1-1,5^{\circ}\text{C}$). W NE części Morza Karskiego, przy zachodnich wybrzeżach Ziemi Północnej oraz na podejściach do cieśnin Wilkickiego i Szokalskiego, temperatura wody spada poniżej 0°C (Locija Karskiego Morza 1998). Na Morzu Łaptiewów najwyższą temperaturę mają wody w pobliżu ujścia Leny ($3-4^{\circ}\text{C}$) i na płytkowodnym podejściu do Tiksi ($6-7^{\circ}\text{C}$). W północnej części tego morza woda ma ujemną temperaturę (Locija Morza Laptevych 2009). Latem na Morzu Wschodniosyberyjskim wody o dodatniej temperaturze występują tylko w strefie do 50-100 Mm od brzegu. Międzyroczna zmienność temperatury wody jest na tym morzu bardzo duża. W latach, w których lód dryfujący zalega blisko wybrzeża kontynentu, temperatura wody może mieć wartości ujemne nawet w okresie maksimum letniego nagrzewania (Locija Vostočno-Sibirskiego Morza 1998). Na Morzu Czukockim najniższa temperatura wody latem występuje w Cieśninie De Longa (0°C), a najwyższa w SE części morza ($4-5^{\circ}\text{C}$) i w pobliżu Cieśniny Beringa (7°C), czyli tam gdzie na powierzchni rozprzestrzeniają się wody pacyficzne (Locija zapadnoej części Čukotskiego Morza ... 1999).

W poszczególnych sezonach nawigacyjnych rzeczywista temperatura wody, zarówno w południowych częściach poszczególnych mórz, przez które przebiegają przybrzeżne warianty PDM, jak i w ich północnych rejonach, przez które przebiegają warianty głębokowodne, mogą w istotny sposób różnić

się od średniej wieloletniej. Duże różnice mogą również występować w datach początku i końca okresu z dodatnią temperaturą wody (Pastusiak 2016).

Zdecydowana większość informacji o temperaturze wody podawanych w locjach rosyjskich – podstawowych źródłach informacji dla nawigatorów żeglujących po PDM – bazuje na danych z okresu 1934/1936 – 1987/1989 i nie uwzględnia ostatniego okresu intensywnego wzrostu SST obserwowanego w Arktyce od początku XXI wieku. Na morzach Barentsa i Karskim miał on miejsce już w latach 2003-2004 (m.in. Polyakov i in. 2005), a na morzach Wschodniosyberyjskim i Czukockim od 2007 roku (m.in. Zblewski 2008, Zblewski i Marsz 2009, Frolov i in. 2009). Na morzach sektora syberyjskiego szczególnie duże wzrosty SST wystąpiły w 2007, 2011 i 2012 roku (m.in. Timokhov i in. 2012, Steele i Dickinson 2016). Według Timokhova i innych (2013) latem 2011 roku na Morzu Łaptiewów anomalia SST wyniosła +5-7°C. Te duże zmiany wartości SST wiążą należy ze zmianami wielkości pokrywy lodowej. W tych latach na morzach sektora syberyjskiego redukcja powierzchni lodów morskich była największa w skali całej Arktyki (Nghiem i in. 2007, Steele i Dickinson 2016). W 2016 roku również zanotowano szczególnie duży wzrost SST w Arktyce. Timmermans (2016) podaje, że na morzach Barentsa i Czukockim w sierpniu 2016 roku SST była wyższa o 5°C od średniej z lat 1982-2010. W XXI wieku następował też wyraźny, choć zróżnicowany co do liczby dni na poszczególnych morzach Arktyki Rosyjskiej, wzrost długości sezonu nawigacyjnego (Marsz i in. 2014) i tzw. „sezonu bezlodowego”, w czasie którego zwartość lodów jest mniejsza niż 15% (Pastusiak 2014).

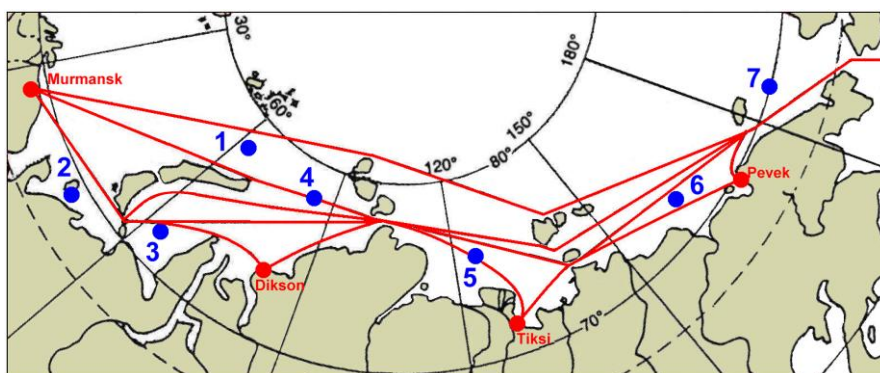
Celem tej pracy jest charakterystyka zmian temperatury powierzchni mórz Arktyki Rosyjskiej w okresie obserwacji satelitarnych – w latach 1979-2016. W bardzo wielu publikacjach podaje się informacje o bardzo dużych, na ogół jednostkowych, anomaliach SST na poszczególnych akwenach. Obliczane są one w odniesieniu do bardzo różnych, często krótkich, okresów uśredniania lub też nawet w porównaniu do poprzedniego roku. Analiza wielkości anomalii SST w odniesieniu do standardowego 30.letniego okresu obserwacyjnego, tu lata 1981-2010, winna umożliwić jednolitą ocenę wielkości wzrostu SST na morzach Arktyki Rosyjskiej. Może to również pozwolić na próbę określenia, z nieco większą wiarygodnością, jakiego rodzaju konsekwencje występujące zmiany SST mogą przynieść dla żeglugi na Północnej Drodze Morskiej.

2. Dane i metody

Źródłem danych o temperaturze wody powierzchniowej wykorzystanych w pracy była baza NOAA NCDC ERSST version 3b: „Extended reconstructed sea surface temperature data based on COADS data” International Research Institute for Climate Prediction (IRI/LDEO) Climate Data Library (źródło: <https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCDC/.ERSST/>). Zbiór ten zawiera miesięczne wartości SST dla pól $2^{\circ}\varphi \times 2^{\circ}\lambda$, przy parzystym mianowaniu punktów centralnych tych powierzchni (organizacja gridowa). Zbiór ERSST v.3b. stanowi dla okresu 1854-1992 przetworzenie danych ze zbioru COADS SST, dla późniejszego okresu – wysokorozdzielczych danych satelitarnych, kalibrowanych pomiarami *in situ* wykonywanymi na statkach i bojach oceanograficznych. Pełne omówienie konstrukcji tego zbioru zawiera praca Smitha i in. (2008).

Aby przeanalizować zmiany SST zachodzące na morzach Arktyki Rosyjskiej w funkcji czasu wybrano 7 rejonów, dla których z tej bazy pobrano dla okresu 1979-2016 szeregi średnich miesięcznych wartości temperatury wody powierzchniowej. Do analizy zmian SST mórz, przez które przebiega PDM wybrano 7 gridów (ryc. 1):

- 1 – grid ograniczony współrzędnymi 77-79°N i 61-63°E – punkt centralny: 78°N i 62°E – na podejściu do północnego wejścia na PDM od strony atlantyckiej;
- 2 – grid ograniczony współrzędnymi 67-69°N i 49-51°E – punkt centralny: 68°N i 50°E – na podejściu do południowego wejścia na PDM od strony atlantyckiej (na Morzu Peczorskim);
- 3 – grid ograniczony współrzędnymi 71-73°N i 63-65°E – punkt centralny: 72°N i 64°E – leżący w SW części Morza Karskiego, przez który przebiegają przybrzeżne warianty PDM;
- 4 – grid ograniczony współrzędnymi 77-79°N i 87-89°E – punkt centralny: 78°N i 88°E – leżący w NE części Morza Karskiego, przez który prowadzą głębokowodne warianty PDM;
- 5 – grid ograniczony współrzędnymi 75-77°N i 125-127°E – punkt centralny: 76°N i 126°E – leżący w środkowej części Morza Łaptiewów, przez który prowadzi większość tras PDM na tym morzu,
- 6 – grid ograniczony współrzędnymi 71-73°N i 163-165°E – punkt centralny: 72°N i 164°E – leżący na Morzu Wschodniosyberyjskim, przez który prowadzi większość tras PDM na tym morzu;
- 7 – grid ograniczony współrzędnymi 69-71°N i 173-175°E – punkt centralny: 70°N i 174°W – leżący na Morzu Czukockim na SE od Wyspy Wrangla.



Ryc. 1. Główne warianty przebiegu tras Północnej Drogi Morskiej i położenie środków 7 gridów 2°x2°, dla których analizowano zmiany temperatury wody powierzchniowej

Fig. 1. The major sailing routes along the Northern Sea Route and location of the center of seven grids 2°x2° for which changes in sea surface temperature were analyzed.

Do badań wykorzystano standardowe metody statystyczne. Za pomocą analizy regresji policzono dla okresu 1979-2016 wartości trendów. Ich istotność sprawdzono za pomocą testu t-Studenta i testem F Fishera-Snedecora. Za granicę istotności statystycznej przyjęto wartość $p = 0,05$ (przedział ufności = 95%).

3. Przebieg zmian temperatury wody powierzchniowej

Średnie miesięczne wartości SST w 7 wybranych gridach w okresie obserwacji satelitarnych, w latach 1979-2016, przedstawia tab. 1. Podano w niej również najwyższe i najniższe wartości średnich miesięcznych SST w tym czasie oraz wartości SST dla trzech ostatnich dziesięcioleci: 1986-1995, 1996-2005 i 2006-2015. Dodatkowo podano średnie miesięczne wartości SST w 2016 roku.

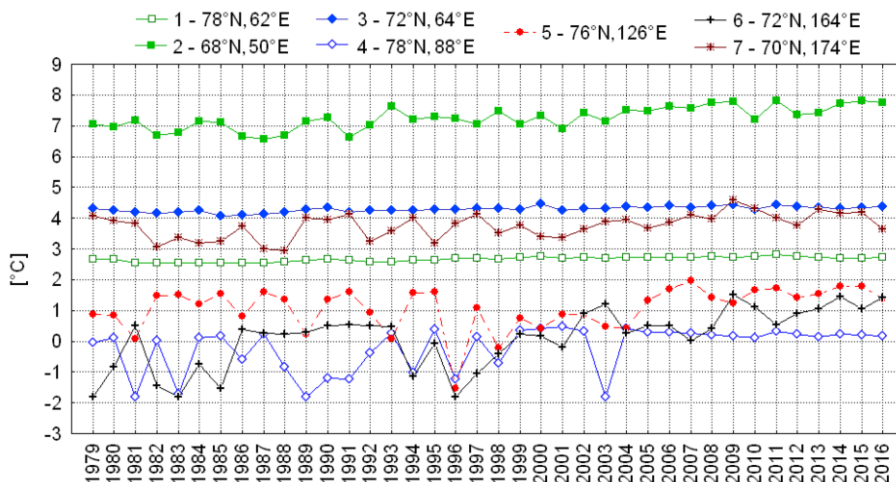
Na morzach Arktyki Rosyjskiej zmienność SST w cyklu rocznym nie jest duża. Poza Morzem Barentsa (gridy 1 i 2) przez ponad połowę roku (w NE części Morza Karskiego oraz na morzach Łap-

tiewów i Wschodniosyberyjskim przez 8 miesięcy, a w SW części Morza Karskiego i na Morzu Czuckockim przez 7 miesięcy) średnie miesięczne i maksymalne wartości SST utrzymują się w granicach od -1,09 do -1,80°C, co mieści się w przedziałach temperatury zamarzania wody o zasoleniu od 20 do 34 PSU.

W okresie 1979-2016 rozkład przestrzenny występowania dodatnich wartości miesięcznych średnich wieloletnich SST jest zróżnicowany. Po zachodniej stronie PDM występują one w ciągu od 8 (grid 2) do 4 (gridy 1 o 3) miesięcy. W NE części Morza Karskiego (grid 4) nawet latem średnia wieloletnia SST jest niższa od 0°C. Na morzach Łaptiewów i Wschodniosyberyjskim czas występowania dodatnich SST jest ograniczony do 2 miesięcy – sierpnia i września. Maksima miesięczne wykazują, że na tych ostatnich akwenach występowanie SST nieco wyższych od 0°C może mieć miejsce również w lipcu (tab. 1).

Analiza średnich 10-letnich wartości SST wykazała, że na morzach Barentsa i Karskim z dekady na dekadę (1986-1995, 1996-2005 i 2006-2015) temperatura wody latem powoli wzrastała, ale tylko w południowych częściach tych mórz (gridy 2 i 3) i tylko w okresie pierwszej dekady (1986-1995) wzrost ten był istotny statystycznie. Natomiast na morzach Łaptiewów i Wschodniosyberyjskim w dekadzie 1996-2005 latem (lipiec-wrzesień) nastąpił niewielki spadek SST (o około 0,7°C), by w kolejnej dekadzie (2006-2015) wartość SST wzrosła o 0,69-1,18°C (tab. 1).

Na akwenach PDM najwyższe wartości średnie miesięczne temperatura wody osiąga w sierpniu. Zakres zmian wartości SST w poszczególnych gridach jest zróżnicowany. Najbardziej wyrównanym przebiegiem charakteryzuje się SST w NE części Morza Barentsa (grid 1) oraz SW części Morza Karskiego (grid 3), a więc na tych akwenach, do których docierają wody atlantyckie (ryc. 2). Im dalej na północ i wschód – tym bardziej rośnie zróżnicowanie wartości SST. W sierpniu największe zmiany z roku na rok zaznaczają się, zwłaszcza w okresie od 1979 do 2004-2007, na morzach Łaptiewów i Wschodniosyberyjskim oraz NE części Morza Karskiego (ryc. 2).



Ryc. 2. Przebieg średniej miesięcznej SST [°C] w sierpniu w 7 gridach 2°x2° położonych w rejonie PDM w latach 1979-2016

Fig. 2. Course of monthly mean SST [°C] in August in seven grids 2°x2° located in the Northern Sea Route area between 1979-2016.

Tab. 1. Średnie, maksymalne i minimalne miesięczne wartości SST w latach 1979-2016, średnie SST w 10.letniach: 1986-1995, 1996-2005 i 2006-2015 oraz średnie miesięczne w 2016 roku w 7 gridach leżących na trasach PDM. Dodatkowo wartości SST pogrubiono, kolorem żółtym zaznaczono SST wyższe od temperatury zamarzania na danym akwenie

Table 1. Mean, maximum and minimum monthly SSTs in 1979-2016, means for decades 1986-1995, 1996-2005, 2006-2015, and monthly mean in 2016 for seven grids located in the Northern Sea Route. Positive SST values are bolded, yellow indicates SST higher than freezing point in a given area.

Okres Period	Miesiące – Months											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1 – 78°N i 62°E – na podejściu do północnego wejścia na PDM od strony atlantyckiej 1 – 78°N and 62°E – on the approach to the northern entry to the NSR from the Atlantic side												
1979-2016	-1,62	-1,60	-1,64	-1,69	-1,60	-1,12	0,73	2,67	2,40	0,68	-1,15	-1,52
Max	-1,24	-1,23	-1,26	-1,26	-1,14	-0,50	1,30	2,81	2,53	0,96	-0,62	-1,07
Min	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,46	2,54	2,25	-1,80	-1,80	-1,80
1986-1995	-1,80	-1,70	-1,78	-1,75	-1,69	-1,45	0,48	2,61	2,34	0,57	-1,55	-1,75
1996-2005	-1,62	-1,64	-1,70	-1,78	-1,67	-1,13	0,84	2,72	2,44	0,79	-1,16	-1,48
2006-2015	-1,36	-1,38	-1,38	-1,50	-1,34	-0,65	1,21	2,74	2,47	0,88	-0,79	-1,23
2016	-1,29	-1,28	-1,30	-1,32	-1,19	-0,60	1,19	2,73	2,46	0,85	-0,74	-1,19
2 – 68°N i 50°E – na podejściu do południowego wejścia na PDM od strony atlantyckiej 2 – 68°N and 50°E – on the approach to the southern entry to the NSR from the Atlantic side												
1979-2016	-0,71	-1,45	-1,39	-0,99	0,29	2,61	5,77	7,25	6,31	4,11	2,35	1,20
Max	0,46	-0,26	-0,50	0,19	1,33	3,44	6,35	7,80	6,90	4,86	3,05	1,95
Min	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-0,19	4,95	6,58	5,55	3,33	1,56	0,37
1986-1995	-1,00	-1,45	-1,28	-1,01	0,24	2,84	5,53	7,01	6,10	3,94	2,23	1,16
1996-2005	-0,69	-1,55	-1,51	-1,14	0,17	2,43	5,94	7,26	6,42	4,20	2,38	1,20
2006-2015	-0,15	-1,29	-1,26	-0,43	0,95	3,18	6,01	7,61	6,55	4,36	2,58	1,47
2016	0,20	-0,60	-0,54	-0,37	1,15	3,24	6,35	7,76	6,70	4,72	2,90	1,95
3 – 72°N i 64°E – w SW części Morza Karskiego 3 – 72°N and 64°E – in the SW part of the Kara Sea												
1979-2016	-1,76	-1,78	-1,80	-1,78	-1,76	-1,51	1,52	4,29	4,49	2,92	-0,18	-1,54
Max	-1,37	-0,95	-1,80	-1,09	-1,20	-0,55	2,13	4,47	4,69	3,21	0,46	-0,85
Min	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,62	4,06	4,27	0,85	-1,80	-1,80
1986-1995	-1,80	-1,80	-1,80	-1,73	-1,74	-1,59	1,74	4,23	4,43	2,92	-0,20	-1,58
1996-2005	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,79	-1,54	1,74	4,32	4,55	2,81	-0,23	-1,58
2006-2015	-1,68	-1,72	-1,80	-1,80	-1,72	-1,30	2,01	4,37	4,56	3,05	0,25	-1,34
2016	-1,57	-1,79	-1,80	-1,80	-1,80	-0,70	1,99	4,36	4,58	3,07	0,26	-0,95
4 – 78°N i 88°E – w NE części Morza Karskiego 4 – 78°N and 88°E – in the NE part of the Kara Sea												
1979-2016	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,74	-1,55	-1,01	-0,22	-0,03	-1,27	-1,76	-1,79
Max	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,27	-0,92	-0,23	0,48	0,62	-0,59	-1,35	-1,61
Min	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80
1986-1995	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,79	-1,54	-1,11	-0,62	-0,23	-1,56	-1,80	-1,80
1996-2005	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,63	-1,45	-0,97	-0,13	-0,19	-1,22	-1,80	-1,80
2006-2015	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,70	-0,91	0,22	0,31	-0,90	-1,68	-1,78
2016	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,78	-0,55	0,18	0,31	-0,88	-1,37	-1,70
5 – 76°N i 126°E – w środkowej części Morza Łaptiewów 5 – 76°N and 126°E – in the central part of the Laptev Sea												
1979-2016	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,79	-1,52	-0,38	1,07	1,04	-1,48	-1,80	-1,80
Max	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,63	-0,63	0,88	1,96	1,98	-0,59	-1,80	-1,80
Min	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,55	-1,06	-1,80	-1,80	-1,80
1986-1995	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,79	-1,43	-0,20	1,11	1,18	-1,51	-1,80	-1,80
1996-2005	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,65	-0,75	0,44	0,44	-1,70	-1,80	-1,80
2006-2015	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,78	-1,35	0,13	1,62	1,50	-1,11	-1,80	-1,80
2016	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-0,12	1,39	1,63	-0,77	-1,80	-1,80

6 – 72°N i 164°E – na Morzu Wschodniosyberyjskim 6 – 72°N and 164°E – in the East Siberian Sea												
1979-2016	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,78	-1,24	0,11	0,01	-1,32	-1,78	-1,80
Max	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,73	-1,28	0,45	1,52	1,06	-0,19	-1,51	-1,80
Min	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80
1986-1995	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,23	0,20	0,00	-1,58	-1,80	-1,80
1996-2005	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,79	-1,75	-1,09	-0,02	-0,07	-1,43	-1,80	-1,80
2006-2015	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,79	-1,15	0,86	0,62	-0,72	-1,74	-1,80
2016	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-0,94	1,42	0,85	-0,40	-1,79	-1,80
7 – 70°N i 174°W – w zachodniej części Morza Czukockiego 7 – 70°N and 174°W – in the western part of the Chukchi Sea												
1979-2016	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,57	1,65	3,75	3,05	1,15	-0,72	-1,77
Max	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,67	-0,52	2,57	4,58	3,86	1,93	0,12	-1,23
Min	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,71	2,95	2,15	0,40	-1,80	-1,80
1986-1995	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,72	1,34	3,58	2,83	0,93	-0,94	-1,79
1996-2005	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,51	1,82	3,72	2,99	1,11	-0,60	-1,80
2006-2015	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,79	-1,41	2,19	4,12	3,44	1,47	-0,42	-1,75
2016	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80	-1,09	2,33	3,65	2,98	1,35	-0,37	-1,23

Porównanie średnich miesięcznych wartości SST występujących w 2016 roku z poprzedzającym dziesięcioleciem 2006-2015 wskazuje, że proces wzrostu SST na morzach Arktyki Rosyjskiej postępuje nadal. W każdym z wyróżnionych 7 obszarów prawie we wszystkich miesiącach SST była wyższa niż średnia z dekady 2006-2015. Jedyny nieco większy spadek miesięcznych wartości SST miał miejsce na Morzu Czukockim – w sierpniu o 0,45°C i wrześniu – o 0,46°C. Można przypuszczać, że spadek ten związany był z ochładzającym oddziaływaniem występującego w tym czasie nieopodal Wyspy Wrangla zwartej masy lodowej (Timmermans 2016).

Aby wyjaśnić zmiany temperatury wody powierzchniowej zachodzące na wodach PDM w latach 1979-2016 chronologiczne ciągi średnich miesięcznych wartości SST poddano analizie trendów. Wykazała ona, że we wszystkich miesiącach, w których wody wolne są od całkowicie zwartej pokrywy lodowej, na poszczególnych akwenach PDM występują dodatnie trendy SST (tab. 2). Na Morzu Barentsa istotne statystycznie trendy SST zaznaczają się we wszystkich miesiącach roku, osiągając najwyższe wartości w lipcu na północy i w maju na południu. W SW części Morza Karskiego zmiany SST istotne są tylko w okresie ciepłym (VI-IX) oraz na początku zimy (XI-I), a w NE części tego morza tylko w sierpniu oraz od października do grudnia. Z kolei na Morzu Wschodniosyberyjskim istotne trendy występują tylko w okresie od lipca do listopada, a w zachodniej części Morza Czukockiego w okresie od czerwca do grudnia. Najślabszy wzrost SST ma miejsce na Morzu Łaptiewów gdzie istotny statystycznie wzrost SST występuje jedynie w lipcu i październiku.

Zdecydowana większość istotnych trendów osiąga niewielkie wartości. Tylko w niektórych miesiącach i na niektórych akwenach wartości trendu przekraczają 0,04°C/rok (tab. 2), co daje w całym analizowanym okresie 1979-2016 wzrost temperatury o 1,5°C. Najwyższe wartości trendów zanotowano na Morzu Wschodniosyberyjskim (grid 6) w sierpniu (0,057°C/rok – co wskazuje na wzrost SST w okresie 38 lat o 2,17°C) oraz w SW części Morza Karskiego (grid 3) w lipcu (0,053°C/rok – co daje wzrost SST w okresie 38 lat o 2,01°C).

Te duże trendy, wyraźnie odstające od przeciętnych, wiązać należy z obserwowanymi zmianami pokrywy lodów morskich. Mniejsza powierzchnia oraz grubość lodów morskich na danym akwenie prowadzić będzie do wcześniejszego uwolnienia powierzchni morza od lodów. To z kolei wpłynie na

wydłużenie czasu dopływu radiacji słonecznej do powierzchni wód, a więc i do zwiększenia akumulacji ciepła w wodach, prowadząc w ostatecznym efekcie do wzrostu ich temperatury. W warunkach postępującej znacznej redukcji pokrywy lodowej silniejsze trendy zaznaczać się winny z jednej strony z początkiem okresu występowania wody wolnej od lodów (czerwiec-lipiec), z drugiej – pod koniec okresu bezlodowego (wrzesień-październik). Drugą przyczyną wzrostu wartości SST mogą być zmiany cyrkulacji atmosferycznej i związane z tym dynamiczne zmiany powierzchni lodów dryfujących oraz wydobywanie się na powierzchnię ciepłych wód pośrednich dopływających do Arktyki z Atlantyku i Pacyfiku. Problem transportu ciepła do Arktyki przez cyrkulację oceaniczną w odniesieniu do Morza Karskiego omawiają szczegółowo w tym tomie Styszyńska i Marsz (2016).

Tab. 2. Wartości istotnych statystycznie miesięcznych trendów zmian SST [$^{\circ}\text{C}/\text{rok}$] w latach 1979-2016 w 7 gridach $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ leżących w rejonie PDM (górna wartość) i ich istotność statystyczna (dolna wartość).
Ice – we wszystkich latach na powierzchni gridu występuje zwarta pokrywa lodowa.
Najwyższe wartości trendów pogrubiono.

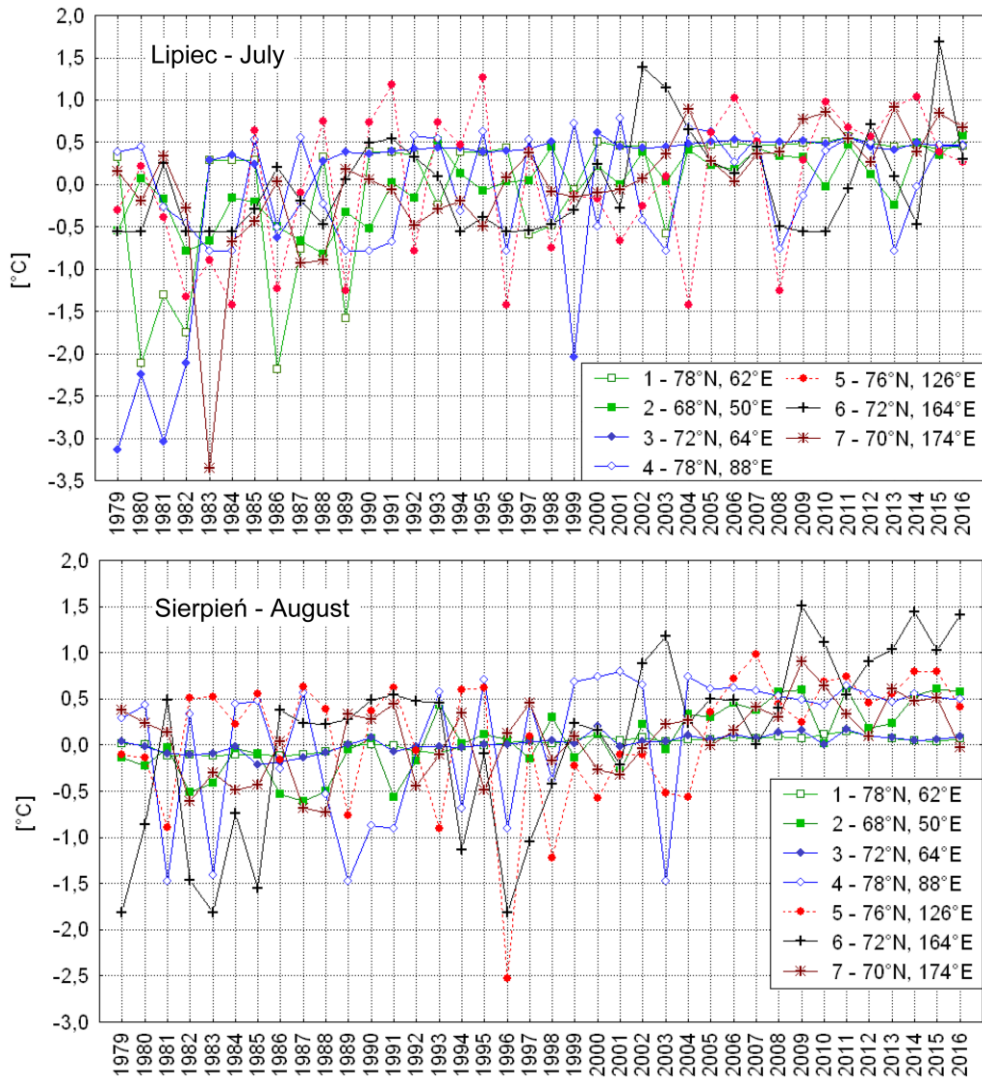
Table 2. Values of statistically significant monthly trends of SST changes [$^{\circ}\text{C}$ per year] between 1979 and 2016 in seven grids $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ located in the NSR area (upper value) and their statistical significance (lower value).
Ice – in all the years on the grid surface there is a compact ice cover. The highest trend values are bold.

Nr gridu No of grid	Miesiąc – Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,015 0,000	0,013 0,000	0,014 0,000	0,010 0,000	0,016 0,000	0,030 0,000	0,040 0,000	0,006 0,000	0,006 0,000	0,017 0,010	0,018 0,005	0,019 0,000
2	0,041 0,000	0,014 0,015	0,014 0,020	0,035 0,000	0,046 0,000	0,040 0,004	0,025 0,000	0,024 0,000	0,020 0,000	0,023 0,000	0,019 0,000	0,024 0,000
3	0,004 0,004	-	ice	-	-	0,019 0,001	0,053 0,000	0,006 0,000	0,006 0,000	-	0,031 0,001	0,015 0,002
4	ice	ice	ice	ice	-	-	-	0,028 0,007	-	0,026 0,000	0,006 0,001	0,001 0,043
5	ice	ice	ice	ice	-	-	0,027 0,027	-	-	0,021 0,000	ice	ice
6	ice	ice	ice	ice	-	-	0,019 0,030	0,057 0,000	0,044 0,000	0,038 0,000	0,002 0,021	ice
7	ice	ice	ice	ice	-	0,014 0,001	0,039 0,000	0,018 0,002	0,018 0,005	0,017 0,002	0,024 0,000	0,004 0,012

Aby wyjaśnić jak stwierdzony wzrost SST rozłożony jest w czasie i przestrzeni obliczono anomalie średnich miesięcznych wartości SST względem standardowego 30.letniego okresu obserwacyjnego. Za taki okres przyjęto lata 1981-2010. Analizę przeprowadzono dla dwóch miesięcy, które cechowały się największymi trendami – czyli dla lipca i sierpnia (ryc. 3 i 4).

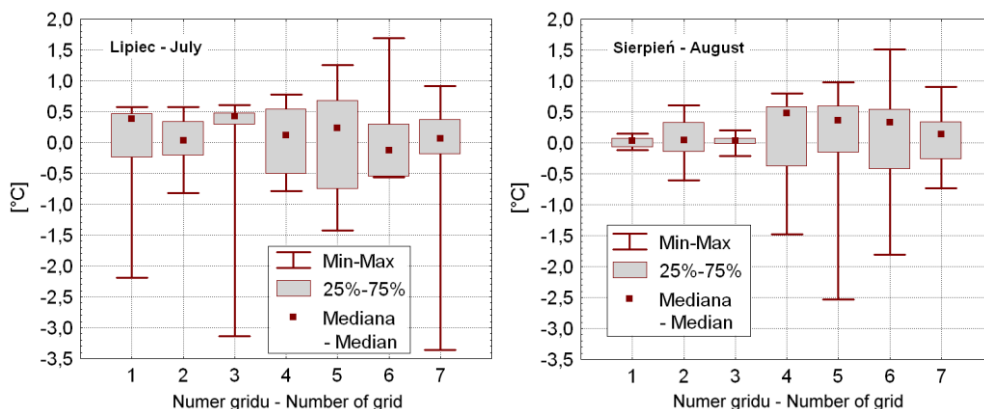
Wyniki przeprowadzonych analiz wskazują, że wzrost wartości temperatury wody w funkcji czasu przebiegał odmiennie na poszczególnych akwenach (ryc. 3 i 4). Po zachodniej stronie PDM, na morzach Barentsa (gridy 1 i 2) i Karskim (gridy 3 i 4) wzrost SST zaznaczył się już na początku XXI wieku. Od tego momentu zarówno na południu jak i na północy tych mórz, zarówno w lipcu jak i w sierpniu, coraz częściej obserwowano niezbyt duże dodatnie anomalie SST. Po 2000 roku na południu tych mórz jedynie w lipcu sporadycznie występowały jeszcze niewielkie ujemne anomalie SST (do $-0,24^{\circ}\text{C}$). W sierpniu na tych akwenach dominowały już anomalie dodatnie dochodzące na SW części Morza

Barentsa do $0,61^{\circ}\text{C}$, a w SW części Morza Karskiego do $0,17^{\circ}\text{C}$. Na północy Morza Barentsa (grid 1) niezbyt duże ($0,42\text{-}0,57^{\circ}\text{C}$), dodatkowo anomalie utrzymują się w lipcu od 2004 roku do chwili obecnej (2016 rok). Podobnej wielkości dodatnie anomalie mają w tym samym czasie miejsce w NE części Morza Karskiego w sierpniu. Przesunięcie na tym akwenie największych anomalii SST na sierpień wynika z częstego występowania tam w lipcu zwartej pokrywy lodów morskich uniemożliwiających wyraźniejszy wzrost SST.



Ryc. 3. Przebieg anomalii SST [$^{\circ}\text{C}$] w lipcu i sierpniu w 7 gridach $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ położonych w rejonie PDM obliczonych względem średniej z okresu 1981-2010

Fig. 3. The anomaly of the SST [$^{\circ}\text{C}$] in July and August in seven grids $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ located in the Northern Sea Route area calculated from the 1981-2010 mean.



Ryc. 4. Zakres zmienności anomalii SST [°C] w lipcu i sierpniu w 7 gridach 2°x2° położonych w rejonie PDM (współrzędne środka gridu – patrz tab. 2) obliczonych względem średniej z okresu 1981-2010

Fig. 4. The variability of the SST [°C] anomalies in July and August in the seven grids 2°x2° located in the Northern Sea Route area (coordinates of grid center - see Table 2) computed over the 1981-2010 mean.

Mały zakres zmienności (ryc. 4) anomalii SST mający miejsce w sierpniu, zarówno na podejściu do północnego jak i południowego wejścia na PDM od strony atlantyckiej wskazuje, że akweny te znajdują się pod stałym, istotnym wpływem wód atlantyckich przy jednocześnie niezbyt dużych zmianach pokrywy lodowej i charakteru cyrkulacji atmosferycznej wpływającej na dynamiczne zmiany powierzchni wody pokrytej lodem. Dodatkowo anomalie SST we wschodniej części PDM zaczęły dominować z pewnym opóźnieniem. Na Morzu Czukockim miało to miejsce od 2007 roku kiedy to kilkakrotnie nastąpił bardzo istotny regres pokrywy lodowej na północ (m.in. Nghiem i in. 2007, Rodrigues 2008, Steele i Dickinson 2016). W tym czasie szczególnie duże anomalie SST wystąpiły na Morzu Wschodniosyberyjskim. W sierpniu 2009 roku SST wzrosła na tym morzu o 1,51°C powyżej średniej z lat 1979-2016, w 2014 roku – o 1,44°C o w 2016 roku o 1,41°C. Największa anomalia na Morzu Wschodniosyberyjskim wystąpiła w lipcu 2015 roku i wynosiła 1,69°C.

4. Wnioski

Przeprowadzona analiza wskazuje, że poza Morzem Barentsa, na wszystkich pozostałych akwenach, przez które przebiega PDM, do czerwca włącznie temperatura wody ma wartości niższe od temperatury zamarzania przy swoistym dla danego morza zasoleniu (tab. 1). To oznacza, że nawet jak w czerwcu i lipcu dostawa ciepła słonecznego doprowadza do topnienia lodu, to praktycznie jest ono całkowicie zużywane na procesy topnienia lodu. Doprowadza to do zaniku pokrywy lodowej i powstania powierzchniowej warstwy wód silnie wysłodzonych. Pod koniec lata i na początku jesieni, w tej powierzchniowej warstwie wód (do termokliny letniej) następuje gwałtowny spadek SST aż do osiągnięcia temperatury zamarzania. Na morzach Łaptiewów i Wschodniosyberyjskim oraz w NE części Morza Karskiego do 2006 roku miało to miejsce na ogół już w październiku. Od 2007 roku, ze względu na wyraźne cofnięcie się lodów na północ okres letniej akumulacji ciepła w powierzchniowej warstwie wody uległ wydłużeniu i jej miąższość wzrosła (Timokhov i in. 2012, 2013). Spowodowało to opóźnienie rozwoju nowej pokrywy lodowej. W ostatnich 10-11 latach rozwój lodów na tych morzach

rozpoczyna się dopiero w listopadzie. Zatem w porównaniu do lat wcześniejszych (przed 2004-2006), jeżeli na tych trzech morzach zostanie zachowany dotychczasowy trend zmian temperatury wody, to proces zamarzania będzie się w dalszym ciągu opóźniał. Pogląd ten potwierdza obserwowany w 2016 roku dalszy wzrost SST. Na całym analizowanym obszarze, poza Morzem Czukockim w sierpniu i wrześniu, w 2016 roku wystąpiły dodatnie anomalie SST. Utrzymywanie się takiego stanu termicznego wód w następnych latach może wpłynąć na wyraźne wydłużenie sezonu nawigacyjnego (Marsz i in. 2014) i tzw. „sezonu bezlodowego”, w czasie którego zawartość lodów jest mniejsza niż 15% (Pastusiak 2014).

Na Morzu Czukockim i w SW części Morza Karskiego wody powierzchniowe schładzają się do temperatury zamarzania w grudniu. Najpóźniej temperaturę zamarzania osiągają wody Morza Barentsa. W ostatniej dekadzie (2006-2015) na podejściu do północnego wejścia na PDM rzadko kiedy temperatura wody spadała poniżej temperatury zamarzania (tab. 1). Jak podają Styszyńska i Marsz (2016) spowodowane to było dopływem ciepłych wód atlantyckich. Jeżeli tak późne zamarzanie wód na zachodnim i wschodnim podejściu do PDM będzie występowało i w przyszłości, to statki pokonujące PDM w pod koniec listopada będą miały szansę przepłynąć ją po „czystej” wodzie lub w cienkich, młodych lodach, które dla współczesnych statków nie stanowią większego zagrożenia.

Gdy temperatura wody spada poniżej 0°C to statkom, które przez dłuższy czas przebywają w takich wodach grozić może ryzyko zamarzania wody słodkiej w zbiornikach dennych i dziobowych oraz ścinania rurociągów przechodzących przez te zbiorniki, jak również powstawanie ponadnormalnych naprężeń w systemie chłodzenia. Jednakże współczesne statki eksploatowane na PDM winny być wyposażone w odpowiednie urządzenia zapobiegające zamarzaniu wody w zbiornikach. Można zatem stwierdzić, że dla współczesnych statków, sama, nawet bardzo niska, temperatura wody morskiej nie powinna stanowić zagrożenia dla żeglugi, w dalszym ciągu są nimi natomiast zjawiska pochodne związane z dużymi jej spadkami – przede wszystkim zwarta pokrywa grubych lodów.

Analiza anomalii średnich miesięcznych wartości SST względem standardowego 30-letniego okresu obserwacyjnego 1981-2010 nie potwierdziła tak wysokich wzrostów SST jakie raportowane były przez niektórych badaczy, między innymi przez Timokhova i in. (2013) czy Timmermansa (2016). Timokhov i in. (2013) informując o wielkości letniej anomalii SST na Morzu Łaptiewów w 2011 roku rzędu 5-7°C odnoszą ją do średniej dla tego morza obliczonej z okresu 1950-1989 podawanej w Atlasie Severnogo Ledovitogo Okeana, a więc okresu, w którym latem wartości SST w analizowanym gridzie były niższe o około 0,5°C. Cytowani autorzy nie podają również w jakiej części Morza Łaptiewów dokonali swoich pomiarów. Jeżeli pochodziły one ze strefy przybrzeżnej, na przykład z rejonu płytkowodnego podejścia do portu Tiksi, to tak wysokie wartości anomalii były możliwe. Z kolei Timmermans (2016) omawiając zmiany SST w 2016 roku podaje, że w sierpniu, w strefie przybrzeżnej mórz Beauforta, Barentsa i Czukockiego SST była wyższa o 5°C od średniej z lat 1982-2010. Jednocześnie autor ten, posiłkując się bazą danych NOAA Optimum Interpolation (OI) SST Version 2, stwierdza, że na Morzu Czukockim występuje poczynając od 1982 roku trend średniej miesięcznej SST w sierpniu wynoszący około 0,5°C na dekadę. Badania autorów wskazują, że w latach 1979-2016 trend ten w gridzie, położonym na otwartym morzu, a nie w strefie przybrzeżnej, może być oszacowany jedynie na 0,18°C na dekadę. W świetle różnic wyników uzyskanych przez autorów tej pracy i innych (cytowanych tu) badaczy należy zwrócić uwagę na możliwość porównań tylko w przypadku stosowania tych samych baz danych i okresów uśredniania. W innych przypadkach uzyskane wyniki mogą okazać się nieporównywalne i wprowadzać szum informacyjny.

Literatura

- Bulatov L.V., Zakharov V.F., 1976. *Formirovanie termicheskogo rezhima poverkhnostnykh vod v Arkticheskikh moryakh*. Trudy AANII, 319; 63-72.
- Danilov A.I., Mironov E.Yu., Spičkina V.A., 2004. *Izmenčivost' prirodnykh uslovij v šelfovoj zone Barenceva i Karskogo morej*. AARII, St. Petersburg: 431 s.
- Dobrovolskij A.D., Zalugin B.S., 1982. *Morja SSSR*. Izdatel'stvo Moskovskogo Universiteta: 192 s.
- Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G., Smolyanitsky V.M., 2009. *Climate change in Eurasian Arctic Shelf seas. Centennial ice cover observations*. Springer-Praxis Publishing, Chichester: 164 s.
- Locija Karskogo Morja, 1998. Čast 1. GUNiO (Главное Управление навигации и океанографии Министерства обороны Российской Федерации) nr 1115, poprawione do 05.02. 2011: 472 s.
- Locija Morja Laptevych, 2009. GUNiO (Главное Управление навигации и океанографии Министерства обороны Российской Федерации) nr 1118, poprawione do 05.02.2011: 300 s.
- Locija Vostočno-Sibirskogo Morja, 1998. GUNiO (Главное Управление навигации и океанографии Министерства обороны Российской Федерации) nr 1119, poprawione do 05.02.2011: 208 s.
- Locija zapadnoj časti Čukotskogo Morja, Beringovo Proliva i Severo-Zapadnoj časti Beringovo Morja, 1999. GUNiO (Главное Управление навигации и океанографии Министерства обороны Российской Федерации) nr 1120, poprawione do 30.04.2011: 240 s.
- Marsz A.A., 2015. *Model zmian powierzchni lodów morskich Arktyki (1979-2013) – zmienne sterujące modelu „minimalistycznym” i ich wymowa klimatyczna*. Problemy Klimatologii Polarnej, 25: 249-334.
- Marsz A.A., Pastusiak T., Styszyńska A., 2014. *Zmiany powierzchni lodów morskich na morzach eurazjatyckich Arktyki i ich potencjalny wpływ na na nawigację na Północnej Drodze Morskiej w drugiej dekadzie XXI wieku*. Problemy Klimatologii Polarnej, 24: 73-99.
- 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*. Geophysical Research Letters, 34, L19504, doi:10.1029/2007GL031138.
- Pastusiak T., 2014. *Zmienność sezonu “bezlodowego” na Północnej Drodze Morskiej*. Problemy Klimatologii Polarnej, 24: 101-108.
- Pastusiak T., 2016. *The Northern Sea Route as a shipping lane. Expectations and reality*. Springer International Publishing Switzerland: 219 s.
- Polyakov I.V., Beszczynska A., Carmack E.C., Dmitrenko I.A., Fahrbach E., Frolov I.E., Gerdes R., Gerdes R., Hansen E., Holfort J., Ivanov V., Jonson M., Karcher M., Kauker F., Morison J., Orvik K., Schauer U., Smmons H., Skagseth O., Sokolov V., Steel M., Timokhov L., Walsh D., Walsh J.E., 2005. *One more step toward a warmer Arctic*. Geophys Res Lett, 32 (17): 1–4, L17605, doi:10.1029/2005GL0237402005.
- Polyakov I.V., Timokhov L.A., Alexeev V.A., Bacon S., Dimitrenko I.A., Fortier L., Frolov I.E., Gascard J.-C., Hansen E., Ivanov V.V., Laxon S., Mauritzen C., Perovich D., Shimada K., Simmons H.L., Sokolov V.T., Steele M., Toole J., 2010. *Arctic Ocean Warming Contributes to Reduced Polar Ice Cap*. Journal of Physical Oceanography, 40: 2743-2756. doi:10.1175/2010JPO4339.1.
- Rodrigues J., 2008. *The rapid decline of the sea ice in the Russian Arctic*. Cold Regions Science and Technology, 54: 124-142.
- Smith T.M., Reynolds R.W., Peterson T.C., Lawrimore J., 2008. *Improvements to NOAA's Historical Merged Land-Ocean Surface Temperature Analysis (1880-2006)*. Journal of Climate, 21: 2283-2296.
- Steele M., Dickinson S., 2016. *The phenology of Arctic Ocean surface warming*. Journal of Geophysical Research: Oceans, 121: 6847-6861, doi:10.1002/2016JC012089.
- Steele M., Zhang J., Ermold W., 2010. *Mechanisms of summertime upper Arctic Ocean warming and the effect on sea ice melt*. Journal of Geophysical Research, 115, C11004, doi:10.1029/2009JC005849.

- Stiepanov S.I., 1972. *Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost perenosa vody, tepla i solej v Karskom More v naviacionnyj period*. Trudy AANII, 306: 181-187.
- Styszyńska A., Marsz A.A., 2016. *Zmiany zlodzenia Morza Karskiego w latach 1979-2015. Podejście systemowe*. Problemy Klimatologii Polarnej, 26: 109-156.
- Timmermans M.-L., 2016. Sea surface temperature. [w:] Arctic Report Card 2016. <http://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2016>.
- Timokhov L., Ashik I., Dmitrenko I., Hoelemann J., Kassens H., Kirillov S., Polyakov I., Sokolov V., 2012. *Extreme changes of the Arctic Ocean during and after IPY 2007/2008*. Polarforschung, 81 (2): 85-102.
- Timokhov L., Ashik I., Kirillov S., Karpij V., Lebedev N., Sokolov V., 2013. *Termokhalinnoe sostojanie poverkhnostnogo sloja Severnogo Ledovitogo Okean v 2012 g. i tendencii nabljudаемых izmenenij*. Problemy Arktiki i Antarkтики, 4 (98): 56-70.
- Zblewski S., 2008. *Zmiany pokrywy lodowej na Morzu Wschodniosyberyjskim w XX i XXI wieku i ich wpływ na zmiany klimatu tego obszaru*. [w:] Kowalska A., Latocha A., Marszałek H., Pereyma J. (red.), Środowisko przyrodnicze obszarów polarnych. Wydział Nauk o Ziemi i Kształtowania Środowiska, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław: 187-196.
- Zblewski S., Marsz A.A., 2009. *Zmiany temperatury powierzchni Morza Czukockiego (1982-2008)*. Problemy Klimatologii Polarnej, 19: 147-158.
- Zubakin G.K. (red.), 2006. *Ledjanye obrazowanija morej zapadnoj Arktiki*. GNCRF AANII, Sankt-Peterburg: 272 s.

Wpłynęło: 19 września 2016 r., poprawiono: 25 grudnia 2016 r., zaakceptowano: 29 grudnia 2016 r.

Summary

The paper discusses changes of the mean monthly sea surface temperature on the Russian Arctic seas in the years 1979-2016. It was found that during the period under investigation there was a slow increase in water temperature. However, only in the Barents Sea it was statistically significant in all months of the year, and in the SW part of the Kara and western Chukchi seas from June to December. In the analyzed 38 years the highest rise in surface water temperature was recorded in the East Siberian Sea (+0.57°C/decade in August and +0.44°C/decade in September) and in the SW Kara Sea in July (+0.53°C/decade). Still on all these seas, except for the Barents Sea, until June inclusive, the water temperature was lower than its freezing temperature for a particular salinity specific for the sea. At the latest, freezing temperatures reached the waters of the Barents Sea, where in the last decade (2006-2015) at the approach to the north entrance of the Northern Sea Route (NSR) rarely water temperature has fallen below the freezing point. At the same time, the Chukchi Sea waters reached freezing temperatures in December. This means that vessels sailing through the NSR in November will have the chance to pass it through "ice free" water or in thin, young ice, which for modern ships is not a major threat.

Słowa kluczowe: sea surface temperature, changes in water temperature, Northern Sea Route, Russian Arctic.